



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL CRISTIANO FERRARI

**PROCESSO TIG COM MOVIMENTAÇÃO OSCILATÓRIA LONGITUDINAL DA
TOCHA PARA MITIGAÇÃO DE HUMPING**

FLORIANÓPOLIS – SC
2019

Daniel Cristiano Ferrari

**PROCESSO TIG COM MOVIMENTAÇÃO OSCILATÓRIA LONGITUDINAL DA
TOCHA PARA MITIGAÇÃO DE HUMPING**

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. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Coorientadores: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra e Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky

Florianópolis
2019

Ferrari, Daniel Cristiano

Processo TIG com Movimentação Oscilatória Longitudinal da Tocha para Mitigação de Humping / Daniel Cristiano Ferrari ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, coorientador, Mateus Barancelli Schwedersky, coorientador, Jair Carlos Dutra, 2020.

235 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem TIG Autógena. 3. Técnica Switch Back. 4. Mitigação de Humping. 5. Movimentação Oscilatória Longitudinal da Tocha. I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique. II. Schwedersky, Mateus Barancelli. III. Dutra, Jair Carlos IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

Daniel Cristiano Ferrari

Processo TIG com Movimentação Oscilatória Longitudinal da Tocha para Mitigação de Humping

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Nelso Gauze Bonacorso, Dr(a).
Instituto Federal Catarinense – IFSC

Prof.(a) Moisés Alves de Oliveira, Dr(a).
Empresa Brasileira de Compressores – Embraco

Prof.(a) Fábio Antônio Xavier, Dr(a).
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica

Prof. Dr.(a) Jonny Carlos da Silva
Coordenador(a) do Programa de Pós – Graduação

Prof. Dr.(a) Régis Henrique Gonçalves e Silva
Orientador(a)

Florianópolis, 13 de dezembro de 2019.

A todos aqueles que conseguiram realizar seus sonhos sacrificando feriados e domingos pelo menos uma centena de vezes. A todos aqueles que construíram seu sucesso à noite e dessa forma alcançaram resultados superiores à maioria. A todos aqueles que estavam estudando e trabalhando enquanto outros aproveitavam horas de lazer. A todos aqueles que acreditam e comungam do pensamento de que quem tem força de vontade encontra um meio e quem não tem encontra uma desculpa. Meu trabalho é dedicado a estas pessoas.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por seu fôlego de vida em mim, foi-me sustento e deu-me coragem para questionar realidades e propor sempre um mundo novo de possibilidades. Também por ter me abençoado com esta oportunidade e protegido em viagens e nas atividades cotidianas de pesquisa.

Aos meus Pais, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação deram-me em muitos momentos a coragem e a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e convicção de que não estava sozinho nessa caminhada.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por abrir as portas e possibilitar a realização do meu sonho de possuir um título acadêmico de mestre em engenharia mecânica.

A todos os funcionários do POSMEC, em especial ao coordenador e a secretária do programa, os quais sempre se colocaram à disposição para solucionar os problemas e as angústias pelos quais nós na qualidade de alunos sempre estamos vulneráveis a passar.

Aos professores e orientadores, pelo apoio, incentivo, paciência e brilhantismo com que se dispusera a compartilhar seus conhecimentos. Agradeço em especial os professores Régis Henrique Gonçalves e Silva e Jair Carlos Dutra por terem me recebido para a entrevista e aceitado cordialmente minha presença neste renomado laboratório de pesquisa. Também pela confiança depositada na minha capacidade e no meu projeto, a confiança dos senhores serviu-me de estímulo e a forte personalidade de espelho. Quero afirmar que a minha formação, inclusive pessoal, não teria sido a mesma sem a convivência e constante presença das suas ímpares e distintas pessoas.

À Agência de Fomento CNPq, pela bolsa concedida, que propiciou a minha estada em Florianópolis e possibilitou a dedicação integral e operacionalização desta pesquisa.

Aos meus colegas pesquisadores, pelo empréstimo vitalício de suas amizades, de todos ficarão o sorriso do encontro, os sonhos que sonhamos juntos e o aperto no peito da saudade. Desejo a todos muito sucesso e que num futuro próximo possamos nos reencontrar novamente.

Aos departamentos de projeto e eletrônica, pelo desenvolvimento do sistema de oscilação da tocha, sem o qual não teria sido possível realizar a pesquisa a objeto fim deste trabalho.

A todas as demais pessoas do LABSOLDA e da UFSC que fizeram parte da minha caminhada contribuindo direta ou indiretamente para o êxito da minha formação.

A descoberta consiste em ver o que todos viram e pensar o que ninguém pensou.

(Albert Von Szent-Györgyi Nagyrápolt, 1937).

RESUMO

Em linhas gerais, este trabalho explora a produtividade do processo TIG autógeno (sem adição de material) associado à movimentação oscilatória longitudinal em altas frequências, na tentativa de tornar-se uma alternativa competitiva quando comparada ao processo MIG/MAG, nas aplicações industriais de alta produtividade, enfatizando também, a redução de matéria-prima, de forma limpa e sustentável, com menor impacto ao meio ambiente e saúde dos colaboradores. Esta variante de oscilação da tocha (*switch back*), ainda não obteve um nível de desenvolvimento a ponto de ser utilizada largamente na indústria e também não apresenta uma quantidade de trabalhos expressiva na literatura, fazendo crescer a motivação para a realização deste trabalho. Os aspectos relativos aos defeitos de soldagem foram avaliados para possibilitar uma solução eficiente da nova aplicação. Como objetivo geral este trabalho propõem-se a construir as bases científicas e tecnológicas para o desenvolvimento da técnica *switch back* aplicada ao processo TIG autógeno alta frequência, a fim de obter maior produtividade e repetibilidade que os processos concorrentes. Os procedimentos propostos para a aplicação da técnica *switch back* enfatizaram o aumento da produtividade pela estabilidade e repetibilidade do processo, atreladas a uma maior velocidade de soldagem quando comparado ao modo convencional. A técnica *switch back* mostrou-se apropriada na aplicação de chapas finas de espessura 3 e 2 mm em juntas de aresta e de topo obtendo regularidade do cordão e penetração adequadas. O ganho de produtividade foi de 33% e 50% na velocidade soldagem quando aplicado o *switch back* nos corpos de prova em junta formato aresta e de topo, respectivamente. Já com relação ao incremento de produtividade para as juntas de aresta, não houve ganho com a aplicação *switch back* em juntas sem *gap*, porém em juntas com *gap* de 1 mm o ganho foi expressivo de 33% em relação ao TIG convencional.

Palavras – chave: tecimento longitudinal, TIG de alta produtividade, TIG mecanizado, *Switch Back*.

ABSTRACT

In general terms, this work explores the productivity of the autogenous TIG process (without material addition) associated with the high frequency longitudinal oscillatory movement, in an attempt to become a competitive alternative when compared to the MIG / MAG process, in industrial applications with high productivity, also emphasizing the reduction of raw materials in a clean and sustainable way, with less impact on the environment and health of employees. This variant of torch oscillation (*switch back*), has not yet achieved a level of development to the point of being widely used in the industry and also does not present a significant amount of work in the literature, increasing the motivation for this work. The aspects related to welding defects were evaluated to enable an efficient solution of the new application. The general objective of this work is to build the scientific and technological bases for the development of the switch back technique applied to the high frequency autogenous TIG process, in order to obtain higher productivity and repeatability than the competing processes. The proposed procedures for the application of the *switch back* technique emphasized the productivity increase due to the stability and repeatability of the process, linked to a higher welding speed when compared to the conventional mode. The *switch back* technique was shown to be suitable for the application of 3 and 2 mm thin sheets on edge and top joints, obtaining proper bead regularity and penetration. The productivity gain was 33% and 50% in welding speed when the switch back was applied to edge and top joint specimens, respectively. Regarding the productivity increase for the edge joints, there was no gain with the application of switch back in joints without gap, but in joints with 1 mm gap the gain was expressive of 33% compared to conventional TIG.

Key words: longitudinal weaving, high productivity TIG, automated TIG, mechanized TIG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - União de tubos membrana de paredes de caldeira pelo processo TIG com emprego da técnica <i>keyhole</i> . Em (a): corte transversal, em (b): face do cordão e; em (c): raiz do cordão.	29
Figura 2.2 - Soldagem TIG autógena no modo convencional mostrando a formação do defeito de humping. $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 250$ A, $A_e = 40^\circ$, Truncamento = 2 mm, gás Ar, $V_g = 15$ l/min.	29
Figura 2.3 - Imagem representativa ilustrando as duas morfologias de <i>Humping</i> . Em (a): morfologia GRM e, em (b): morfologia BCM.	30
Figura 2.4 - Distribuição das bolhas na seção transversal dos corpos de prova. Em (a) soldagem TIG normal com frequência de 60 Hz, em (b): soldagem TIG de alta frequência (15 KHz).	34
Figura 2.5 - Efeito da frequência no diâmetros, quantidade e distribuição das bolhas no cordão de solda. .	35
Figura 2.6 - Seção transversal da tocha com seus elementos principais da patente US – 4295031 (A), onde (2) representa o sentido do tecimento transversal linear, (10) o carretel de arame eletrodo, (11) arame-eletrodo, (12) alimentador de arame por motor elétrico, (13) bico de contato, (14) tubo condutor de eletricidade para guiar o arame, (15) pinos de articulação pendular do tubo guia, (16, 17 e 18) composição do eletroímã.	36
Figura 2.7 - Esquema da sincronização do processo MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha (<i>switch back</i>) e polaridade (CC^+ nas laterais e CC^- no centro da junta.	37
Figura 2.8 - Imagens das faces e raízes dos cordões de solda obtidos com a aplicação de <i>switch back</i> , com deslocamento de avanço de 7,5 mm. Em (a): deslocamento de reversão de 2,5 mm, em (b): deslocamento de reversão de 3 mm e, em (c): deslocamento de reversão de 3,5 mm.	38
Figura 2.9 - Cordões de solda realizados com a aplicação de <i>switch back</i> para diferentes desníveis. Os desníveis são (a) 1,0 mm, (b) 2,0 mm e; (c) 3,0 mm.	39
Figura 2.10 - Imagens da superfície e raiz dos cordões d solda obtidos com a aplicação da técnica <i>switch back</i> para estudo do desalinhamento da junta. Em (a): abertura constante de 3,0 mm, em (b): abertura constante de 4,0 mm e; em (c): desalinhamento da abertura de 3,0 a 5,2 mm.	40
Figura 2.11 - Soldagem TIG autógena convencional mostrando a formação do defeito de humping.	40
Figura 2.12 - Cordão de solda obtido com sobreposição de 50% em (a) e, cordão de solda obtido com sobreposição de 75% em (b).	41
Figura 2.13 - Superfície dos cordões de solda na posição plana e vertical. Posição plana, em (a): 1,5 Hz, em (c): 2,5 Hz e; em (e) 3,5 Hz. Posição vertical, (b): 1,5 Hz, em (d): 2,5 Hz e; em (f) 3,5 Hz.	42
Figura 2.14 - Imagem das macrografias longitudinais da região B (à direita). Soldas realizadas na posição vertical para diferentes frequências.	42
Figura 2.15 - União dos componentes da roda de aço dos tratores pelo processo de soldagem MIG/MAG.	43
Figura 2.16 - Imagens das soldas produzidas com a aplicação da técnica <i>switch back</i> juntamente com a sincronização da corrente pulsada. Em (a): junta radial, em (b): junta circunferencial interna e; em (c): junta circunferencial externa.	43
Figura 2.17 - Aspecto visual dos cordões soldados. Em (a): soldagem convencional, em (b): <i>switch back</i> constante $V_a = V_r$ e; em (c): <i>switch back</i> $V_a = 4 \cdot V_r$	44
Figura 2.18 - Efeito da inclinação da tocha na soldagem <i>switch back</i> (comprimento de avanço de 10 mm e de reversão de 5 mm).	45
Figura 2.19 - Imagens das Soldas Realizadas por Kaneko com a aplicação da técnica <i>switch back</i> . Em (a): $V_a = V_r$ 12,5 mm/s e, em (b): $V_a = 27,3$ mm/s e $V_r = 9,21$ mm/s.	46
Figura 2.20 - Resultados das soldagens realizadas por JIN et al [27] com $V_s = 4,17$ mm/s e $I_m = 155$ A para uma chapa de alumínio de 3,2 mm . Em (a): face do cordão em modo convencional, em (b): raiz do cordão em modo convencional, em (c): face do cordão em modo <i>switch back</i> e; em (d): raiz do cordão em modo <i>switch back</i>	47
Figura 2.21 - Máxima velocidade de soldagem obtida na soldagem de juntas sobrepostas. Em (a): convencional com 35 cm/min e, em (b): <i>switch back</i> com 57 cm/min.	48
Figura 2.22 - Caminho percorrido pela tocha na trajetória triangular <i>switch back</i>	49
Figura 2.23 - Corte transversal e vista superior de cordões de solda para revestimento com e sem inclinação da tocha.	50
Figura 2.24 - Corte transversal e vista superior de cordões de solda para revestimento sem inclinação da tocha para diferentes trajetórias.	50
Figura 2.25 - Macrografias e visão superior dos cordões de solda obtidos ao se fazer a inversão de polaridade da corrente elétrica.	51

Figura 2.26 - Soldagem de uma circunferência com variação de <i>gap</i> na posição vertical com a aplicação da técnica <i>switch back</i> . Em (a): superfície da solda e, em (b): raiz da solda.	52
Figura 2.27 - Imagens das raízes das soldas realizadas com <i>switch back</i> em chapas desalinhasadas. Em (a): <i>gap</i> de 0 a 2 mm e; em (b) <i>gap</i> de 0 a 4 mm.	52
Figura 2.28 - Imagens do acabamento superficial dos cordões de solda obtidos em juntas sobrepostas na posição horizontal. Em (a): convencional e, em (b): <i>switch back</i>	53
Figura 2.29 - Distribuição de calor no lado oposto ao soldado. Em (a): para a movimentação linear convencional e, em (b): para o <i>switch back</i>	54
Figura 3.1 - Foto ilustrativa da fonte de soldagem modelo MTE DIGITEC 600.	55
Figura 3.2 - Tartilope V2 do fabricante SPS com o suporte de tocha.	56
Figura 3.3 - Tocha TIG automática resfriada a água modelo AUT 27A-25.	57
Figura 3.4 - Afiaador elétrico manual Turbo Sharp X.	57
Figura 3.5 - Medidor de Deslocamento Linear.	58
Figura 3.6 - Imagem Ilustrativa da câmera de alta velocidade IDT Motion Pro Y4-S2.	59
Figura 3.7 - Foto ilustrativa do Sistema de Aquisição Portátil – SAP V4.	59
Figura 3.8 - Foto ilustrativa do medidor de vazão de gases MVG-3.	60
Figura 3.9 - Módulo de Controle do sistema de oscilação. Em (a): potenciômetro para regulagem da frequência, em (b): botão liga/desliga, em (c): botão de sentido do movimento e; em (d): display de visualização da frequência.	61
Figura 3.10 - Módulo de Oscilação acoplado ao suporte com a tocha de soldagem.	61
Figura 3.11 - Representação esquemática da regulagem da amplitude no módulo de oscilação.	62
Figura 3.12 - Representação do corpo de prova com suas dimensões expressas em milímetros. O ponto 1 marca o início da soldagem e o ponto 2 o término.	63
Figura 3.13 - Imagem representativa do corpo de prova com <i>gap</i> de 1 mm utilizado para fazer os ensaios em junta tipo aresta.	64
Figura 3.14 - Imagem representativa do corpo de prova utilizado para fazer os ensaios em junta de topo na posição plana.	64
Figura 3.15 - Suporte de fixação dos copos de prova para soldagem em junta de topo. Em (a): mostra o corpo de prova sem ponteamto com as chapas sendo afastadas durante a soldagem e, em (b): o afastamento não ocorre devido ao ponteamto nas extremidades das mesmas.	65
Figura 3.16 - : Desenho representativo da arruela com os oito pontos medidos (à esquerda). Quadro com os valores das respectivas medições juntamente com a média e o desvio padrão (à direita).	68
Figura 3.17 - Representação esquemática de um eletrodo com truncamento de 2 mm utilizado na soldagem de junta de aresta.	69
Figura 3.18 - Imagem da bancada de ensaios para aferição da frequência. Em (a): medidor de deslocamento linear, em (b): módulo de controle, em (c): Sistema de Aquisição Portátil – SAP V0 e; em (d): tocha de soldagem.	70
Figura 3.19 - Imagem do gabarito usado para aquisição de dados na ponta da tocha.	71
Figura 3.20 - Posicionamento do medidor de deslocamento linear em relação ao gabarito da tocha de soldagem.	72
Figura 3.21 - Imagem da bancada de ensaios para coleta do sinal de tensão. Em (a): unidade de refrigeração, em (b): Sistema SAP-4, em (c): cilindro de gás, em (d): módulo de controle, em (e): manipulador Tartilope V2 e, em (f): placa de cobre.	74
Figura 3.22 - Imagem da placa de cobre refrigerada com água, fixada sobre a bancada de ensaios.	75
Figura 3.23 - Distância eletrodo peça medida com arruela de cobre de 3 mm entre o eletrodo propriamente dito e a placa de cobre.	75
Figura 3.24 - Imagem ilustrativa dos osciladores. Em (a): oscilador com uma guia e; em (b): oscilador com duas guias.	77
Figura 3.25 - Montagem da bancada para os ensaios de aquisição do sinal de tensão.	79
Figura 3.26 - Imagem da bancada de ensaios para execução da filmagem com a câmera de alta velocidade das soldas sobre chapa com o <i>switch back</i>	81
Figura 3.27 - Fixação do corpo de prova no suporte da bancada, utilizando peças de Celeron.	82
Figura 3.28 - Parâmetros dimensionais de um cordão de solda. Onde as siglas representam (L): largura, (R): altura do reforço, (Pe): penetração total, (Af): área fundida e; (Ad): área depositada.	85
Figura 3.29 - Desenho representativo dos ângulos de posicionamento da tocha. Em (a): tocha com ângulo de ataque de 45° e, em (b): tocha com ângulo de trabalho de 0°.	86

Figura 3.30 - Distancia eletrodo peça de 3 mm e posicionamento relativo do centro do eletrodo à linha central da junta tipo aresta.	87
Figura 3.31 - Desenho representativo do suporte com a fixação do corpo de prova para realização da soldagem em uma junta tipo aresta.	88
Figura 3.32 - Vista frontal do suporte de fixação dos corpos de prova para soldagem em junta de topo.	91
Figura 4.1 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica <i>switch back</i> com sobreposição de 60% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 5$ Hz.	95
Figura 4.2 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica <i>switch back</i> com sobreposição de 60% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 5$ Hz.	95
Figura 4.3 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica <i>switch back</i> com sobreposição de 53% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 4$ Hz.	96
Figura 4.4 - Representação gráfica do conceito matemático de amplitude.	99
Figura 4.5 - Gráfico representativo da trajetória <i>switch back</i> com 50% de sobreposição de trajetória. $V_s = 200$ cm/min, $f = 5$ Hz e $A = 10$ mm.	102
Figura 4.6 - Representação esquemática do movimento <i>switch back</i> com marcação dos pontos onde a velocidade é máxima para o avanço (verde) e para a reversão (vermelho).	104
Figura 4.7 - Representação da folga de 1 mm no oscilador de uma guia. Em (a): bloco de poliacetal, em (b): motor de passo e; em (c): placa metálica deslizante.	106
Figura 4.8 - Imagem do oscilador de duas guias evidenciando os patins utilizados para transmitir movimento entre o bloco de poliacetal e o conjunto móvel.	107
Figura 4.9 - Dimensões dos eixos do robô REIS RV-15 mostrando os braços de alavanca responsáveis pelas vibrações no módulo de oscilação.	108
Figura 4.10 - : Resposta do módulo de oscilação para as amplitudes selecionadas quando aumenta-se a frequência.	111
Figura 4.11 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 4 mm quando aumenta-se a frequência.	112
Figura 4.12 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 6 mm quando aumenta-se a frequência.	113
Figura 4.13 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 8 mm quando aumenta-se a frequência.	114
Figura 4.14 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 10 mm quando aumenta-se a frequência.	115
Figura 4.15 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 12 mm quando aumenta-se a frequência.	116
Figura 4.16 - Medidas padrões do posicionamento dos eixos do Tartilope V2 até a ponta da tocha utilizadas em todos os ensaios.	117
Figura 4.17 - Gráfico que relaciona as frequências selecionadas no módulo de controle com a média das frequências reais medidas.	118
Figura 5.1 - Resultados da primeira repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica <i>switch back</i>	124
Figura 5.2 - Resultados da segunda repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica <i>switch back</i>	125
Figura 5.3 - Resultados da terceira repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica <i>switch back</i>	126
Figura 5.4 - Sobreposição da quantidade de vezes que a tocha de soldagem percorre a mesma região do cordão de solda.	129
Figura 5.5 - Comparação da penetração entre o modo convencional e a técnica <i>switch back</i>	131
Figura 5.6 - Comparação da largura entre o modo convencional e a técnica <i>switch back</i>	134
Figura 5.7 - Comparação da área fundida entre o modo convencional e a técnica <i>switch back</i>	135
Figura 5.8 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica <i>switch back</i> para uma amplitude de 4 mm.	137
Figura 5.9 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica <i>switch back</i> para uma amplitude de 8 mm.	138
Figura 5.10 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica <i>switch back</i> para uma amplitude de 12 mm.	139
Figura 5.11 - Imagens das macrografias dos cordões realizados com o processo TIG autógeno no modo <i>switch back</i> e convencional. Seção transversal do corte na posição 120 mm.	140

Figura 5.12 - Histograma com curva normal que representa a distribuição e frequência da ocorrências dos valores medidos de penetração quando aplicada a técnica <i>switch back</i>	142
Figura 5.13 - Imagem dos cordões de solda obtidos pela técnica <i>switch back</i> com $I_m = 300$ A, $V_s = 30$ cm/min e $f = 2$ Hz. Em (a): cordão realizado com o sistema de oscilação e, em (b): cordão obtido pelo robô antropomórfico REIS RV-15.	146
Figura 5.14 - Comparação entre os movimentos de <i>switch back</i> produzidos com o robô antropomórfico REIS e com o sistema de oscilação.....	147
Figura 5.15 - Expansão da terceira extremidade do vale da combinação do movimento <i>switch back</i> do robô antropomórfico e do sistema de oscilação. A linha em verde representa o robô e a linha em azul representa o sistema de oscilação.	149
Figura 5.16 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 4$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	153
Figura 5.17 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 4$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	153
Figura 5.18 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 8$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	154
Figura 5.19 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 8$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	154
Figura 5.20 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 12$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	155
Figura 5.21 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 12$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.	155
Figura 5.22 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem convencional com $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.	158
Figura 5.23 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 2$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.	158
Figura 5.24 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 4$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.	159
Figura 5.25 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 6$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.	159
Figura 5.26 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 8$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.	160
Figura 5.27 - Imagem representativa dos movimentos de avanço e reversão da tocha enfatizando o suposto movimento de inércia do arco voltaico na alternância de sentido da tocha.	161
Figura 5.28 - Imagens do arco voltaico obtidas na filmagem de alta velocidade com aplicação da técnica <i>switch back</i> . Parâmetros: $f = 8$ Hz e $A = 10$ mm.	163
Figura 5.29 - Imagens ampliadas da filmagem de alta velocidade que mostram uma variação de DEP entre o movimento de avanço e de reversão do <i>switch back</i>	164
Figura 5.30 - Gráfico demonstrando um aumento na variação da DEP a medida que a frequência de oscilação aumenta quando utiliza-se a técnica <i>switch back</i>	165
Figura 5.31 - Imagens das macrografias realizadas no sentido longitudinal para averiguar a presença de dentes de serra no perfil das soldas com o <i>switch back</i>	168
Figura 5.32 - Modificação da geometria da poça de acordo com o incremento de frequência e amplitude.	170
Figura 5.33 - Imagens da poça de fusão com processo TIG autógeno convencional obtidas por filmagem de alta velocidade.	172
Figura 5.34 - Imagens da poça de fusão com processo TIG autógeno <i>switch back</i> com $f = 8$ Hz e $A = 8$ mm obtidas por filmagem de alta velocidade.....	176
Figura 5.35 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno em modo convencional nas juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): $V_s = 150$ cm/min, em (b): $V_s = 180$ cm/min e; em (c): $V_s = 200$ cm/min.	177
Figura 5.36 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 150 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.	178

Figura 5.37 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 150 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	179
Figura 5.38 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 180 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	180
Figura 5.39 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 180 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	181
Figura 5.40 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 200 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	182
Figura 5.41 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma V_s de 200 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem <i>gap</i> . Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	183
Figura 5.42 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno em modo convencional nas juntas de aresta com <i>gap</i> . Em (a): $V_s = 150$ cm/min, em (b): $V_s = 180$ cm/min, em (c): $V_s = 180$ cm/min, em (d): $V_s = 200$ cm/min e; em (e): $V_s = 200$ cm/min.....	185
Figura 5.43 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 150 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	186
Figura 5.44 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 150 cm/min e amplitude de 8 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	187
Figura 5.45 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 180 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	188
Figura 5.46 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 180 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	190
Figura 5.47 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 200 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	191
Figura 5.48 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica <i>switch back</i> com <i>gap</i> para uma velocidade de 200 cm/min e amplitude de 8 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.....	192
Figura 5.49 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena em modo convencional para as velocidades de 150, 180 e 200 cm/min em junta de aresta com <i>gap</i> de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.....	199
Figura 5.50 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> , para a velocidade de 150 cm/min em junta de aresta com <i>gap</i> de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.....	200
Figura 5.51 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> , para a velocidade de 180 cm/min em junta de aresta com <i>gap</i> de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.....	200
Figura 5.52 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> , para a velocidade de 200 cm/min em junta de aresta com <i>gap</i> de 1 mm.....	201
Figura 5.53 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 20$ cm/min. Em (a): 90 A, em (b): 100 A, em (c): 110 A, em (d): 120 A, em (e): 130 A, em (f): 140 A, em (g): 150 A e; em (h): 160 A.....	204
Figura 5.54 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 30$ cm/min. Em (a): 160 A, em (b): 170 A, em (c): 180 A e; em (d): 190 A.....	205
Figura 5.55 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 40$ cm/min. Em (a): 190 A, em (b): 200 A e; em (c): 210 A.....	206
Figura 5.56 - Imagem da Face e Raiz do cordão de solda realizado com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 50$ cm/min. Em (a): 210 A.....	207

Figura 5.57 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do <i>switch back</i> para uma $V_s = 20$ cm/min e $I_m = 150$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.	208
Figura 5.58 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do <i>switch back</i> para uma $V_s = 30$ cm/min e $I_m = 180$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz e; em (c): $f = 7$ Hz.	210
Figura 5.59 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do <i>switch back</i> para uma $V_s = 40$ cm/min e $I_m = 200$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.	211
Figura 5.60 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do <i>switch back</i> para uma $V_s = 50$ cm/min e $I_m = 210$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.	213
Figura 5.61 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do <i>switch back</i> para uma $V_s = 60$ cm/min e $I_m = 240$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (b1): repetição do ensaio com $f = 6$ Hz.	214
Figura 5.62 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 20$ cm/min. Em (a): 170 A, em (b): 180 A, em (c): 190 A, em (d): 200 A, em (e): 210 A e; em (f): 220 A.	215
Figura 5.63 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 30$ cm/min. Em (a): 220 A, em (b): 230 A e; em (c): 240 A.	216
Figura 5.64 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 40$ cm/min. Em (a): 240 A, em (b): 250 A, em (c): 260 A, em (d): 270 A, em (e): 280 A e; em (f): 290 A.	217
Figura 5.65 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 190$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.	219
Figura 5.66 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma $V_s = 30$ cm/min, $I_m = 230$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.	220
Figura 5.67 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica <i>switch back</i> para uma $V_s = 40$ cm/min, $I_m = 280$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (b1): repetição de 6 Hz, em (c): $f = 7$ Hz, em (d): $f = 8$ Hz.	222
Figura 5.68 - Defeito de cratera na raiz do cordão de solda no momento do fechamento do arco para um corpo de prova com espessura de 2 mm. Em (a): soldagem convencional com $V_s = 20$ cm/min e $I_m = 130$ A e; em (b): soldagem com aplicação do <i>switch back</i> com $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 130$ A, $f = 5$ Hz e $A = 8$ mm.	224

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Aspectos dos cordões produzidos com diferentes comprimentos de reversão. Fonte: [18].	45
Tabela 3.1: Medição da Espessura das Chapas de 2 e 3 mm	66
Tabela 3.2: Valores médios da aferição de velocidades do manipulador Tartilope V2.	67
Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para filmagem do arco com a câmera de alta velocidade.	79
Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para filmagem da poça de fusão com a câmera de alta velocidade.	81
Tabela 4.1: Erro Percentual entre a Amplitude Seleccionada e a Amplitude Realizada para uma Frequência de 0,5 Hz.	110
Tabela 4.2: Relação entre os valores de frequência selecionados no módulo de controle com a média dos valores das frequências medidas.	119
Tabela 5.1: Matriz de ensaios para a caracterização da soldagem com aplicação da técnica <i>switch back</i> .	120
Tabela 5.2: Amplitudes reais calculadas para cada amplitude selecionada em função da variação da frequência.	121
Tabela 5.3: Quadro percentual das sobreposições calculadas para a matriz e ensaios relacionando frequência e amplitude.	121
Tabela 5.4: Relação do percentual e número de vezes que a tocha cobre uma mesma região do cordão de solda.	130
Tabela 5.5: Relação dos valores idênticos de sobreposição com a penetração.	132
Tabela 5.6: Valores médios com desvio padrão e principal concentração de valores dos parâmetros analisados na matriz de ensaios do <i>switch back</i> .	142
Tabela 5.7: Resultados da análise de variância para determinação da influência da amplitude e frequência sobre os parâmetros geométricos dos ensaios de caracterização do <i>switch back</i> .	143
Tabela 5.8: Comparação entre a frequência selecionada e a frequência do sinal de tensão medido pelo SAP.	156
Tabela 5.9: Valores de Tensão Média e desvio padrão para as frequências utilizadas nos ensaios sobre a placa de cobre.	160
Tabela 5.10: Valores da Variação Média da DEP com relação ao aumento de frequência utilizada na técnica <i>switch back</i> .	166
Tabela 5.11: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena em modo convencional nas juntas de aresta sem <i>gap</i> .	177
Tabela 5.12: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.	177
Tabela 5.13: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.	179
Tabela 5.14: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.	179
Tabela 5.15: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.	180
Tabela 5.16: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.	181
Tabela 5.17: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta sem <i>gap</i> para uma Vs de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.	183
Tabela 5.18: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena em modo convencional nas juntas de aresta com <i>gap</i> .	184
Tabela 5.19: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.	186

Tabela 5.20: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	187
Tabela 5.21: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.....	188
Tabela 5.22: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	189
Tabela 5.23: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.....	191
Tabela 5.24: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de aresta com <i>gap</i> de 1 mm para uma Vs de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	192
Tabela 5.25: Resultados adequados e não adequados da aplicação <i>switch back</i> em juntas de aresta para avaliar os valores de sobreposição de trajetória.....	196
Tabela 5.26: Resultados adequados e não adequados da aplicação <i>switch back</i> em juntas de aresta para avaliar a relação entre velocidade máxima de avanço e velocidade máxima de reversão.....	197
Tabela 5.27: Valores medidos das áreas fundidas para a soldagem TIG autógena em modo convencional e para a aplicação da técnica <i>switch back</i>	199
Tabela 5.28: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 20 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	208
Tabela 5.29: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	209
Tabela 5.30: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 40 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	211
Tabela 5.31: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 50 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	212
Tabela 5.32: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 60 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	214
Tabela 5.33: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma Vs de 20 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	218
Tabela 5.34: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma Vs de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	219
Tabela 5.35: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica <i>switch back</i> nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma Vs de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.....	221

LISTA DE EQUAÇÕES

(4.1).....	96
(4.2).....	96
(4.3).....	97
(4.4).....	99
(4.5).....	99
(4.6).....	99
(4.7).....	100
(4.8).....	100
(4.9).....	100
(4.10).....	103
(4.11).....	103
(4.12).....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEP	Distância eletrodo peça
GRM	<i>Gouging Region Morphology</i>
BCM	<i>Beaded Cylinder Morphology</i>
SAE	<i>Society American of Engineering</i>
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
IHM	Interface Homem Máquina
AWS	<i>American Welding Society</i>
MVG	Medidor de Vazão de Gás
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
MIG/MAG	<i>Gas Metal Arc Welding</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	unidade métrica de milímetro
%	símbolo matemático de percentual
m/min	metro por minuto
A	unidade métrica de corrente elétrica Ampère
V _s	velocidade de soldagem
I _m	corrente elétrica média
dγ/dT	variação da tensão superficial com a temperatura
Ma	número de Marangoni adimensional
y/dt	variação da tensão superficial com a temperatura
$\frac{dT}{dx}$	gradiente da temperatura
L	comprimento característico
η	viscosidade
a	difusividade térmica
O	símbolo químico na tabela periódica do oxigênio
S	símbolo químico na tabela periódica do enxofre
Se	símbolo químico na tabela periódica do selênio
Te	símbolo químico na tabela periódica do telúrio
Al	símbolo químico na tabela periódica do alumínio
Si	símbolo químico na tabela periódica do silício
Mn	símbolo químico na tabela periódica do manganês
Ti	símbolo químico na tabela periódica do titânio
Ca	símbolo químico na tabela periódica do cálcio
Ce	símbolo químico na tabela periódica do cério
La	símbolo químico na tabela periódica do lantânio
C	símbolo químico na tabela periódica do carbono
Cr	símbolo químico na tabela periódica do cromo
<	símbolo matemático de menor
>	símbolo matemático de maior
Ae	ângulo de afiação do eletrodo
Ar	símbolo químico do gás argônio
V _g	vazão volumétrica de gás
l/min	litros por minuto
Pa	pressão do arco elétrico
Ph	pressão hidrostática
Pc	pressão exercida pelas forças capilares
V	unidade métrica de tensão elétrica Volt
mm/s	milímetros por segundo
°	unidade matemática para grau
He	símbolo químico do gás hélio
H ₂	símbolo químico do gás hidrogênio
cm/min	centímetro por minuto
E-WTh2	Eletrodo de Tungstênio com 2% de Tório
A/mm ²	Ampère por milímetro quadrado
m/min	metro por minuto
Hz	unidade métrica de frequência Hertz
CC ⁺	corrente contínua constante positiva
CC ⁻	corrente contínua constante negativa

ms	submúltiplo da unidade de tempo milissegundos
f	símbolo da unidade métrica de frequência
Va	velocidade de avanço
Vr	velocidade de reversão
Ip	corrente elétrica de pulso
Ib	corrente elétrica de base
Af	área fundida
Ad	área depositada
R/L	relação de reforço por largura
CO ₂	símbolo químico do gás carbônico
°C	unidade métrica de temperatura graus Celsius
(X), (Y), (Z)	eixos direcionais do plano cartesiano
KHz	múltiplo da unidade de frequência quilohertz
Pixels	pontos por polegadas
l/min	litros por minuto
bar	unidade de pressão equivalente a 100.000 Pa
ε	coeficiente de emissividade térmica
kg	unidade métrica de massa quilograma
m ³	unidade métrica de volume metro cúbico
Ø	símbolo matemático de diâmetro
txt	extensão de arquivo do MS Word
rpm	rotações por minuto
R	altura do reforço do cordão de solda
L	largura do cordão de solda
Pe	penetração total do cordão de solda
Af	área fundida do cordão de solda
Ad	área depositado no cordão de solda
“	símbolo matemático de polegadas
A	amplitude do <i>switch back</i>
x(t)	posição em função do tempo
sen	função trigonométrica do seno
ω	velocidades angular
t	instante de tempo
s	unidade métrica de tempo segundo
π	relação trigonométrica entre o comprimento da circunferência e o diâmetro do círculo
v(t)	velocidade resultante da tocha em função do tempo
cos	função trigonométrica do cosseno
t ₁ , t ₂ , t ₃	instantes de tempo onde, onde v(t) é igual a zero
x(1), x(2), x(3)	posições no espaço onde v(t) é igual a zero
S	sobreposição de trajetória
Da	deslocamento de avanço da tocha
Dr	deslocamento de reversão da tocha
V _{máximo}	velocidade máxima atingida pela tocha
V _{mínimo}	velocidade mínima atingida pela tocha
(w)	eixo prismático de tecimento
(A)	eixo prismático rotacional
Aa	amplitude aparente de oscilação da tocha
Ar	amplitude real de oscilação da tocha
t _r	instante de tempo resultante em segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	OBJETIVO GERAL.....	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2	ANTECEDENTES E ESTADO DA ARTE	27
2.1	PROBLEMÁTICAS DO PROCESSO TIG AUTÓGENO DE ELEVADA PRODUTIVIDADE.....	27
2.2	MOVIMENTO DE OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA E SOLDAGEM TIG DE ALTA FREQUÊNCIA.....	31
2.2.1	Conceitos da Técnica <i>Switch Back</i>	31
2.2.2	Aplicações da Técnica <i>Switch Back</i> e Soldagem de Alta Frequência	33
2.2.3	Estudos termográficos da influência de oscilação da tocha	53
3	EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	EQUIPAMENTOS	55
3.1.1	Fonte de Soldagem.....	55
3.1.2	Manipulador	55
3.1.3	Tocha de Soldagem.....	56
3.1.4	Afiador de Eletrodos	57
3.1.5	Medidor de Deslocamento Linear	58
3.1.6	Câmera de Filmagem de Alta velocidade	58
3.1.7	Sistema de Aquisição Portátil – SAP	59
3.1.8	Medidor de Vazão de Gases.....	60
3.1.9	Sistema de Oscilação da Tocha.....	60
3.2	MATERIAIS	62
3.2.1	Corpos de Prova	62
3.2.2	Gases de Processo	66
3.3	MÉTODOS.....	66
3.3.1	Aferição do Manipulador.....	66
3.3.2	Aferição da Distância Eletrodo Peça (DEP).....	68
3.3.3	Eletrodo	68
3.3.4	Aferição da Frequência do Módulo de Controle	69
3.3.5	Aferição da Amplitude no Módulo de Oscilação	72
3.3.6	Ensaio de medição de tensão na junta de aresta e sobre a placa de cobre.....	73
3.3.7	Metodologia para Análise do Perfil de Penetração Longitudinal	80
3.3.8	Metodologia de Filmagem da Poça de Fusão em Alta Velocidade	80
3.3.9	Ensaio de caracterização do <i>Switch Back</i>	81
3.3.10	Metodologia de soldagem das juntas de aresta	85
3.3.11	Metodologia de soldagem das juntas de topo.....	90
4	DESENVOLVIMENTOS REALIZADOS	93
4.1	EQUACIONAMENTO DA SOBREPOSIÇÃO.....	93
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE OSCILAÇÃO.....	104
4.3	AFERIÇÃO DO SISTEMA DE OSCILAÇÃO	108
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
5.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO <i>SWITCH BACK</i>	120
5.2	COMPARAÇÃO DA SOLDAGEM REALIZADA COM A MOVIMENTAÇÃO <i>SWITCH BACK</i> ENTRE O ROBÔ ANTROPOMÓRFICO REIS RV-15 E O MANIPULADOR SPS TARTÍLOPE V2 COM O SISTEMA DE OSCILAÇÃO	145
5.3	ANÁLISE DA TENSÃO DO ARCO NA SOLDAGEM DE JUNTA DE ARESTA E SOBRE A PLACA DE COBRE.....	151
5.3.1	Análise do comportamento da poça de fusão com aplicação da técnica <i>switch back</i>	169
5.4	ENSAIOS EM JUNTA DE ARESTA.....	177
5.4.1	Soldagem em junta de aresta com <i>gap</i> de 1 mm	184
5.5	ENSAIOS EM JUNTA DE TOPO.....	202
5.5.1	Soldagem em chapa de espessura 2 mm	202
5.5.2	Soldagem em chapa de espessura 3 mm	214
5.6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO ÀS JUNTAS DE ARESTA E DE TOPO.....	222

6	CONCLUSÕES	227
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	231
8	REFERÊNCIAS	232

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é reconhecida como o processo de fabricação de maior relevância na indústria metal mecânica. Dentre todos os processos de soldagem a arco, sem dúvida, o processo de maior utilização pela sua capacidade de produção é o MIG/MAG. Porém, este processo apresenta as suas desvantagens: necessita de material de adição, apresenta respingos e, portanto necessita de retrabalho no acabamento das peças, necessita de limpeza de bocais e peças e, gera uma quantidade maior de fumos metálicos. A literatura também apresenta o processo MIG/MAG como de maior produtividade quando comparado ao processo TIG.

Entretanto, estudos desenvolvidos no LABSOLDA – UFSC concluem que existem aspectos a considerar em razão do processo TIG ser fortemente dependente da arquitetura de suas variáveis. Nesse contexto, pode ser citada a limpeza das peças, composição dos gases de processo, ângulo de ataque da tocha em relação à peça, distância eletrodo peça e, dopagem do eletrodo de tungstênio são alguns detalhes importantes a serem observados. Como agravante, a incidência da descontinuidade conhecida como *humping* em aplicações de alta velocidade de soldagem é uma fator altamente limitante, sendo esta a sua maior problemática.

O LABSOLDA – UFSC obteve êxito na produção de uma tese e uma dissertação [1], [2]. O primeiro apresentou uma configuração especial de tocha TIG e utilizava dois eletrodos com potencial elétrico isolado. Já o segundo, baseou-se em movimentos oscilatórios de avanço e recuo (*switch back*) da tocha ao longo da trajetória de soldagem como uma estratégia para suprimir a formação de *humping*. Ambos os trabalhos mostraram que as técnicas têm potencial para aumento de produtividade, porém neste último trabalho, o seu potencial foi explorado parcialmente porque a técnica de *switch back* somente foi possível de ser executada em baixas dinâmicas.

Em linhas gerais, este trabalho busca aumentar a produtividade do processo TIG, utilizando-o de maneira autógena, associado à técnica *switch back* em elevada dinâmica, na tentativa de demonstrar que o processo TIG tem capacidade para equiparar o desempenho do processo MIG/MAG em aplicações industriais de elevada produtividade, de forma limpa e sustentável e com menor impacto ao meio ambiente e a saúde dos colaboradores. Esta variante consiste em empregar uma movimentação longitudinal da tocha em relação ao cordão de solda. Embora promissora esta técnica ainda não obteve um nível de desenvolvimento a ponto de ser amplamente utilizada e, também não apresenta uma quantidade expressiva de trabalhos na literatura. Tornando-se esta a principal motivação para a realização deste trabalho.

De acordo com Ietka [3], mundialmente são comercializados 120.000.000 compressores e, cada unidade absorve aproximadamente 50 gramas de material de adição para a soldagem pelo processo MIG/MAG, o que resulta em 6.000 toneladas de aço trefilado em forma de arame. Este fato abre portas para o desenvolvimento do processo TIG autógeno, onde não se faz necessário material de adição para soldagem, corroborando também, quanto à preocupação da indústria relativa às oscilações de preço no mercado do aço.

Outro aspecto a ser considerado são os agentes que causam dano à saúde do trabalhador [4]. Os riscos a que um soldador está exposto são: ruído, calor, vibração, luminosidade infravermelha, radiação eletromagnética e gases tóxicos, porém, os efeitos mais nocivos à saúde humana são os causados por vapores ou fumos metálicos.

Há ainda outra razão para se realizar estudos na tentativa de substituir o processo MIG/MAG pelo TIG, os impactos ambientais da emissão de fumos, que garante o aumento da sustentabilidade [5]. Os fatores ambientais ganharam importância na avaliação da estratégia de marketing, pois as alterações da legislação ambiental e a crescente conscientização dos consumidores têm feito surgir novas oportunidades de comercialização de bens e serviços, que devem ser adequadamente avaliadas para garantir a competitividade da empresa e preservar sua imagem e responsabilidade social.

Além, do ponto de vista técnico, o *switch back* permite a manipulação da poça de fusão, alterando suas características geométricas, de transferência de calor, massa e solidificação, resultando em um comportamento mais robusto a altas velocidades. A viabilização da técnica, portanto, depende de um sistema tecnológico que permita esta parametrização específica, com rigidez, robustez, e dotado das possibilidades de regulagem, controle e sincronização entre os parâmetros. Ambos os desafios (viabilização da tecnologia e parametrização) são bases fundamentais para a justificativa do trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Construir de bases científicas e tecnológicas para o desenvolvimento da técnica *switch back* aplicada ao processo TIG autógeno em frequências acima de 3 Hz, estudando as influências das variáveis que compõe esta técnica, a fim de obter uma melhor produtividade, com menor custo, de maneira limpa e sustentável, em detrimento do que é obtido com o processo MIG/MAG.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Desenvolver e avaliar um dispositivo que possibilite trabalhar com frequências acima de 3 Hz;
- b) Estudar os efeitos produzidos pelos parâmetros de amplitude e frequência do *switch back* sobre a geometria do cordão de solda realizado sobre chapas na posição plana;
- c) Analisar a influência dos parâmetros de frequência, amplitude e velocidade de soldagem usando equações para descrever a movimentação oscilatória longitudinal da tocha;
- d) Caracterizar o comportamento da poça de fusão nas diferentes configurações de movimentação oscilatória longitudinal da tocha e comparar os resultados com o modo convencional;
- e) Obter um cordão de solda em junta de aresta com velocidade igual ou superior a 2 m/min de velocidade de soldagem utilizando a movimentação oscilatória longitudinal da tocha;
- f) Comparar os resultados que serão alcançados com a técnica *switch back* com resultados obtidos no modo convencional, a fim de comprovar ou não a sua viabilidade no que se refere ao aumento da velocidade de soldagem e produção de juntas com menores índices de defeito.

2 ANTECEDENTES E ESTADO DA ARTE

2.1 PROBLEMÁTICAS DO PROCESSO TIG AUTÓGENO DE ELEVADA PRODUTIVIDADE

A experimentação em soldagem mostra que, muitas vezes informações tidas como verdades absolutas são consolidadas em publicações de amplo alcance ou mesmo transmitidas pelos tradicionalismos de chão de fábrica [7]. Por exemplo: é comum encontrar em livros de ensino da soldagem o entendimento de que o processo MIG/MAG apresenta maior produtividade em relação ao processo TIG [8]. Neste contexto, pesquisas realizadas no LABSOLDA/UFSC mostraram resultados que contrariam tais literaturas como serão visto a seguir.

Com base nestas observações, deram-se início no LABSOLDA o desenvolvimento de procedimentos de soldagem que apresentam menor impacto ambiental e cujos trabalhos visam efetiva aplicação industrial. Uma dessas aplicações foi para a soldagem de compressores herméticos de refrigeração [3]. Este trabalho propôs a realização da soldagem de selamento (corpo e tampa) de compressores herméticos de refrigeração com o processo TIG autógeno (sem utilização de material de adição), em substituição ao processo MIG/MAG atualmente utilizado. Do ponto de vista econômico, as vantagens do processo TIG são: não necessitar de material de adição, ser um processo com ausência de respingos evitando retrabalhos, não produzir fuligem que afetam componentes eletrônicos de equipamentos e, não possuir a necessidade de limpeza de bocais e tochas por parte do operador. Já do ponto de vista técnico as vantagens apresentadas são: menor quantidade de calor aportado ao metal de base diminuindo as deformações plásticas, excelente acabamento do cordão de solda tanto superficial quanto da face traseira do passe de raiz em tubulações, melhor controle da poça de fusão, uma vez que, quando realizado manualmente é possível separar a alimentação do arco voltaico ou ainda depositar mais material onde é necessário, este processo apresenta baixo índice de fumos metálicos o que melhora a saúde respiratória do soldador, possui baixa sensibilidade à corrosão intergranular e tem capacidade de emprego em chapas finas de diversas ligas sem incorrer em perfurações na junta.

Por outro lado, o processo também apresenta suas desvantagens como a baixa automatização, a necessidade de peças muito limpas para não incorrer em porosidades, maior dificuldade de proteção gasosa em lugares ao ar livre sendo, o processo sensível a perturbações e por isso demonstra menor robustez.

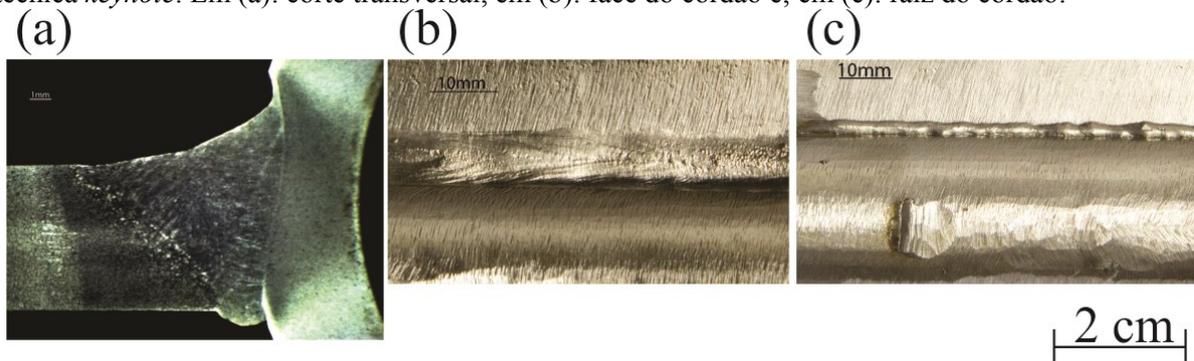
Tradicionalmente, o processo TIG é visto como de baixa produtividade em razão de sua efetiva realização manual, onde baixas correntes e velocidades de soldagem são utilizadas para tornar o processo estável e sem ocorrência de defeitos. Mesmo assim cabe fazer a ressalva que, conceituar a produtividade apenas pela velocidade de soldagem não é adequado, mas sim pela capacidade do processo repetir as soldas com o menor índice de defeitos e custo de retrabalhos possíveis. De acordo com Campos [9] a produtividade é uma relação entre o valor produzido e o valor consumido, o que resulta na taxa de valor agregado conforme mostrado a equação 2.1:

$$Produtividade = \frac{Valor\ Produzido}{Valor\ Consumido} = Valor\ Agregado \quad (4.1)$$

Portanto, o objetivo lógico e fundamental da produtividade é maximizar o valor produzido e minimizar o valor consumido. Ressalta-se que o valor produzido não está apenas ligado a quantidade numérica fabricada, mas com a qualidade do produto. Esta qualidade é alcançada pelo produto quando o mesmo atende as necessidades do cliente, aos requisitos especificados em legislações governamentais e, a capacidade de que o processo de fabricação tenha alta repetibilidade com baixa incidência de defeitos.

A comprovação da tese, de que a produtividade na comparação dos processos não pode ser fundamentada apenas pela velocidade de soldagem, é abordada pelo trabalho de Olivares [10] onde foi empregada a técnica *keyhole*. Esta técnica é muito empregada em processos TIG, plasma e LASER, sendo obtida pela alta pressão exercida pelo arco sobre a poça metálica, produzindo um furo passante pelo metal líquido que é fechado à medida que a tocha avança ao longo da solda. Este trabalho aborda a aplicação da técnica *keyhole* para soldagem de paredes de caldeira, onde foi possível realizar uma solda de 0,5 m/min em uma chapa de 6,35 mm de espessura, sem necessidade de chanfro em V e com pouca necessidade de material de adição. Fica claro que no caso da técnica *keyhole* o objetivo não é aumentar a produtividade pelo aumento da velocidade de soldagem, mas pelo fato de poder preencher chanfros em um único passe, uma vez que o TIG trabalhado em faixas de correntes convencionais (100 – 350 A) precisa de várias passadas para poder completar uma junta. A Figura 2.1 ilustra o resultado da solda obtida por OLIVARES em uma união de tubo membrana pelo processo TIG com aplicação da técnica *keyhole*.

Figura 2.1 - União de tubos membrana de paredes de caldeira pelo processo TIG com emprego da técnica *keyhole*. Em (a): corte transversal, em (b): face do cordão e; em (c): raiz do cordão.



Fonte: referência [10].

Outro aspecto que faz com que a literatura considere o processo TIG de baixa produtividade é a maneira incorreta como ele é comparado ao processo MIG/MAG. Muitas vezes a comparação é feita apenas sob o ponto de vista da corrente elétrica, esquecendo-se que a forma mais adequada é através da potência, (isso quando se considera a mesma velocidade de soldagem) ou ainda através da energia de soldagem (quando as velocidades de soldagem no comparativo são diferentes).

No entanto, o principal fator que restringe a automatização do processo TIG é que ao se tentar elevar a velocidade de soldagem acima de um determinado patamar ocorre o aparecimento de discontinuidades que reprovam a qualidade do cordão de solda, tornando-o completamente inutilizado. A esta discontinuidade encontrada comumente no processo TIG denomina-se *humping* [11]. A discontinuidade de *humping* é costumeiramente composta de regiões de crateras e protuberâncias, de maneira alternada, com morfologia semelhante ao mostrado na Figura 2.2. Esse fato ocorre quando se utilizam correntes e velocidades de soldagem elevadas juntamente, sendo este o principal defeito que restringe o incremento da aplicação do processo TIG de alta produção, uma vez que limita o uso de altas velocidades de soldagem [11], [12]. O defeito de *humping* é o problema que tentará ser resolvido com a aplicação da oscilação longitudinal da tocha de soldagem.

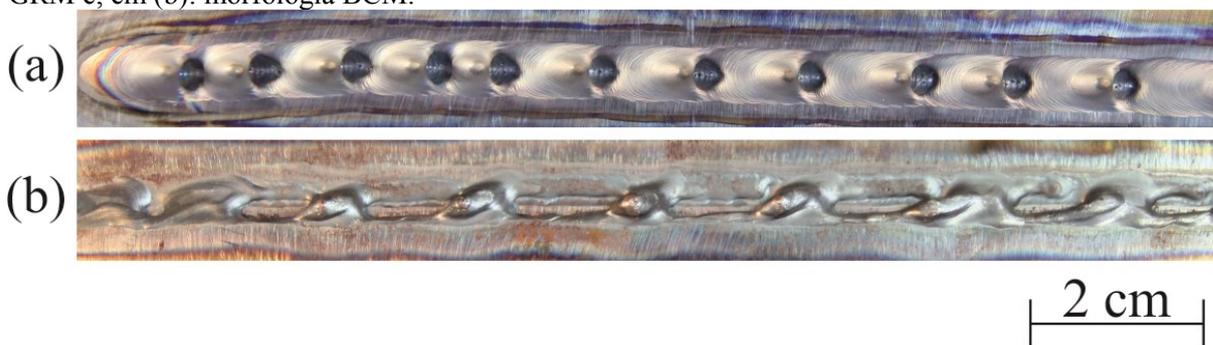
Figura 2.2 - Soldagem TIG autógena no modo convencional mostrando a formação do defeito de *humping*. $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 250$ A, $A_e = 40^\circ$, Truncamento = 2 mm, gás Ar, $V_g = 15$ l/min.



Fonte: o próprio autor (2019).

O defeito de *humping* apresenta duas morfologias [11]. A primeira é representada pela sigla GRM (*gouging region morphology*) (Figura 2.2 (a)) e, está relacionada à formação do defeito composto por crateras e protuberâncias (ondulações) alternadamente ao longo do cordão de solda [11]. Neste tipo de morfologia também podem ocorrer a formação de canais embaixo das protuberâncias, que são chamadas de porosidades de túnel, ou simplesmente na literatura internacional como *tunneling*. Já a segunda morfologia tem sigla BCM (*beaded cylinder morphology*) (Figura 2.2 (b)) e é caracterizado pela formação de ondulações contínuas acima da linha da peça, não sendo observado nesses casos a formação de crateras e *tunneling* [11]. A Figura 2.3 mostra cordões de solda com defeitos do tipo GRM e BCM, que são encontrados, principalmente, em processo de soldagem TIG.

Figura 2.3 - Imagem representativa ilustrando as duas morfologias de *Humping*. Em (a): morfologia GRM e, em (b): morfologia BCM.



Fonte: o próprio autor (2019).

Segundo Mendez [12], o que determina o surgimento de uma cratera com consequente aparecimento de *humping* é o resultado de um complexo balanço entre as forças que agem sobre a poça de fusão, sendo aquelas que o autor considera mais importantes: pressão do arco (P_a): pressão produzida pelo plasma contra a superfície da poça metálica, pressão hidrostática (P_h): originada devido a coluna de metal líquido fundido; forças capilares (P_c): surge devido ao ângulo de curvatura do metal líquido com o metal de base, dependente também da tensão superficial.

De acordo com a combinação de variáveis de soldagem, principalmente corrente e velocidade de deslocamento da tocha, poderão existir diferentes condições de equilíbrios entre essas forças. Para situações de correntes mais baixas, existe a tendência de que as forças (P_h) e (P_c) sejam maiores do que (P_a) e não ocorra o aparecimento da cratera. À medida que a corrente de soldagem aumenta, a (P_a) começa a se tornar maior que do que a soma das outras forças, nesse caso inicia-se a formação de uma cratera na poça de fusão, com grande potencial de *humping*.

A interface entre o fundo da cratera e a poça de metal líquido é chamada ponto de transição. Com o incremento da velocidade de soldagem, toda a poça de fusão tende a ter uma maior extensão, afastando o ponto de transição e o centro do arco. O *humping* irá ocorrer quando a combinação de parâmetros colocarem a região de transição em uma posição onde o calor do arco não é mais suficiente para manter o metal líquido.

Já para Savage [13], as diferenças de temperaturas existentes entre a região da frente e de trás da poça de fusão modificam a tensão superficial, de modo que, o metal fundido flua para a parte posterior da poça de fusão, constituindo assim uma das formas pelas quais o *humping* é formado. Igualmente a Mendez [12], Savage [13] também considera o balanço de forças sobre a poça de fusão, para ele, a força do arco é composta pelas forças eletromagnética (oriunda da corrente), a força do jato de plasma e a força do impacto dos elétrons (devido o efeito de emissão termiônico). Porém, o autor afirma que a força mais relevante é a de arraste do jato de plasma. A velocidade do jato de plasma está diretamente relacionada a densidade de corrente, que é influenciada pela composição do gás de processo e da condição superficial da ponta do eletrodo [14].

Resumidamente, o *humping* é um defeito que aparece onde são empregadas altas velocidades de soldagem, comprometendo a integridade mecânica da junta e limitando as taxas de produção. Para se obter ganhos expressivos de produtividade o *humping* deve ser eliminado ou suprimido, requerendo portanto, uma compreensão maior dos fenômenos físicos responsáveis pela formação desse defeito.

2.2 MOVIMENTO DE OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA E SOLDAGEM TIG DE ALTA FREQUÊNCIA

2.2.1 Conceitos da Técnica *Switch Back*

Para o presente trabalho é relevante definir em termos semânticos o que é a técnica *switch back*, para isso foram utilizadas algumas definições encontradas em artigos técnicos.

Para Almeida et al [5], a tocha é conduzida por um robô e sua oscilação acontece na direção longitudinal do cordão de solda. A tocha realiza várias reversões no sentido contrário ao da soldagem, deslocando para frente (avanço) em um determinado instante e, para traz (reversão) no instante subsequente, sendo que a reversão apresenta comprimento (amplitude),

cerca da metade do avanço. Estes dois movimentos da tocha se repetem durante a soldagem e podem ser realizados com velocidades iguais ou diferentes.

Já Yamane et al [6], afirma que o método de soldagem com a técnica *switch back* consiste não apenas em um movimento oscilante, mas movido roboticamente para frente e para traz, onde a frequência é a mesma para cada ciclo. E que, neste sistema uma frequência máxima acima de 3 Hz não é recomendada para um robô convencional, porém, discorda-se do autor no aspecto de que o movimento não precisa necessariamente ser deslocado por um robô, podendo ser feito por um sistema de oscilação independente. Além disso, dependendo da possibilidade de se interferir nos parâmetros durante a realização da soldagem, as frequências para diferentes ciclos podem ser alteradas.

Segundo Yamane et al [7], o método de movimentar a tocha de soldagem para frente e para traz é denominado de *switch back*. Primeiramente, a tocha move-se para frente uma distância de 12 mm, depois a tocha move-se para traz 6 mm. O movimento se repete e, neste exemplo a distância deslocada pela tocha é de 6 mm e, o cordão formado apresenta uma aparência de um colar de contas. Dependendo do processo de soldagem utilizado, o cordão pode ter a aparência de um colar de contas ou escamas.

Por outro lado, JIN et al [8] define o método *switch back* apenas como um movimento repetitivo que muda a direção da tocha de soldagem. Aqui há um erro de semântica física, pois a mudança não se dá na direção, mas no sentido da tocha, permanecendo a direção sempre a mesma.

E por fim, Pires [20], define que o *switch back* é uma oscilação que ocorre paralela ao eixo da trajetória da tocha. Discorda-se aqui do autor quanto ao paralelismo, pois não se verifica uma obrigatoriedade quando a isto.

Embora expliquem o conceito do *switch back*, as afirmações não são totalmente completas. Este trabalho não tem a pretensão de fornecer uma definição absoluta e incontestável sobre o que é o *switch back*, mas trazer pelo menos à tona a discussão semântica do termo e apresentar um conceito mais adequado ao mesmo.

Para este trabalho a definição mais adequada para o *switch back* é a seguinte: o *switch back* é uma técnica de oscilação da tocha no sentido longitudinal ao cordão de solda, paralela a este ou não, onde indispensavelmente deve haver uma sobreposição de trajetória, a qual é composta por uma velocidade e um deslocamento de avanço, sendo igualmente os mesmos para reversão da tocha. Estes movimentos podem apresentar velocidades, frequências e deslocamentos diferentes entre si e, o movimento de oscilação pode igualmente ser iniciado

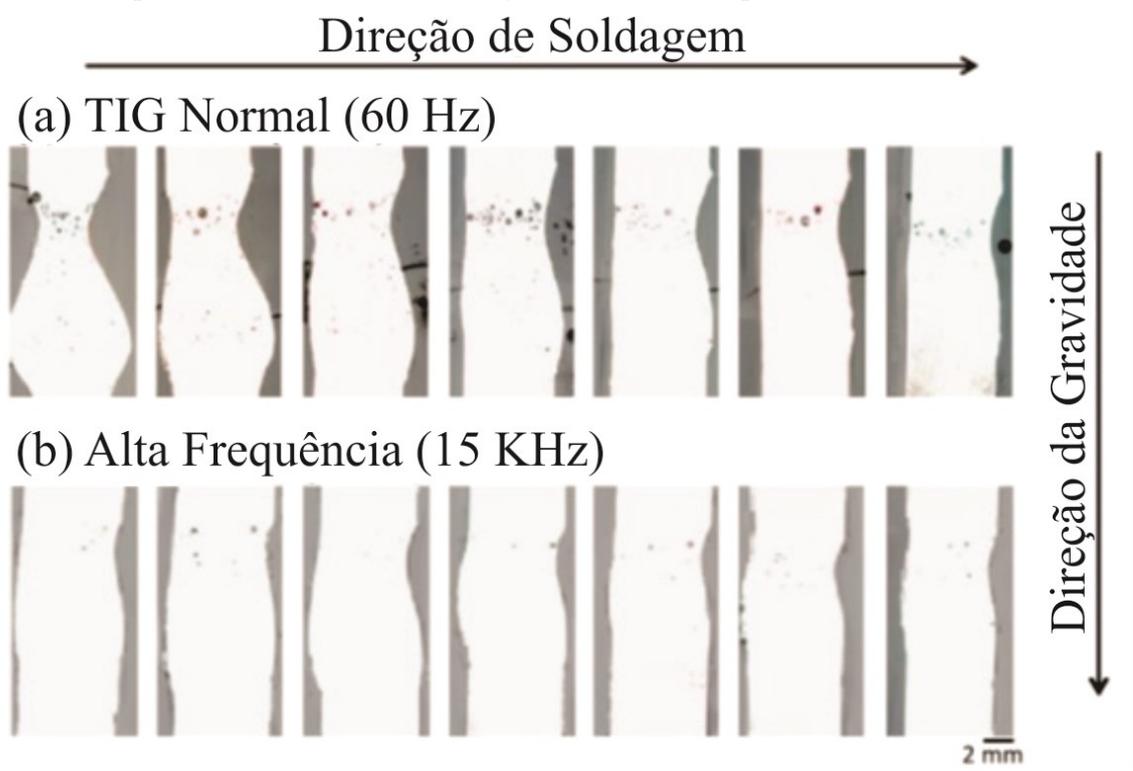
pelo avanço ou pela reversão, podendo ser executados por um robô ou um sistema de oscilação independente deste e, a característica do colar de contas pode ou não ocorrer.

2.2.2 Aplicações da Técnica *Switch Back* e Soldagem de Alta Frequência

Foram encontradas nas bases de dados consultadas publicações que visam mostrar o emprego da técnica *switch back*. Este subitem aborda alguns desses trabalhos e os resultados alcançados para a finalidade a qual se destinavam. Encontrou-se apenas uma publicação da referida técnica ao processo TIG autógeno, não sendo encontradas aplicações na versão alimentada. Dessa forma, a totalidade dos trabalhos onde a técnica *switch back* aparece empregada é para o processo MIG/MAG. Portanto, os resultados obtidos por esses trabalhos servirão de base científica para o embasamento, por analogia, com o processo TIG autógeno. Além, dos trabalhos abordados com relação ao *switch back*, também serão abordados trabalhos que enfatizam bons resultados conseguidos com soldagem de alta frequência, uma vez que o presente trabalho irá utilizar-se da mesma conjuntamente ao movimento de oscilação da tocha. Este trabalho considera alta frequência aquelas obtidas acima de 3 Hz, porquê esse é o limite de oscilação para os robôs produzidos industrialmente.

Iniciando-se pelos artigos de soldagem em alta frequência, o trabalho de Morisada et al [21], desenvolveram uma nova versão do processo TIG com alta frequência, criada para reduzir as porosidades na soldagem de chapas de alumínio A1050. A alta frequência (acima de 10 KHz) foi produzida pela corrente alternada do arco, tornando-se uma onda ultrassônica. Os resultados foram comparados com o TIG convencional que possui frequência do arco de 60 Hz. É facilmente observado que há uma redução significativa no número de bolhas na soldagem TIG de alta frequência, quando comparada com a soldagem TIG normal Figura 2.4.

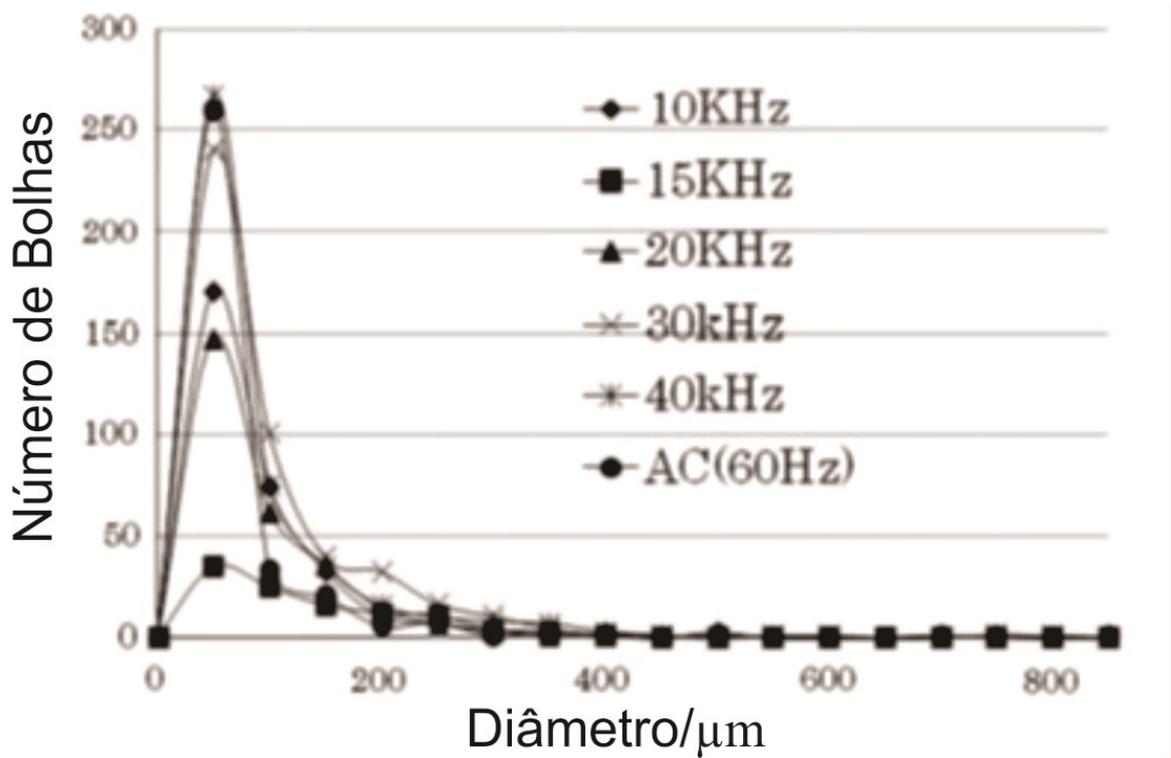
Figura 2.4 - Distribuição das bolhas na seção transversal dos corpos de prova. Em (a) soldagem TIG normal com frequência de 60 Hz, em (b): soldagem TIG de alta frequência (15 KHz).



Fonte: referência [21].

Com efeito, os autores deste trabalho também perceberam que a resistência a tração do cordão aumenta em 20 Mpa quando utilizada a alta frequência em relação a soldagem TIG normal. Assim como também concluíram que quanto maior o valor da alta frequência menor é a quantidade, distribuição e diâmetros das bolhas, portanto, menores riscos de ocorrer porosidades na solda Figura 2.5.

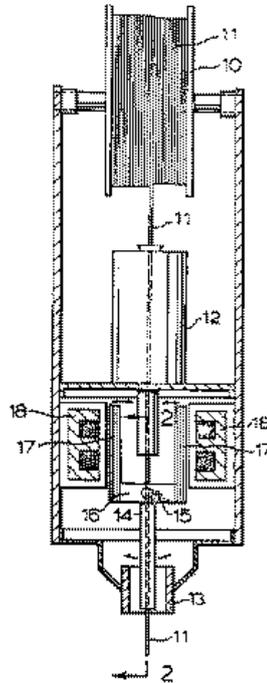
Figura 2.5 - Efeito da frequência no diâmetros, quantidade e distribuição das bolhas no cordão de solda.



Fonte: referência [21].

O primeiro trabalho que se tem registro histórico com relação ao *switch back* é o de Roen et al [22], eles desenvolveram um dispositivo para oscilação do arame-eletrodo em processos a arco (Figura 2.6) (*Arc welding apparatus with oscillating electrode* – US 4295031). Neste caso, a invenção foi confeccionada para o processo MIG/MAG, onde o próprio arame-eletrodo oscila longitudinalmente ou transversalmente através de um eletroímã montado dentro da tocha. Os autores recomendam que o tecimento seja realizado em frequências não menores que 6 Hz, para conseguir criar vibrações e impactos sobre o arame eletrodo capazes de destacar a gota de metal fundido e, direcioná-la para as laterais do cordão. Além disso, uma oscilação com alta frequência permite o controle térmico da poça de fusão, principalmente no centro da junta, impedindo a ocorrência de perfurações.

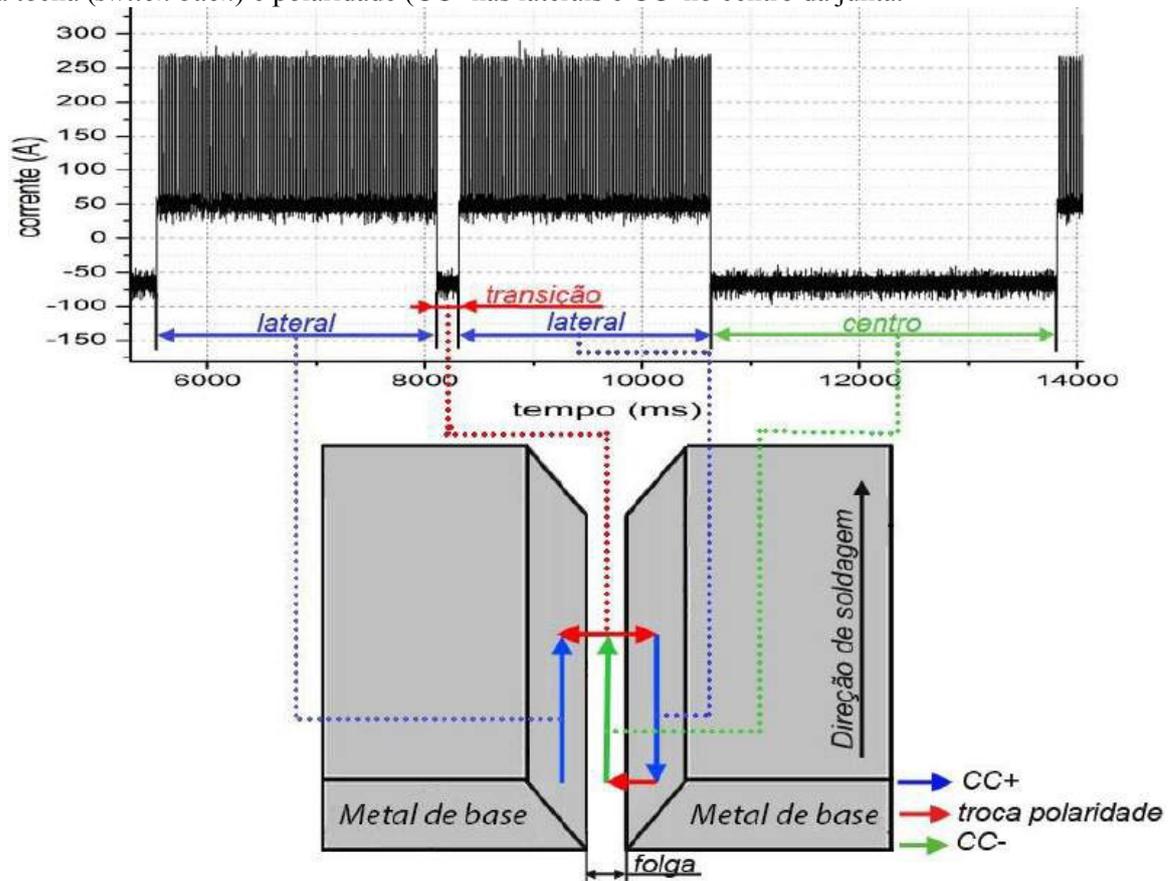
Figura 2.6 - Seção transversal da tocha com seus elementos principais da patente US – 4295031 (A), onde (2) representa o sentido do tecimento transversal linear, (10) o carretel de arame eletrodo, (11) arame-eletrodo, (12) alimentador de arame por motor elétrico, (13) bico de contato, (14) tubo condutor de eletricidade para guiar o arame, (15) pinos de articulação pendular do tubo guia, (16, 17 e 18) composição do eletroímã.



Fonte: referência [22].

O trabalho de Skhabovskiy [23] objetivou controlar a poça de fusão pela distribuição de calor ao longo da junta, fazendo com que mais calor fosse aportado nas laterais e menos calor e/ou pressão de arco no centro da mesma, assim como menor quantidade de gotas transferidas nessa mesma região, evitando assim perfurações da junta. Segundo o autor, isso foi possível pelo sincronismo entre a oscilação da tocha com a modulação da corrente na fonte de soldagem (Figura 2.7).

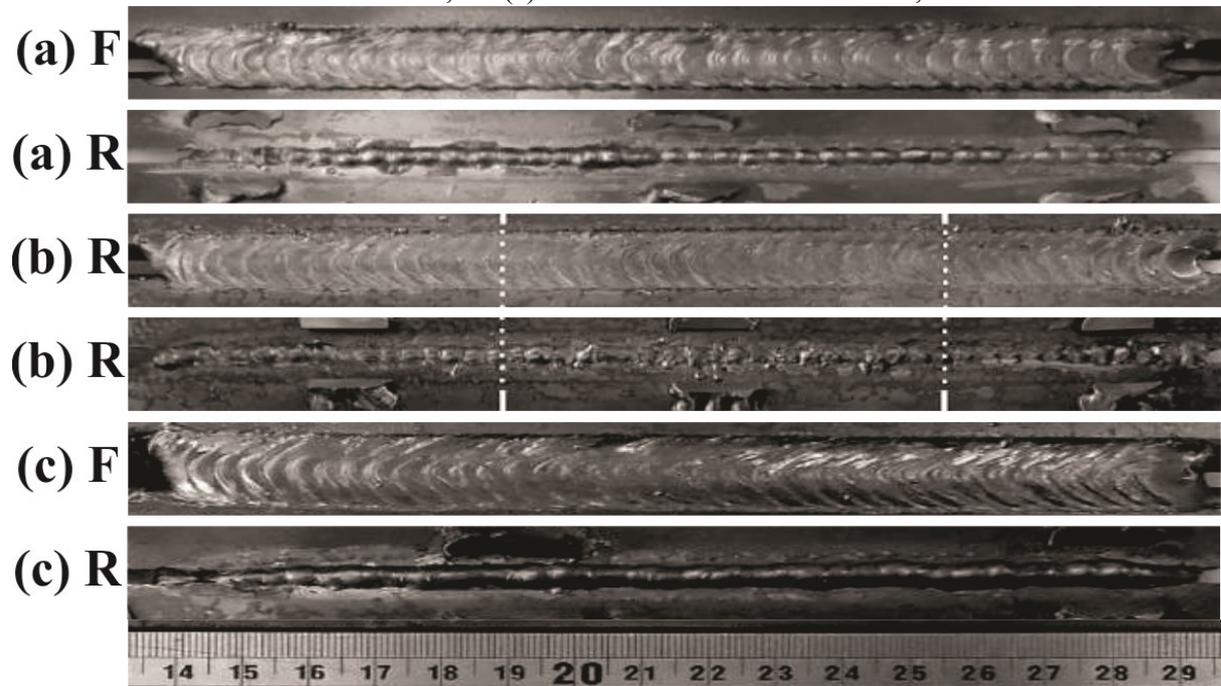
Figura 2.7 - Esquema da sincronização do processo MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha (*switch back*) e polaridade (CC⁺ nas laterais e CC⁻ no centro da junta).



Fonte: referência [23].

O autor estudou a influência da sobreposição realizada pelo incremento da amplitude. Analisando os cordões obtidos para valores de sobreposição de 33% (Figura 2.8 (a)), 40% (Figura 2.8 (b)) e 47% (Figura 2.8 (c)), o mesmo concluiu que a sobreposição tem grande influência na formação do cordão de solda. Segundo o autor à medida que a sobreposição foi sendo incrementada, o reforço da raiz teve aumento, assim como a falta de fusão também foi sendo melhorada.

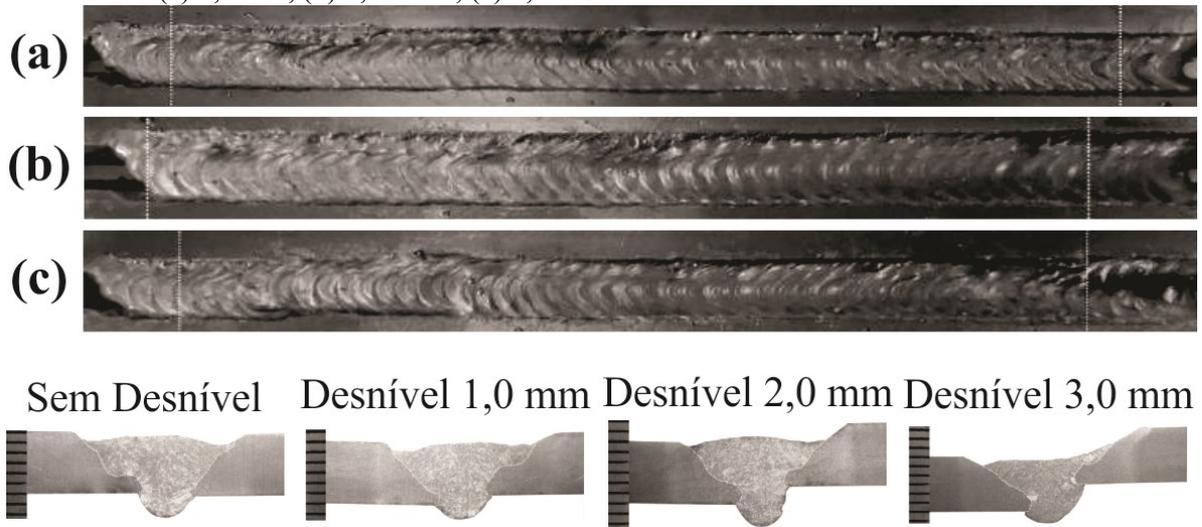
Figura 2.8 - Imagens das faces e raízes dos cordões de solda obtidos com a aplicação de *switch back*, com deslocamento de avanço de 7,5 mm. Em (a): deslocamento de reversão de 2,5 mm, em (b): deslocamento de reversão de 3 mm e, em (c): deslocamento de reversão de 3,5 mm.



Fonte: adaptado da referência [23].

Outra parte importante deste trabalho foi o estudo da aplicação da técnica *switch back* em juntas desalinhadas e desniveladas (*high-low*). Os desníveis testados foram de 1,0 mm, 2,0 mm e 3,0 mm Figura 2.9. Nessa situação, o autor concluiu que mesmo que a aparência superficial dos cordões não apresentou boa uniformidade por causa dos desníveis a técnica *switch back* tem potencial para soldar juntas desniveladas até 3,0 mm com boa repetibilidade.

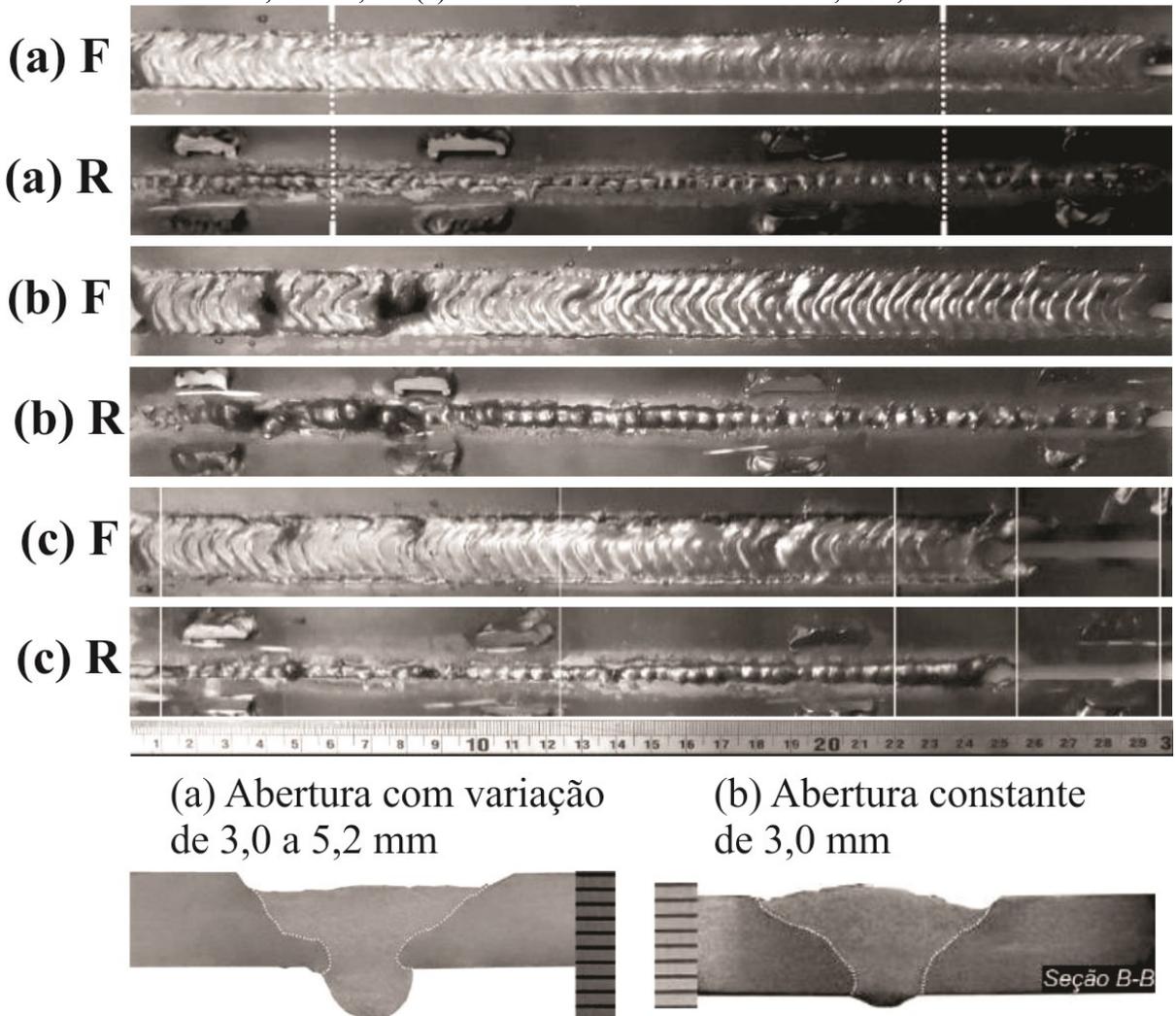
Figura 2.9 - Cordões de solda realizados com a aplicação de *switch back* para diferentes desníveis. Os desníveis são (a) 1,0 mm, (b) 2,0 mm e; (c) 3,0 mm.



Fonte: adaptado da referência [23].

Já para os testes realizados para averiguar o comportamento do *switch back* em juntas desalinhadas variou-se de 3,0 a 5,2 mm de uma extremidade a outra do corpo de prova, além desse foram feitos ensaios com abertura constante de 3,0 e 4,0 mm para comparação. A Figura 2.10 mostra os resultados da superfície e raiz dos cordões de solda juntamente com as macrografia das seções transversais. Quanto a estes ensaios o autor concluiu que a abertura constante de 3,0 e 4,0 mm apresentou melhor conformidade de acabamento superficial e regularidade da raiz da solda.

Figura 2.10 - Imagens da superfície e raiz dos cordões de solda obtidos com a aplicação da técnica *switch back* para estudo do desalinhamento da junta. Em (a): abertura constante de 3,0 mm, em (b): abertura constante de 4,0 mm e; em (c): desalinhamento da abertura de 3,0 a 5,2 mm.



Fonte: adaptado da referência [23].

Wizenmann [10] realizou uma soldagem pelo processo TIG autógeno convencional e, posteriormente, comparou com outra soldagem nas mesmas condições empregando a técnica *switch back*. A Figura 2.11 mostra que a soldagem convencional apresentou o defeito de *humping*. Já a Figura 2.12 mostra que o aumento da sobreposição de 50% para 75% eliminou o defeito de *humping*.

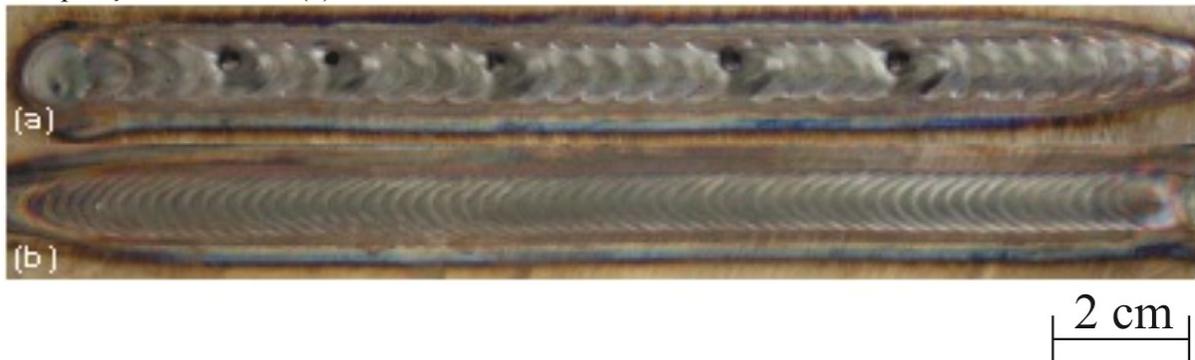
Figura 2.11 - Soldagem TIG autógena convencional mostrando a formação do defeito de *humping*.



2 cm

Fonte: referência [10].

Figura 2.12 - Cordão de solda obtido com sobreposição de 50% em (a) e, cordão de solda obtido com sobreposição de 75% em (b).



Fonte: referência [10].

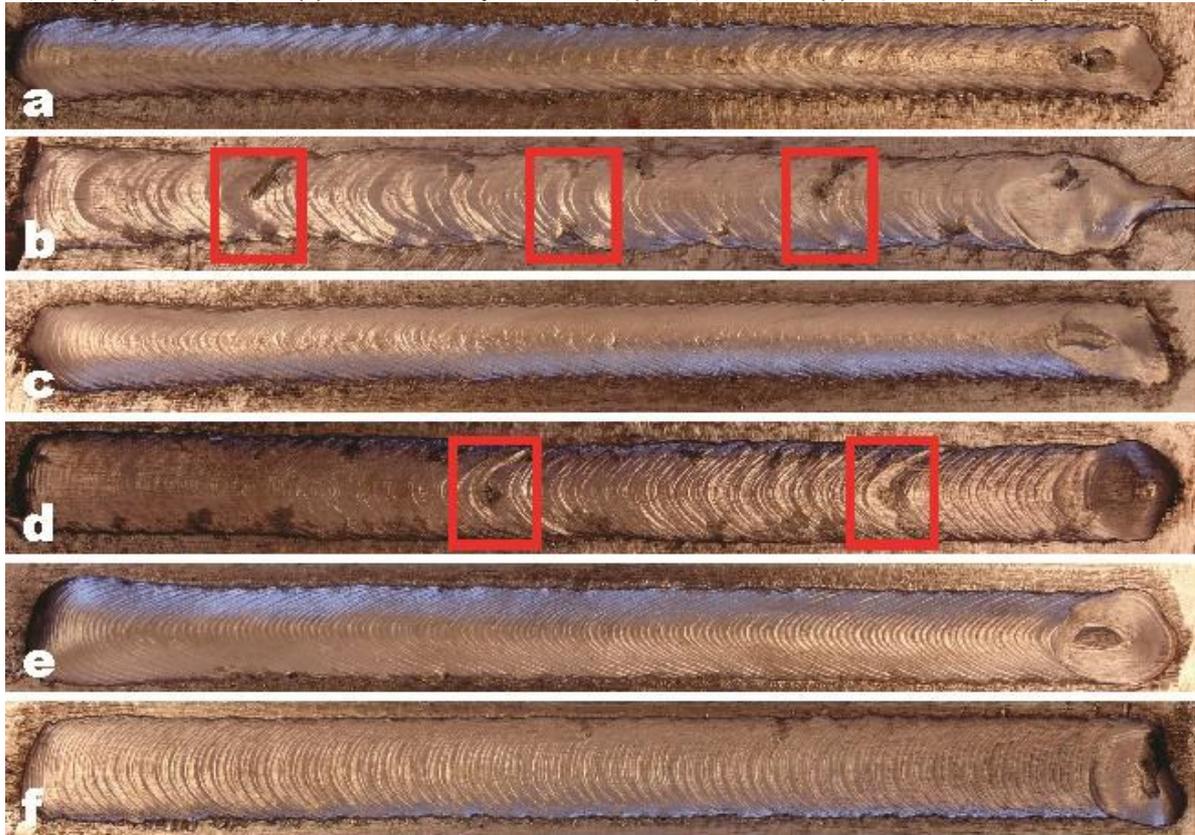
Com relação à análise dos parâmetros geométricos do cordão obtidos por macrografias, o autor encontrou uma diminuição de penetração quando aplicado o *switch back* em corrente contínua constante, quando comparado ao modo convencional.

O trabalho de Carvalho [24], aplicou movimentos de oscilação de tocha (tecimento puro) em alta frequência com o intuito de diminuir o tempo total das operações de revestimento em paredes d'água de caldeiras. Por intermédio da realização de cordões mais largos com o auxílio do tecimento (transversal) reduz-se o número de cordões de solda para o revestimento. A aplicação de uma alta frequência na oscilação da tocha controla a poça de fusão e torna mais suave o ciclo térmico de soldagem e; o aumento na área contribui positivamente com a distribuição do calor, resultando em menor penetração, diluição e reforço; características essas desejáveis para um processo de revestimento.

Os ensaios realizados por Carvalho [24], mostram que com o aumento da frequência de oscilação da tocha se reduz a incidência de mordedura nos cordões, proporcionando maior qualidade e uniformidade na soldagem (Figura 2.13 (a), (c), (e)). Percebeu também que cordões soldados na posição vertical com as mesmas frequências da posição plana (a saber, 1,5; 2,5 e 3,5 Hz) apresentaram mudanças quanto à geometria do cordão, principalmente, quanto ao escorrimento da poça de fusão, sendo cada vez menor conforme era incrementada a variável da frequência (Figura 2.14 (b), (d), (f)).

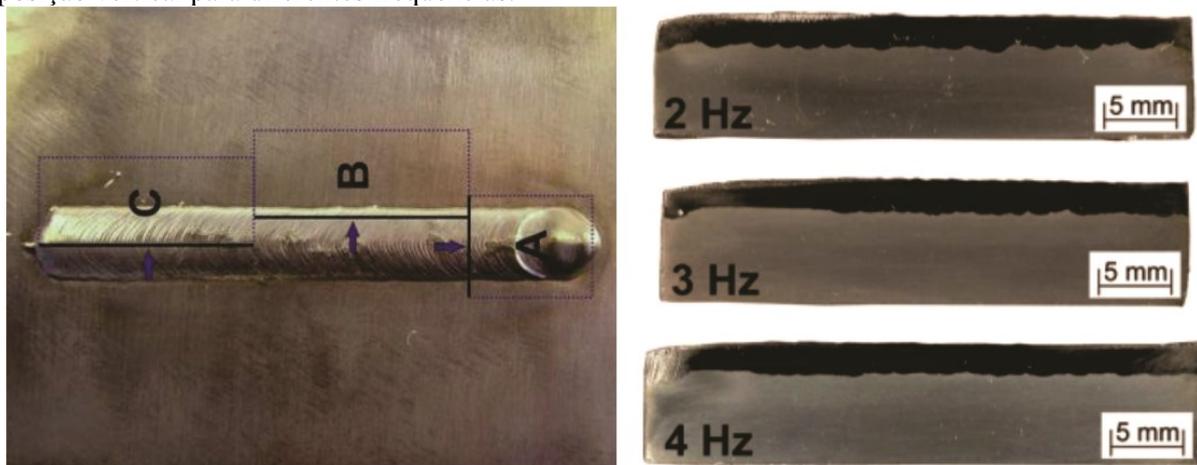
Ademais, quando considera as macrografias das seções longitudinais, nota-se que quanto maior a frequência de oscilação da tocha, maior é a uniformidade do metal depositado.

Figura 2.13 - Superfície dos cordões de solda na posição plana e vertical. Posição plana, em (a): 1,5 Hz, em (c): 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical, (b): 1,5 Hz, em (d): 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz.



Fonte: referência [24].

Figura 2.14 - Imagem das macrografias longitudinais da região B (à direita). Soldas realizadas na posição vertical para diferentes frequências.



Fonte: adaptado de [24].

O trabalho desenvolvido por Dutra et al [25], aplicaram a técnica *switch back* para solucionar problemas que ocorriam na fabricação de rodas de tratores agrícolas, como mostra a Figura 2.15.

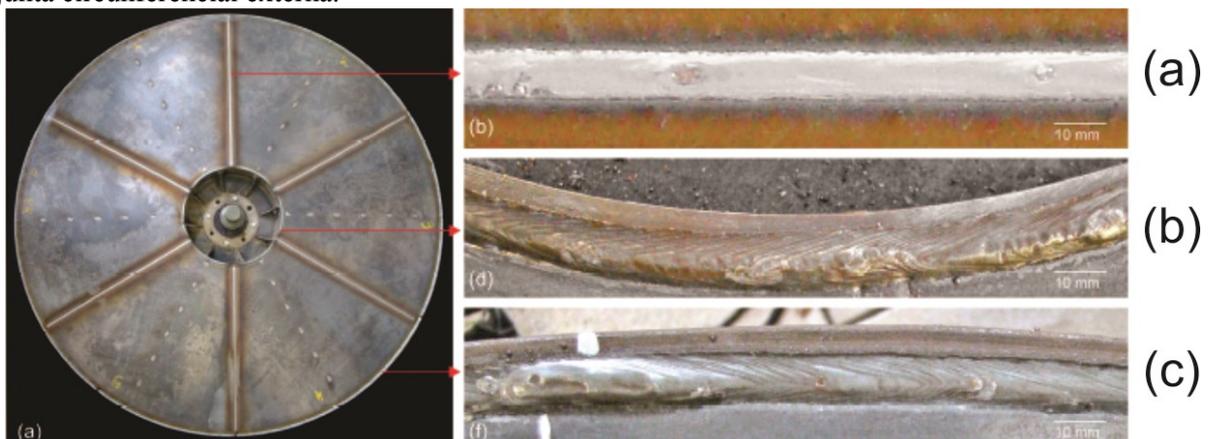
Figura 2.15 - União dos componentes da roda de aço dos tratores pelo processo de soldagem MIG/MAG.



Fonte: referência [25].

Com a aplicação da técnica *switch back* os autores afirmam terem conseguido uma redução de 28,2% no tempo total de soldagem e, um ganho de 100% de produtividade no que diz respeito ao número de peças fabricadas sem retrabalhos, quando comparado ao processo manual de soldagem. A Figura 2.16 mostra os resultados obtidos por Dutra et al com a aplicação da técnica *switch back* nas rodas de tratores.

Figura 2.16 - Imagens das soldas produzidas com a aplicação da técnica *switch back* juntamente com a sincronização da corrente pulsada. Em (a): junta radial, em (b): junta circunferencial interna e; em (c): junta circunferencial externa.



Fonte: adaptado da referência [25].

Machado [26] et al e, Bonacorso et al [65] realizaram soldagem de união de chapas de espessuras dissimilares utilizando o processo MIG/MAG. O objetivo do trabalho foi conseguir um incremento de produção com alta qualidade utilizando o *switch back* em comparação ao movimento convencional, na soldagem de chapas em ângulo em junta tipo

“T”. Nessa aplicação obtiveram um incremento de produtividade pelo aumento da velocidade de soldagem em 5% aplicando a técnica *switch back*, além disso, observaram a redução de mordeduras com a aplicação da referida técnica. A Figura 2.17 ilustra o aspecto visual dos cordões com a soldagem convencional e empregando a técnica *switch back*. Outro aspecto observado foi uma redução do comprimento da penetração com o incremento da frequência de 1 Hz para 2 Hz.

Figura 2.17 - Aspecto visual dos cordões soldados. Em (a): soldagem convencional, em (b): *switch back* constante $V_a=V_r$ e; em (c): *switch back* $V_a = 4*V_r$.



Fonte: adaptado da referência [26].

Almeida et al [18], realizaram um estudo qualitativo do efeito de ângulo de ataque da tocha e do comprimento de reversão sobre a estrutura de solidificação do cordão. Quando aplicada a técnica *switch back*, o estudo revelou um aumento na velocidade limite de soldagem em 60% quando utilizada em MIG/MAG pulsado na união de chapas de aço de baixo carbono com 3 mm de espessura dispostas em juntas sobrepostas. Conforme pode ser observado na Tabela 2.1, quanto menor os comprimentos de avanço e reversão adotados, o cordão apresenta melhor aspecto superficial e maior uniformidade.

Os autores também estudaram o efeito do ângulo de inclinação da tocha sobre a aplicação do *switch back*. Por intermédio da Figura 2.18 é possível notar que existe a formação de uma estrutura de grãos equiaxiais próximo à linha de fusão, mostrando um ponto bastante positivo do uso da técnica. Para a condição inversa do movimento da tocha, a formação dos grãos foi colunar, igualmente, para a soldagem convencional, sem a utilização de *switch back*.

Tabela 2.1: Aspectos dos cordões produzidos com diferentes comprimentos de reversão. Fonte: [18].

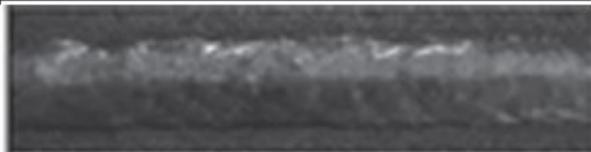
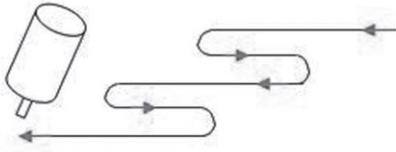
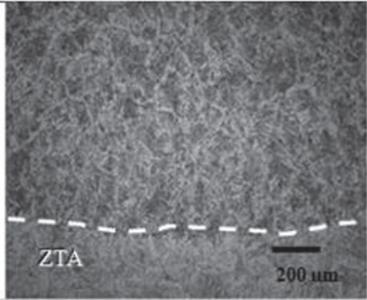
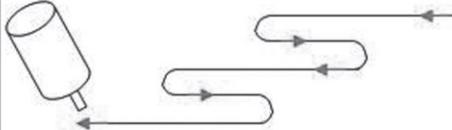
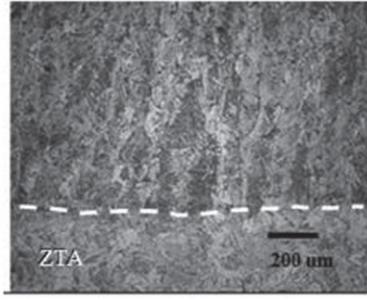
Aspecto superficial	Avanço (mm)	Reversão (mm)
	10	5
	30	15
	30	20
	60	50

Figura 2.18 - Efeito da inclinação da tocha na soldagem *switch back* (comprimento de avanço de 10 mm e de reversão de 5 mm).

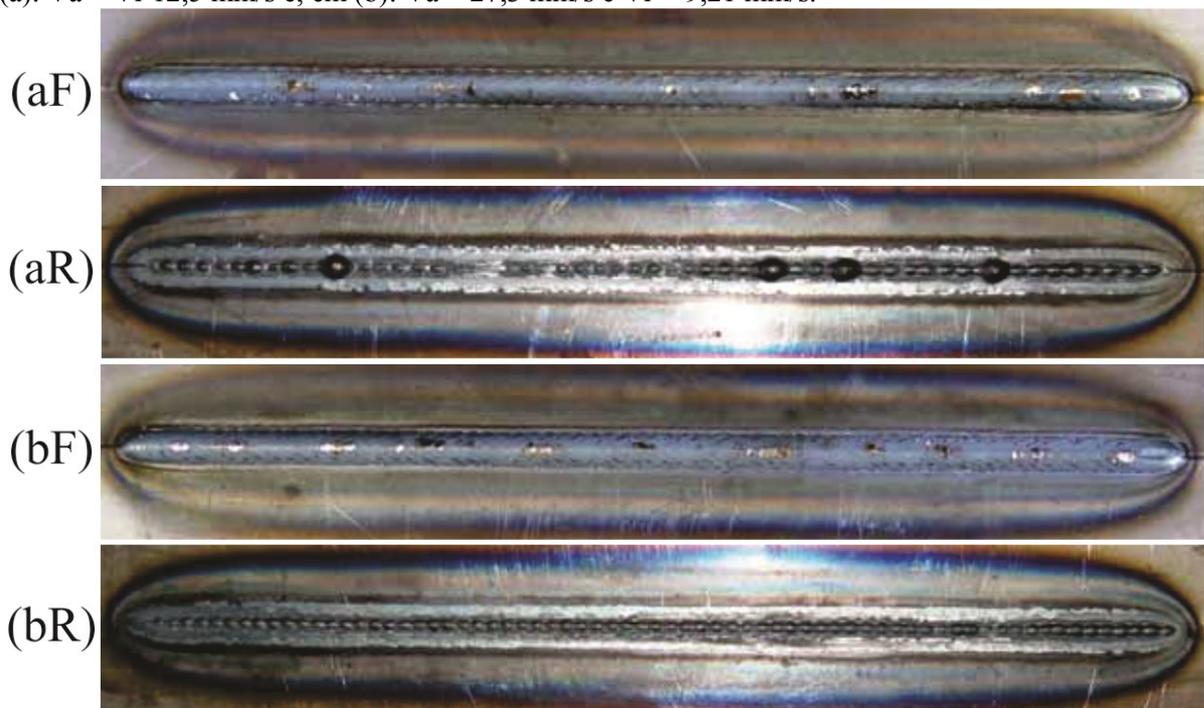
Inclinação da tocha	Estrutura de solidificação do cordão próximo à linha de fusão
 <p><i>Empurrando-puxando</i></p>	
 <p><i>Puxando-empurrando</i></p>	

Fonte: referência [18].

Kaneko [19] afirma que para se encontrar os melhores parâmetros de soldagem as simulações numéricas são mais úteis que os métodos experimentais e que o método *switch back* é muito útil para controlar a poça de fusão na soldagem de chapas finas evitando assim perfurações. Primeiramente, este realizou experimentos com o processo MIG/MAG, criando posteriormente os modelos numéricos do *switch back* e, estudando em seguida, o comportamento da velocidade de soldagem e do comprimento de reversão em relação à temperatura.

O autor afirma ter obtido melhores resultados conforme se aumentou o comprimento da reversão. Também afirma que quanto maior a razão entre as velocidades de avanço e reversão diminui-se o alongamento da poça de fusão e obtém-se maior controle da mesma. A Figura 2.19 ilustra as imagens das faces (índice F) e raízes (índice R) dos ensaios obtidos para velocidades de avanço e retrocesso diferentes.

Figura 2.19 - Imagens das Soldas Realizadas por Kaneko com a aplicação da técnica *switch back*. Em (a): $V_a = V_r$ 12,5 mm/s e, em (b): $V_a = 27,3$ mm/s e $V_r = 9,21$ mm/s.



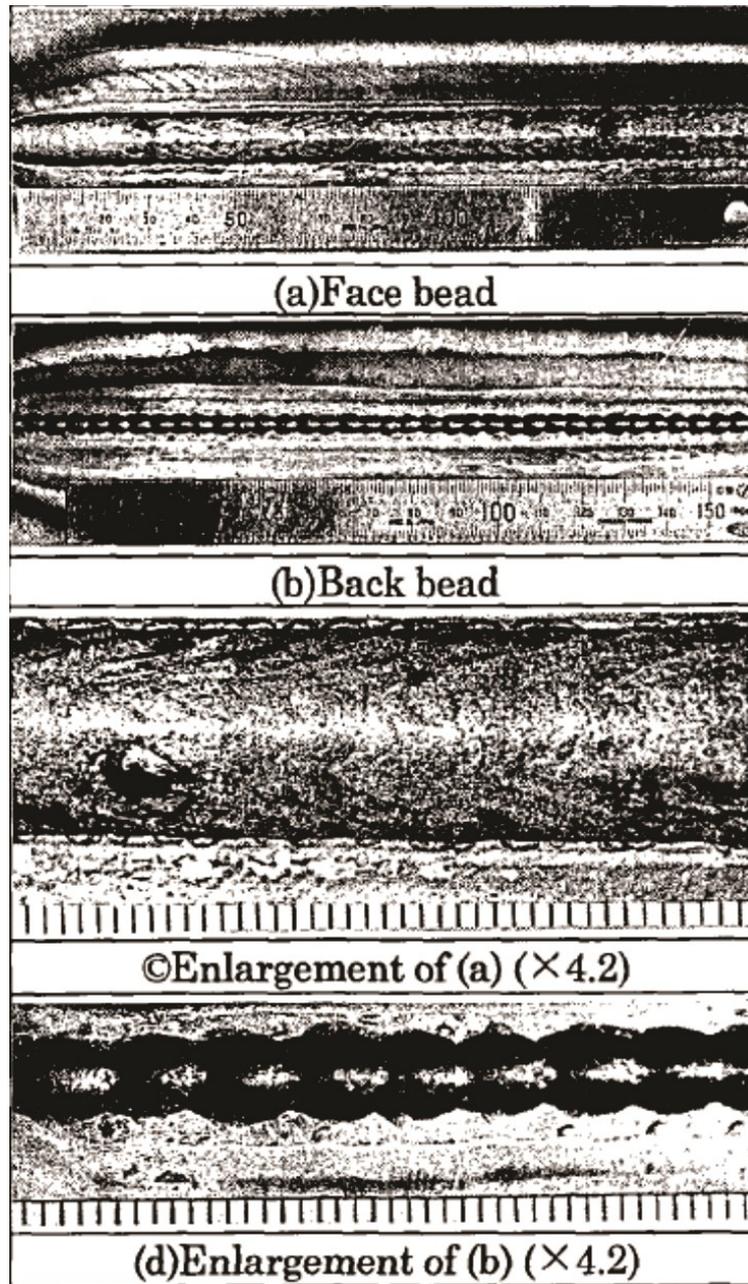
Fonte: referência [19].

Seguindo o exemplo anterior, Jin *et al* [27], utilizaram a simulação numérica para estimar o comportamento da poça de fusão no interior do metal de base, a fim de evitar perfurações na aplicação do processo MIG/MAG em passes de raiz sem a utilização de cobre junta. Em seus ensaios utilizaram chapas de alumínio SS4400 com espessura de 3,2 mm e sobre estas aplicaram o processo MIG pulsado.

Aplicando-se o *switch back*, os autores afirmam terem obtido uma raiz com maior largura e sem perfurações. Com o modo convencional a largura foi de 3,5 mm, enquanto que com a aplicação da técnica *switch back* foi de 5,0 mm.

A Figura 2.20 apresenta os resultados alcançados por Jin *et al* [27] com a soldagem convencional em comparação com a aplicação da técnica *switch back*.

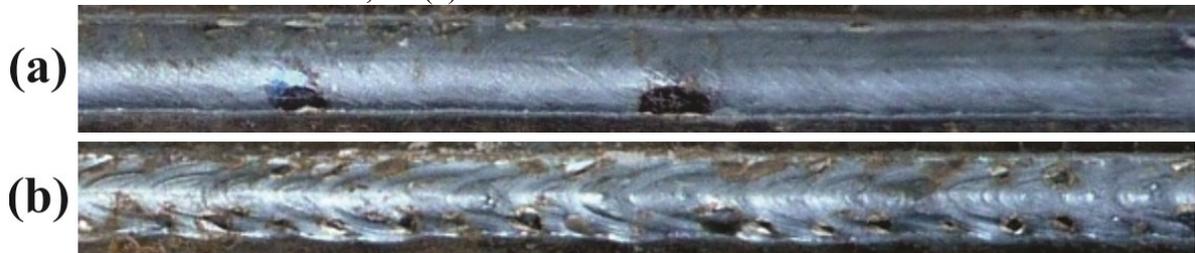
Figura 2.20 - Resultados das soldagens realizadas por JIN et al [27] com $V_s = 4,17$ mm/s e $I_m = 155$ A para uma chapa de alumínio de 3,2 mm. Em (a): face do cordão em modo convencional, em (b): raiz do cordão em modo convencional, em (c): face do cordão em modo *switch back* e; em (d): raiz do cordão em modo *switch back*.



Fonte: adaptado da referência [27].

Sequencialmente, Bruecker [28], estudou a possibilidade de incrementar a produção do processo GAMW pelo aumento velocidade de soldagem, comparando o modo convencional com o *switch back*. Os ensaios foram realizados em juntas sobrepostas de chapas finas (3,3 mm de espessura) com gap de 1mm. O autor declara ter alcançado uma velocidade de soldagem de 35 cm/min com o método convencional, em contrapartida a uma velocidade de 57 cm/min aplicando-se o *switch back*, o que representa um aumento de produção de 63%. A Figura 2.21 mostra os cordões obtidos com o modo convencional e *switch back* para as suas respectivas velocidades.

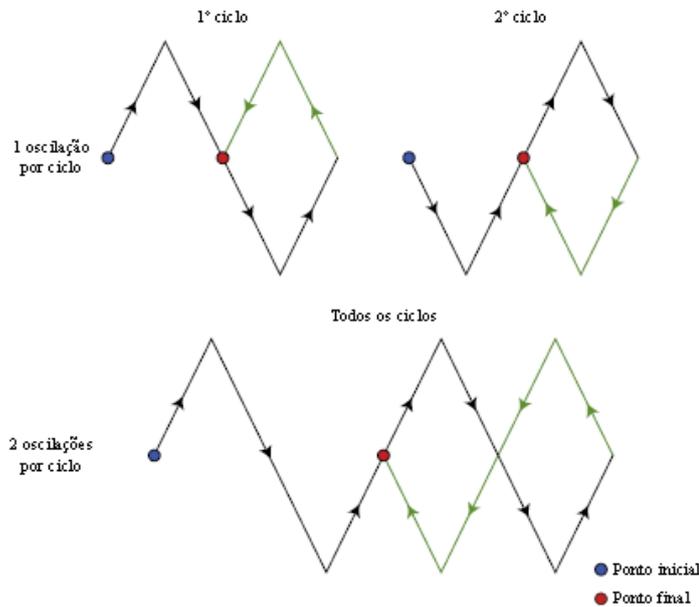
Figura 2.21 - Máxima velocidade de soldagem obtida na soldagem de juntas sobrepostas. Em (a): convencional com 35 cm/min e, em (b): *switch back* com 57 cm/min.



Fonte: referência [28].

Pires [20], desenvolveu algoritmos computacionais que permitiu a um manipulador de soldagem executar trajetórias flexíveis (*switch back*). Este desenvolvimento possibilitou ainda, a correção de parâmetros e adaptação de trajetórias durante a execução da soldagem visando aplicação de união e revestimento. Em termos de movimentação *switch back*, a principal contribuição do trabalho de Pires foi a construção do algoritmo que realizou as oscilações em trajetória triangular, como mostrado na Figura 2.22.

Figura 2.22 - Caminho percorrido pela tocha na trajetória triangular *switch back*.

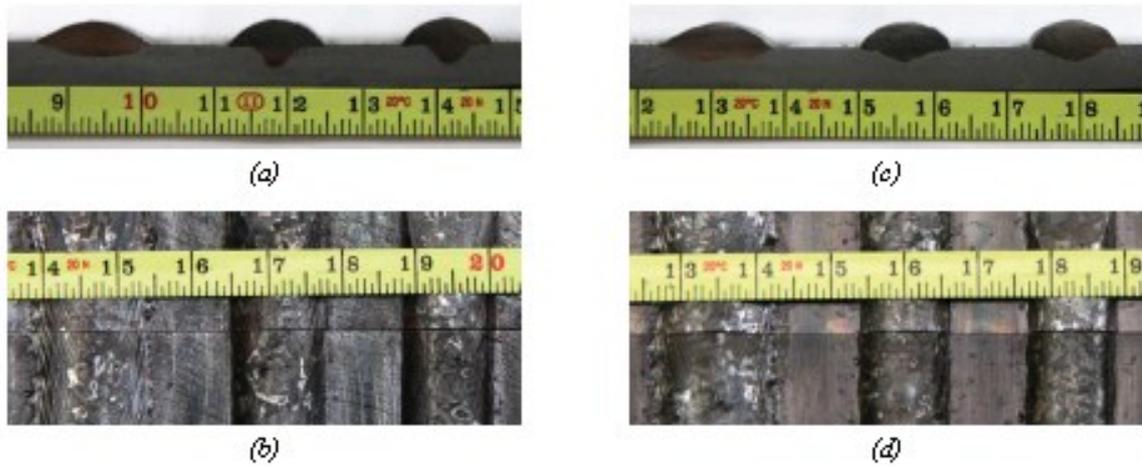


Fonte: referência [20].

Os ensaios preliminares de Pires foram realizados na posição plana para analisar as características geométricas dos cordões de solda quanto a sincronia entre os parâmetros. Uma das principais conclusões de Pires [20] é a necessidade do projeto de um manipulador com maior robustez mecânica para garantir a execução mais precisa de trajetórias de soldagem.

As (Figura 2.23 (a)) e (Figura 2.23 (b)) mostram os resultados das macrografias e a aparência das superfícies dos cordões de solda realizados sem inclinação da tocha. Já as (Figura 2.23 (c)) e (Figura 2.23 (d)) mostram os resultados das macrografias e a aparência das superfícies dos cordões de solda realizados com uma inclinação da tocha de 10° no sentido empurrando. As três soldas realizadas na ordem que se lê (da esquerda para a direita), são de trajetórias: triangular, *switch back* e filetado.

Figura 2.23 - Corte transversal e vista superior de cordões de solda para revestimento com e sem inclinação da tocha.

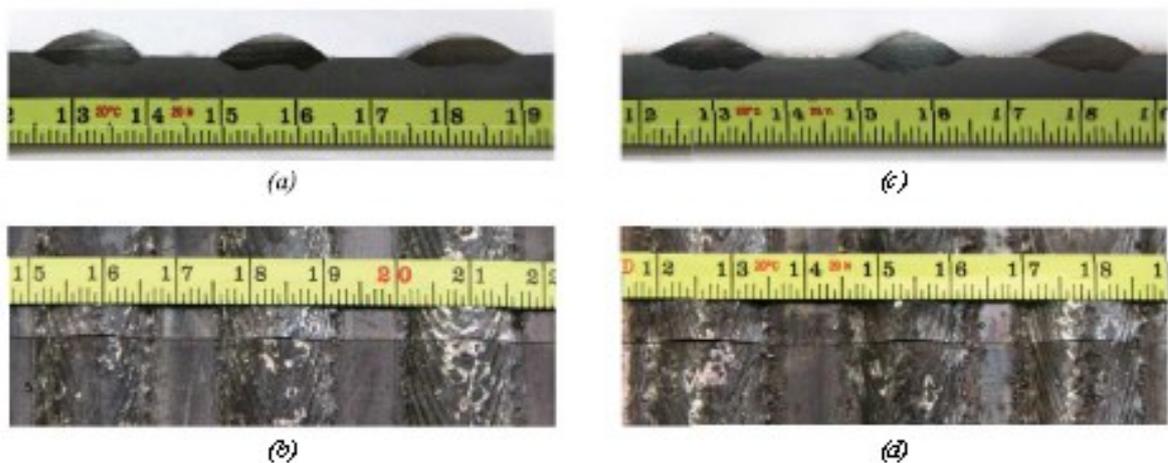


Fonte: referência [20].

De acordo com o autor os valores de penetração e largura para o *switch back* foram menores que os valores para trajetória triangular e maiores que para a trajetória filetada, conforme se aumentou o ângulo de inclinação da tocha. O mesmo ocorreu para o parâmetro de diluição.

Da mesma maneira o autor realizou soldagens de revestimentos comparando o *switch back* com outras trajetórias. Figura 2.24 (a) e Figura 2.24 (b) são mostrados a seção transversal e a superfície das soldas realizadas com as sobreposições de 1/3, 1/2 e 2/3 da trajetória circular, enquanto que na Figura 2.24 (c) e Figura 2.24 (d) são mostradas a seção transversal e a superfície das soldas realizadas com *switch back* e trajetória duplo 8.

Figura 2.24 - Corte transversal e vista superior de cordões de solda para revestimento sem inclinação da tocha para diferentes trajetórias.



Fonte: referência [20].

De acordo com os resultados do autor, o *switch back* apresentou a segunda maior largura, diluição e penetração das trajetórias estudadas. O autor conclui que as características geométricas dos cordões de solda produzidos pelos diferentes tipos de trajetórias são similares, porém superiores para as soldagens de revestimentos quando comparados com o *switch back*.

Quanto às soldagens de união, o autor testou sincronismos de a trajetória triangular com o *switch back* com a fonte de soldagem. Esses sincronismos forma realizados de tal modo que pudesse ser testado com correntes em polaridade positiva, negativa e com variação de ambas (Figura 2.25).

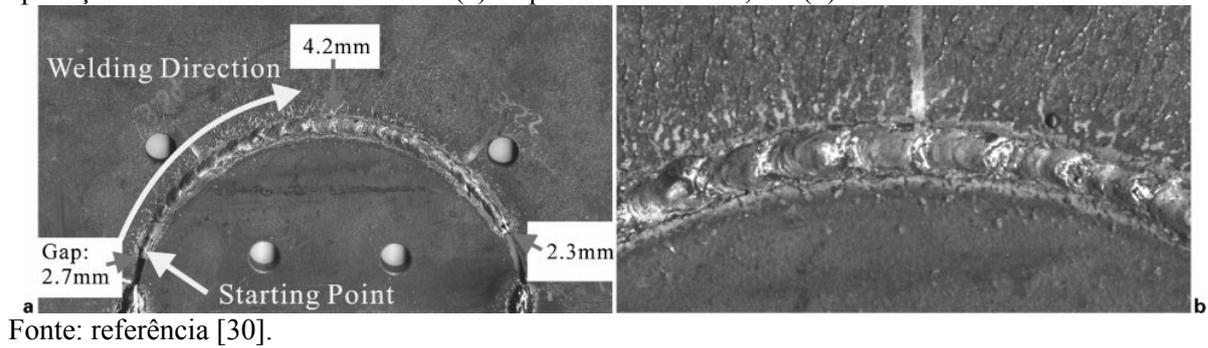
Figura 2.25 - Macrografias e visão superior dos cordões de solda obtidos ao se fazer a inversão de polaridade da corrente elétrica.



Fonte: referência [20].

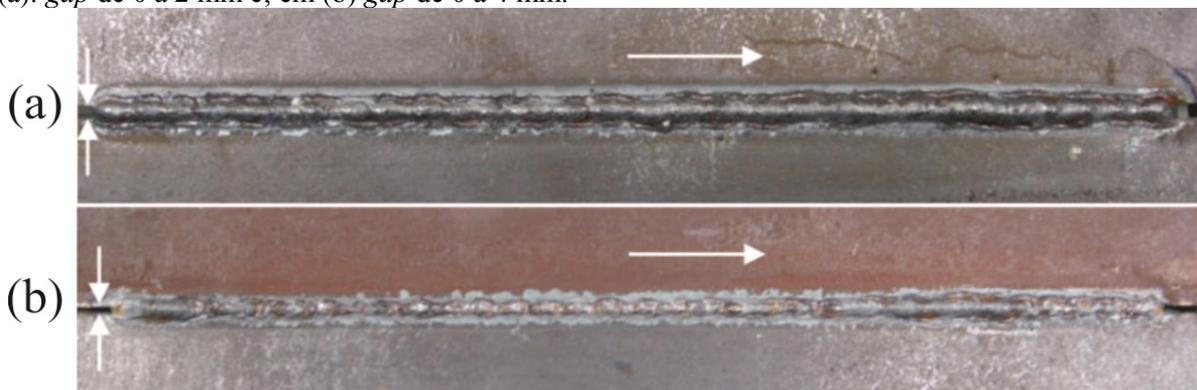
Yamane et al [30], realizaram soldas de união circunferenciais em chapas de aço carbono sem utilização de cobre-junta pela aplicação da técnica *switch back*. A soldagem *switch back* foi utilizada para unir um disco com uma placa de metal de maneira a evitar incorrências de perfurações em passe de raiz independente da variação da abertura da junta. A Figura 2.26 mostra o resultado da superfície e raiz da solda para o ensaio realizado.

Figura 2.26 - Soldagem de uma circunferência com variação de *gap* na posição vertical com a aplicação da técnica *switch back*. Em (a): superfície da solda e, em (b): raiz da solda.



Na sequência, com o intuito de substituir anteparos de cobre juntas por razões de nucleação de trincas e desperdício de tempo para remoção das mesmas, de maneira similar ao trabalho anterior, Yamane *et al* [31] e [32], utilizaram a técnica *switch back* para soldagem de chapas grossas em chanfro em “V” com *gap* de 2 a 4,5 mm com processo MAG e corrente pulsada sincronizada com o movimento da tocha de soldagem durante a execução da técnica (Figura 2.27). Segundo os autores torna-se difícil realizar uma soldagem com bom acabamento de raiz com 2 ou 3 mm de *gap*, porém o *switch back* possibilita essa condição.

Figura 2.27 - Imagens das raízes das soldas realizadas com *switch back* em chapas desalinhadas. Em (a): *gap* de 0 a 2 mm e; em (b) *gap* de 0 a 4 mm.

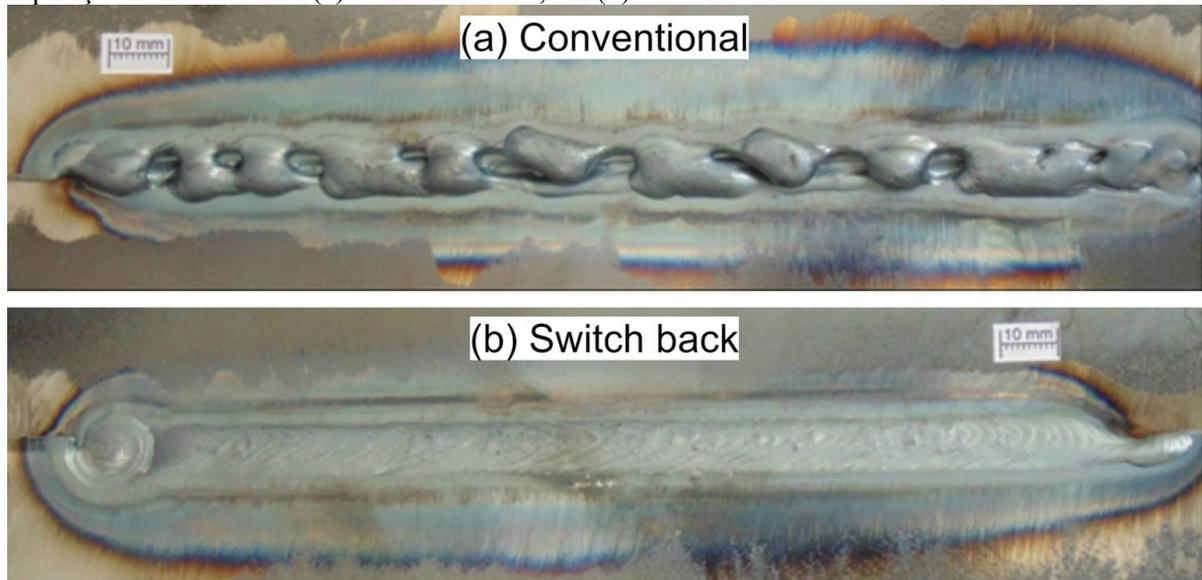


De acordo com os autores a utilização da técnica *switch back* produz um melhor controle da poça de fusão, o que permitiu a soldagem com desalinhamento entre as chapas e, nesse caso, a sustentação das poças de solda formadas em ambos os flancos da junta se deu por tensão superficial.

E por fim, temos o trabalho de Schwedersky *et al* [17] que aplicou a técnica *switch back* em chapas de 3 mm de espessura dispostas em uma junta sobreposta. Nesse caso, o *switch back* com frequência de 2 Hz foi comparada ao movimento convencional unidirecional

(Figura 2.28). O uso do movimento convencional produziu um cordão com *humping* e sem continuidade, enquanto que a aplicação da técnica *switch back* produziu um cordão contínuo e sem defeitos.

Figura 2.28 - Imagens do acabamento superficial dos cordões de solda obtidos em juntas sobrepostas na posição horizontal. Em (a): convencional e, em (b): *switch back*.

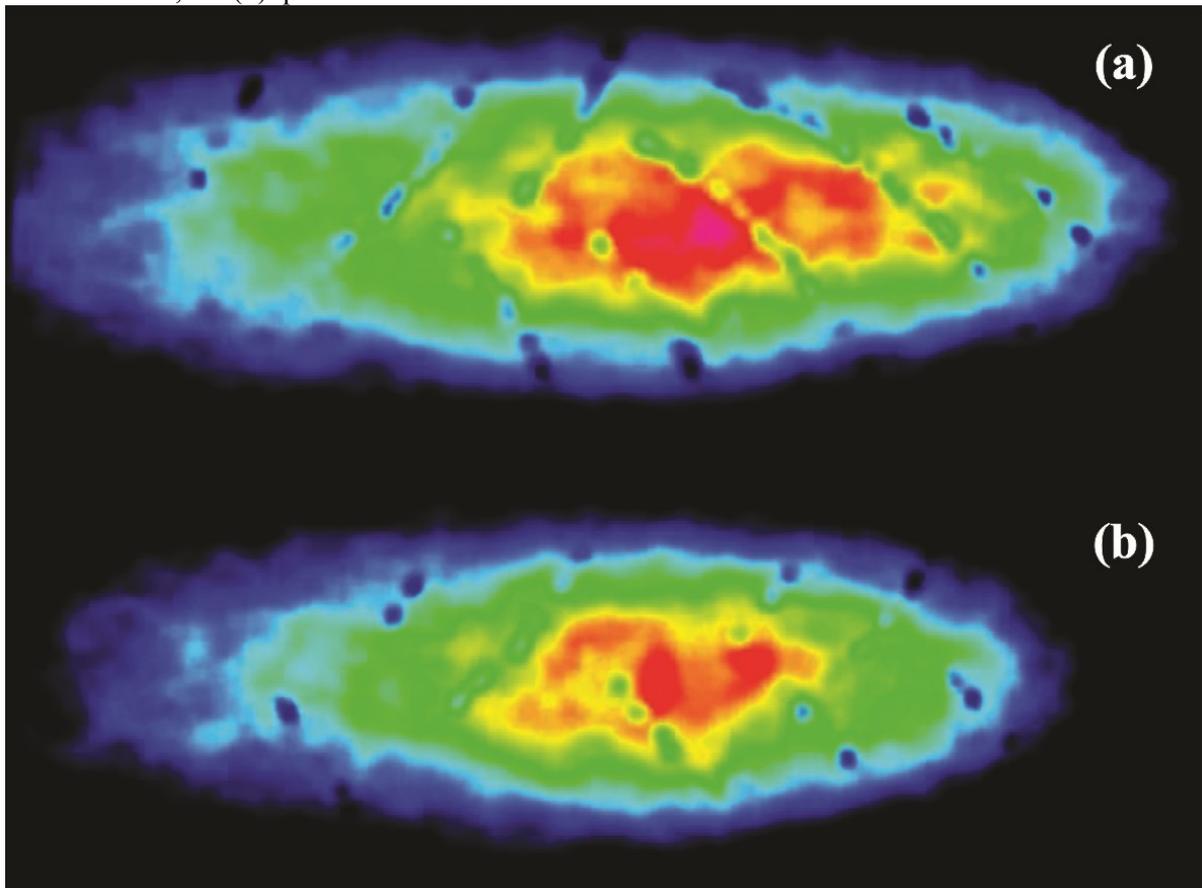


Fonte: referência [17].

2.2.3 Estudos termográficos da influência de oscilação da tocha

Wizenmann [2] procurou avaliar e compreender melhor a forma de distribuição de calor quando utilizada a técnica *switch back* em comparação ao movimento linear convencional. A Figura 2.29 mostra as imagens do perfil de distribuição de calor do corpo de prova para as duas situações ensaiadas.

Figura 2.29 - Distribuição de calor no lado oposto ao soldado. Em (a): para a movimentação linear convencional e, em (b): para o *switch back*.



Fonte: referência [2].

Observando-se a Figura 2.29 é possível verificar que a área do perfil de distribuição térmica é menor para o *switch back*, quando comparado com o movimento linear convencional. Para este fato o autor concluiu que há uma tendência do calor penetrar menos na solda com a utilização do *switch back*, fato este também relatado no trabalho [19].

Também através de estudos termográficos Carvalho [24] objetivou estudar a influência da frequência de oscilação da tocha na distribuição de temperatura do cordão de solda, nesse caso realizado por tecimento puro.

O autor conclui dizendo que a velocidade de oscilação da tocha interfere diretamente na forma como o calor é transmitido para o material de base. Com frequências mais altas a distribuição do calor é mais homogênea, o que implica em uma poça metálica com temperatura mais baixa. Uma explicação é o fato que para velocidades transversais mais altas o arco elétrico fica menos tempo sobre uma determinada região, assim, o aquecimento desta é menor. Como consequência tem-se um revestimento com menor penetração e diluição, além de prover maior uniformidade ao longo do cordão.

3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EQUIPAMENTOS

3.1.1 Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem mantida para todos os ensaios foi a modelo MTE DIGITEC 600 (Figura 3.1) do fabricante IMC Soldagem Ltda. A fonte tem capacidade máxima de corrente de 600 A e possui uma saída externa pra receber sinais de manipulador de soldagem.

Figura 3.1 - Foto ilustrativa da fonte de soldagem modelo MTE DIGITEC 600.



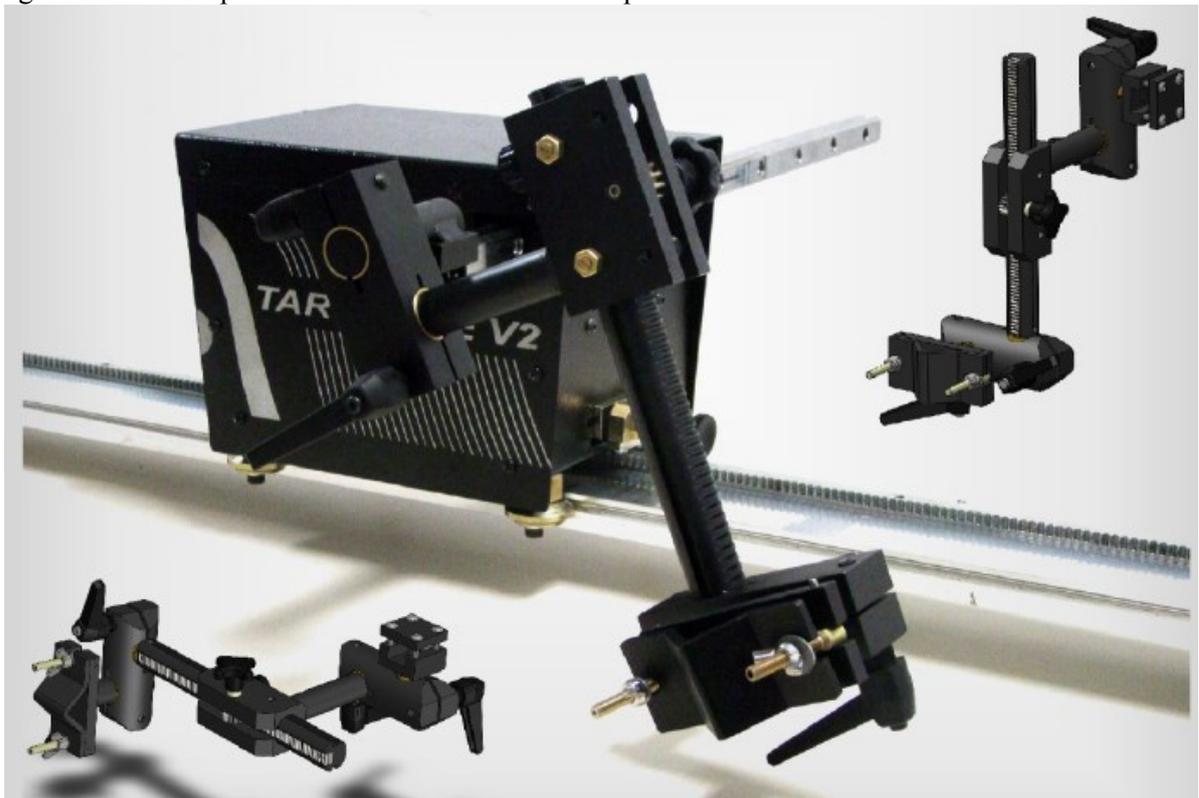
Fonte: retirado do sítio: <http://www.labsolda.ufsc.br> [33].

3.1.2 Manipulador

O manipulador utilizado para os ensaios foi o Tartílope V2 do fabricante SPS – Sistemas e Processos para Soldagem Ltda. O Tartílope V2 é um manipulador para soldagem que possui deslocamento automático com dois graus de liberdade, sendo o eixo (x) para movimentação longitudinal e o eixo (y) para movimentação transversal. Essa movimentação em dois graus de liberdade permite que o equipamento realize a soldagem usando tecimento, que se caracteriza pela movimentação oscilatória da tocha em sentido transversal do deslocamento [34]. O manipulador acompanha um suporte de tocha que permite a regulagem manual da distância entre a tocha e a peça e também ajustes de ângulo de ataque e de trabalho. As diferentes opções de ajuste desse suporte permitem instalar e alternar rapidamente a tocha em todas as posições de soldagem.

O equipamento possui uma fixação rígida sobre trilho do tipo pinhão cremalheira. Esta rigidez é essencial quando utilizado sistemas de oscilação de tocha em alta frequência. Além disso, permite sincronizar a abertura de arco e o sinal da corrente de soldagem com a sua movimentação. A Figura 3.2 mostra o Tartílope V2 com o suporte de tocha acoplado.

Figura 3.2 - Tartílope V2 do fabricante SPS com o suporte de tocha.



Fonte: retirado do sítio: http://www.sps-soldagem.com.br/catalogo/0304_Tartilope_V2.pdf [34].

3.1.3 Tocha de Soldagem

A tocha utilizada para a realização dos ensaios foi a do fabricante Binzel Abicor[®], referenciada pelo mesmo como tocha TIG automática modelo de série AUT 27A-25. Esta tocha possui capacidade de corrente de até 500 A e versatilidade para usar eletrodos de 1 a 6,35 mm de diâmetro, além disso, a tocha apresenta a vantagem de utilizar *Gas Lens*. O *Gas Lens* é um componente que possibilita um fluxo de gás de processo mais laminar e melhora a proteção gasosa da poça de fusão. A tocha também possui sistema refrigeração a água, o que viabiliza a sua aplicação em altas correntes necessárias aos experimentos. A Figura 3.3 mostra a tocha utilizada para os ensaios.

Figura 3.3 - Tocha TIG automática resfriada a água modelo AUT 27A-25.



Fonte: retirado do sítio www.binzel-abicor.com/BR [35].

3.1.4 Afiador de Eletrodos

A afiação e o truncamento foram produzidos com auxílio de um afiador elétrico manual do fabricante CK Worldwide™ (Figura 3.4). O equipamento tem a capacidade de afiar eletrodos de 1,0 a 6,35 mm de diâmetro. As posições disponíveis para afiação variam entre os ângulos de 20° a 60° com incremento de 10°. O equipamento também possibilita realizar afiação com truncamento. As principais vantagens de utilizar este equipamento são a garantia do ângulo de afiação e o fato de apresentar um disco rígido que não produz ranhuras devido ao desgaste quando comparado ao esmeril comum. Esta ranhura comumente encontrada no disco abrasivo do esmeril pode produzir alteração geométrica da conicidade do eletrodo.

Figura 3.4 - Afiador elétrico manual Turbo Sharp X.



Fonte: retirado do sítio: <http://www.ckworldwide.com/portable-grinder.html> [36].

3.1.5 Medidor de Deslocamento Linear

Para aferir o módulo de controle e comparar os valores de amplitudes obtidas pelo robô REIS RV-15 e o Tartilope V2, foi utilizado um medidor de deslocamento linear (Figura 3.5). Este instrumento do fabricante Burster Company™ é um sensor de deslocamento potenciométrico aplicado para medição direta, teste e monitoramento de deslocamentos mecânicos.

Figura 3.5 - Medidor de Deslocamento Linear.



Fonte: retirado do sítio: <https://www.burster.com> [37].

As especificações técnicas do medidor de deslocamento linear são: faixa de medição de 50 mm, não linearidade até 0,05% do F.S. (valor final de escala) e resolução de 0,01 mm. Para a realização das medições o instrumento foi conectado a um canal do SAP que faz a leitura do sinal de tensão e depois converte o mesmo em unidade de comprimento.

3.1.6 Câmera de Filmagem de Alta velocidade

A câmera de alta velocidade modelo *Motion ProY4-S2* do fabricante IDT Vision™ (Figura 3.6) é um equipamento que permite a filmagem e possibilita a análise de fenômenos que ocorrem na tecnologia da soldagem. Esses fenômenos não são possíveis de visualização a olho nu devido à alta frequência com que ocorrem e a alta intensidade luminosa gerada pelo arco voltaico. A câmera possui uma taxa de aquisição máxima de 5,1 kHz (5100 *frames* por segundo), resolução de 1024 x 1024 pixels e máximo tempo de gravação de 9,9 segundos para a máxima taxa de aquisição. Este equipamento permite a visualização da formação da poça de fusão quando empregado o TIG convencional e o TIG com *switch back*.

Figura 3.6 - Imagem Ilustrativa da câmera de alta velocidade IDT Motion Pro Y4-S2.



Fonte: retirado do sítio: <https://idtvision.com/products/> [42].

3.1.7 Sistema de Aquisição Portátil – SAP

O sistema de aquisição portátil do fabricante IMC Soldagem[®] (Figura 3.7) é uma ferramenta de monitoração de processos de soldagem. O equipamento possui taxa de aquisição de 5 KHz, faixa de medição para a corrente de -600 a 600 A, faixa de medição para tensão de -100 a 100 V, comunicação com outros equipamentos com porta USB, leitura dos valores médios das variáveis de soldagem a cada 0,1 s por até 8 horas, ou a cada 1 s até 80 horas e, modo de aquisição contínua ou limitada a uma determinada faixa de tempo de operação

Figura 3.7 - Foto ilustrativa do Sistema de Aquisição Portátil – SAP V4



Fonte: referência [38].

3.1.8 Medidor de Vazão de Gases

O medidor de vazão de gases (Figura 3.8) MVG-3 utiliza um sensor que independe da pressão, pois realiza a medição com base na vazão mássica, permitindo uma aferição com maior confiabilidade. O MVG-3 é calibrado para medir os gases argônio, nitrogênio, gás carbônico e oxigênio, além de misturas. Adicionalmente, pode trabalhar em qualquer posição, possui faixa de medição de 0 a 20 l/min e pressão máxima de trabalho de 3,0 bar.

Figura 3.8 - Foto ilustrativa do medidor de vazão de gases MVG-3.

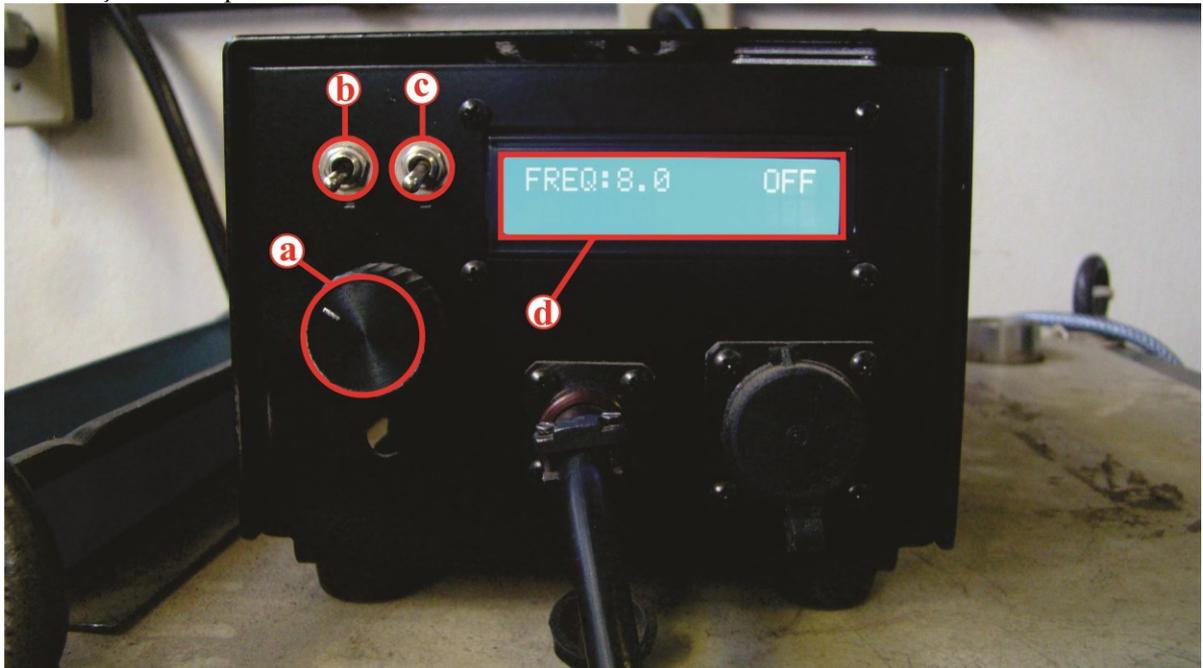


Fonte: retirado do sítio http://www.sps-soldagem.com.br/catalogo/12_MVG_3.pdf [39].

3.1.9 Sistema de Oscilação da Tocha

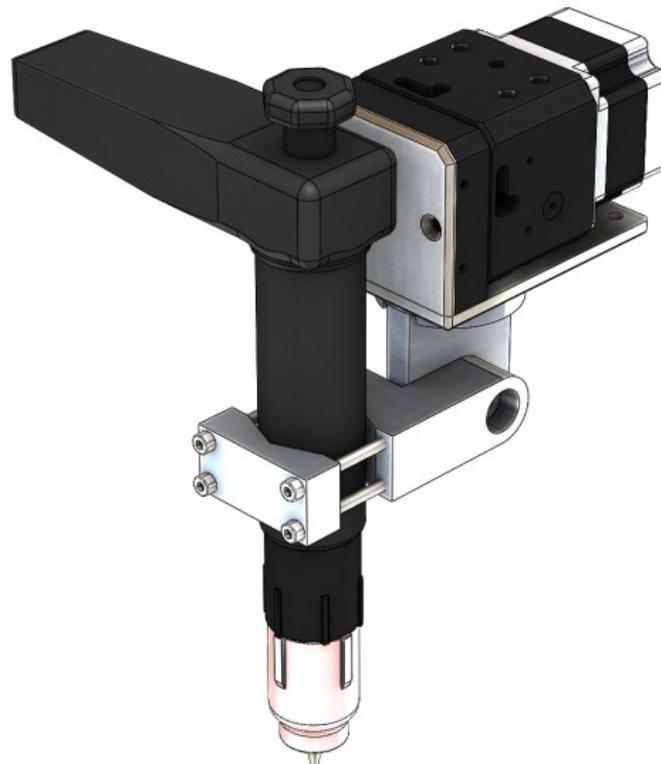
O sistema de oscilação da tocha foi empregado para a realização de soldagens em alta frequência com a técnica *switch back*. O sistema é composto por dois dispositivos: o módulo de controle (Figura 3.9) e o módulo de oscilação (Figura 3.10). O módulo é responsável pela regulagem e manutenibilidade da frequência de oscilação sobre a tocha. Este módulo possui duas características principais: a primeira é de apresentar um funcionamento independente de um robô antropomórfico ou manipulador, uma vez que possui sua própria interface homem máquina (IHM). Em segundo lugar, este dispositivo possui a ímpar característica de poder selecionar elevadas frequências de movimentação da tocha. No módulo de frequência os valores podem ser configurados na faixa de 0 a 30 Hz, com incremento de 0,1 Hz.

Figura 3.9 - Módulo de Controle do sistema de oscilação. Em (a): potenciômetro para regulagem da frequência, em (b): botão liga/desliga, em (c): botão de sentido do movimento e; em (d): display de visualização da frequência.



Fonte: o próprio autor.

Figura 3.10 - Módulo de Oscilação acoplado ao suporte com a tocha de soldagem.

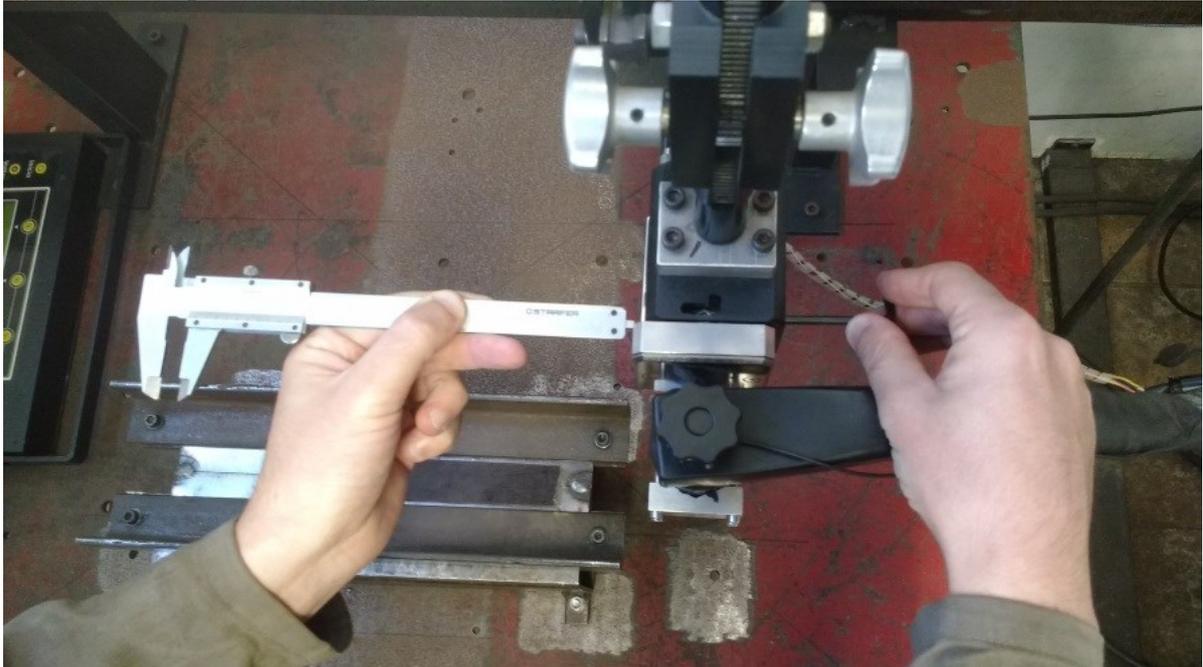


Fonte: Departamento de Projetos do LABSOLDA.

O módulo de oscilação transforma o movimento unidirecional rotacional em movimentos lineares alternados por meio de componentes mecânicos, sendo que o valor da

amplitude dos movimentos oscilatórios se dá pelo ajuste de um parafuso, que permite faixas de trabalho de 0 a 25 mm, com incremento de 1 mm. O ajuste do parafuso é feito com o auxílio de um paquímetro analógico (Figura 3.11). O paquímetro é configurado com a metade do valor da amplitude, em seguida, a haste que mede a dimensão de profundidade do paquímetro é apoiada na lateral do módulo de oscilação e, com a ajuda de uma chave *Allen* o ajuste da amplitude é realizada.

Figura 3.11 - Representação esquemática da regulagem da amplitude no módulo de oscilação.



Fonte: o próprio autor.

A velocidade de movimentação deste módulo é controlada pela regulagem da frequência no módulo de controle. O módulo de oscilação ainda conta com furações compatíveis com as do flange de robôs e também com furações próprias para a fixação da tocha de soldagem em suportes de tocha compatíveis com o Tartílope.

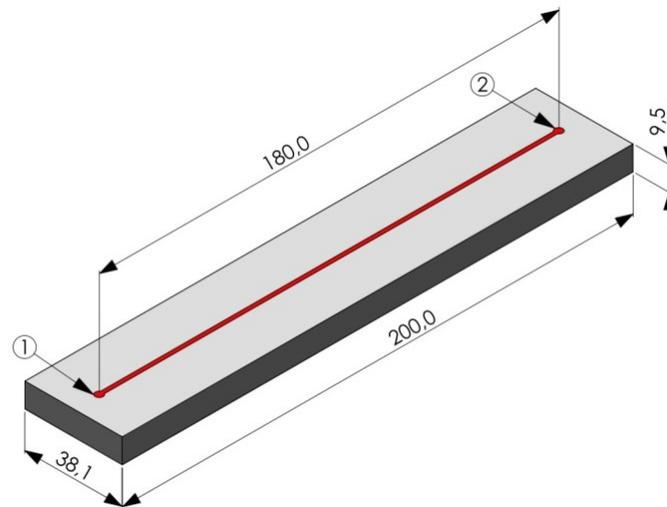
3.2 MATERIAIS

3.2.1 Corpos de Prova

Com relação aos corpos de prova empregados neste trabalho, três modelos foram utilizados. O primeiro foi do tipo barra chata (aço SAE 1020) com dimensões 200 mm x 38,1

mm x 9,5 mm. Este corpo de prova foi utilizado para as soldas de caracterização do processo no modo *switch back* (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Representação do corpo de prova com suas dimensões expressas em milímetros. O ponto 1 marca o início da soldagem e o ponto 2 o término.

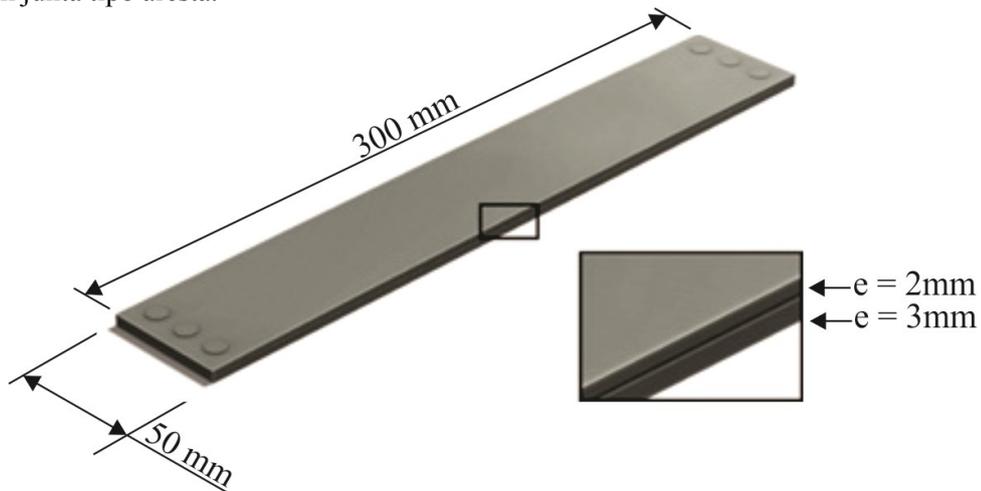


Fonte: o próprio autor.

Já o segundo corpo de prova foi confeccionado com duas chapas planas de dimensões 300 mm x 50 mm, porém uma chapa apresentava espessura de 3 mm e a outra de 2 mm (aço SAE 1020). Esse corpo de prova foi utilizado para a soldagem das juntas de aresta na posição horizontal (Figura 3.13).

Após a limpeza as chapas eram unidas uma com a outra utilizando o processo de soldagem por resistência a ponto. Nesse corpo de prova, também se utilizou um *gap* (abertura) com intuito de produzir um desalinhamento entre as chapas para se aproximar ao máximo de uma aplicação industrial real, onde na união entre as partes é comum apresentar desalinhamento e desnivelamento. O *gap* foi introduzido com um pedaço de arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e de comprimento igual a largura das chapas. O pedaço de arame foi fixado no centro do corpo de prova entre as duas chapas.

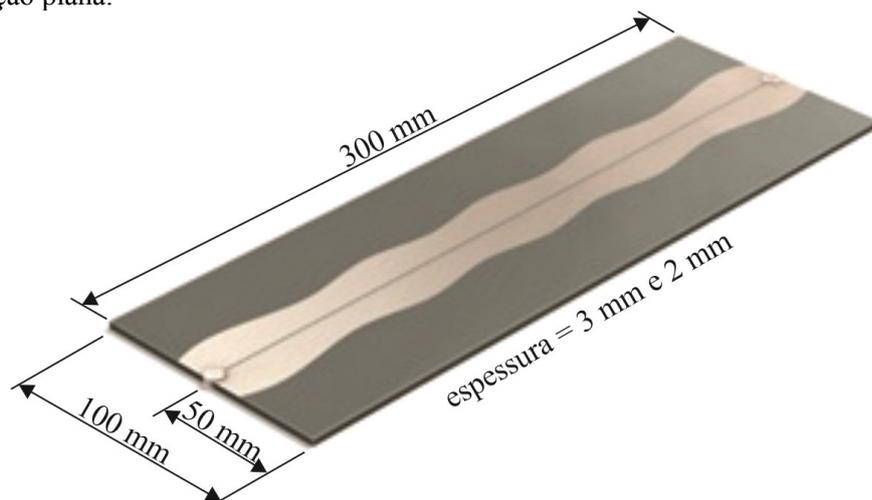
Figura 3.13 - Imagem representativa do corpo de prova com gap de 1 mm utilizado para fazer os ensaios em junta tipo aresta.



Fonte: o próprio autor.

E por fim, o terceiro corpo de prova foi utilizado para os ensaios em juntas de topo na posição plana (Figura 3.14). Este corpo de prova é constituído de duas chapas de aço carbono, especificação SAE 1020, com dimensões 50 mm x 300 mm x 3 mm (largura x comprimento x espessura), sendo a espessura a única dimensão variada entre 2 ou 3 mm de acordo com a gama de ensaios realizada. As chapas foram unidas por ponteamento utilizando o processo MIG/MAG convencional.

Figura 3.14 - Imagem representativa do corpo de prova utilizado para fazer os ensaios em junta de topo na posição plana.

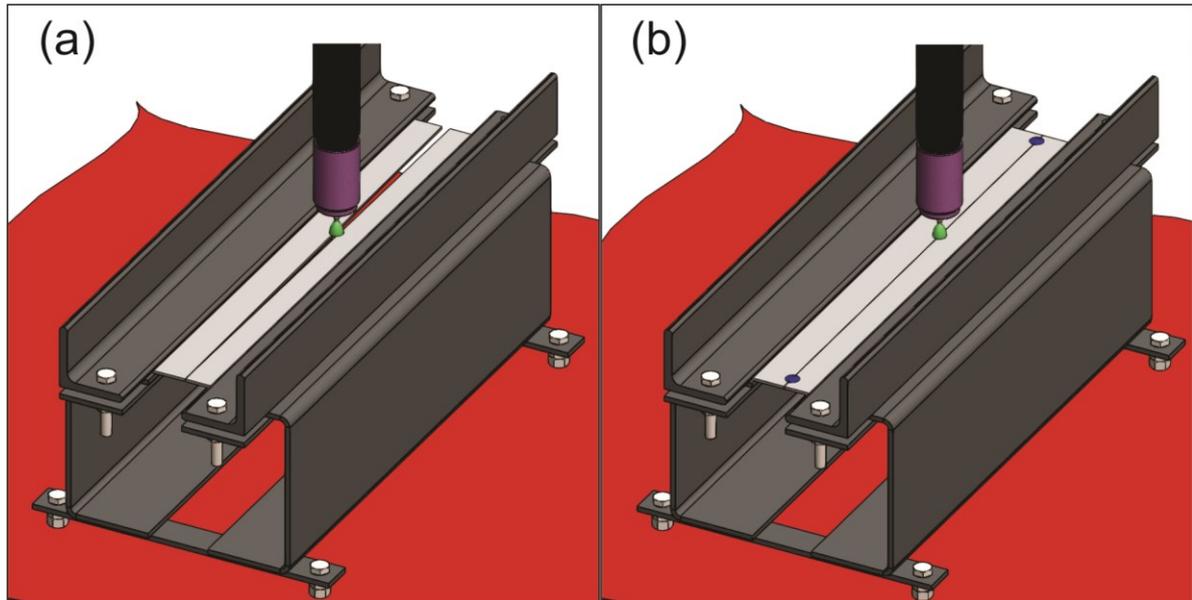


Fonte: o próprio autor.

O ponteamento é realizado em ambas as extremidades da junta e também em ambos os lados do corpo de prova. Este ponteamento mostrou-se necessário em virtude de ter ocorrido durante ensaios preliminares o deslizamento das chapas que assim constituem o corpo de prova, afastando-se uma da outra no suporte onde estavam fixadas. A Figura 3.15 (a)

mostra o afastamento entre as chapas, corrigido pelo ponteamto na Figura 3.15 (b). Ambas as imagens são apenas ilustrativas e destina-se a mostrar o que acontece durante a realização da soldagem.

Figura 3.15 - Suporte de fixação dos copos de prova para soldagem em junta de topo. Em (a): mostra o corpo de prova sem ponteamto com as chapas sendo afastadas durante a soldagem e, em (b): o afastamento não ocorre devido ao ponteamto nas extremidades das mesmas.



Fonte: o próprio autor.

Os corpos de prova de 2,0 e 3,0 mm de espessura passaram por uma aferição. Esta aferição visava garantir a espessura das chapas uma vez que esta dimensão era fundamental para a soldagem, principalmente das juntas de topo. Após a limpeza das chapas para a remoção da carepa de laminação, foi efetuada a medição da espessura com auxílio de um paquímetro digital. Foram medidos aleatoriamente 10 chapas de 2,0 e 3,0 mm cada. A medição foi efetuada em três pontos, a saber, nas extremidades distantes 50 mm de cada lado e no centro das chapas. Os valores médios e o desvio padrão das medições são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Medição da Espessura das Chapas de 2 e 3 mm

Nº Chapa	Espessura 3 mm			Espessura 2 mm		
	1º Ponto	2º Ponto	3º Ponto	1º Ponto	2º Ponto	3º Ponto
1	3,02	3,01	3,01	2,02	2,04	2,02
2	3,02	3,03	3,00	2,03	2,05	2,06
3	3,01	3,01	3,02	2,00	2,02	2,07
4	3,00	3,05	3,00	1,91	1,94	2,06
5	3,04	3,06	3,04	1,99	2,03	2,00
6	3,01	3,05	3,02	2,02	1,97	2,02
7	2,97	2,94	2,95	2,00	2,01	2,01
8	3,00	3,02	2,99	2,00	2,05	2,02
9	2,98	2,95	2,97	1,90	1,92	1,94
10	2,95	3,00	2,98	2,02	1,99	2,04
Média	3,0			2,0		
Desvio Padrão	0,03			0,04		

Observando-se a Tabela 3.1 verifica-se que embora ocorresse variabilidade entre as medições efetuadas nas chapas, coincidentemente, a média de ambas as espessuras permaneceram idênticas ao valor nominal desejado e apresentando baixo desvio padrão. Portanto, pode-se afirmar que o método de preparação dos corpos de prova não influencia nos resultados das soldas no sentido de apresentar uma redução na espessura da chapa.

3.2.2 Gases de Processo

O gás de processo foi adquirido do fabricante White Martins™ em garrafas de 10 m³ de volume. Durante a realização dos ensaios o gás utilizado foi o argônio comercialmente puro. O gás é considerado comercialmente puro, porém seu grau de pureza real é de 2.8 (99,8%).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Aferição do Manipulador

A aferição foi realizada fazendo com que o Tartílope percorresse uma distância de 30 cm para duas velocidades diferentes, uma alta e uma baixa, a saber, de 30 e 150 cm/min, respectivamente. Em tese, o tempo necessário para percorrer essa distância nas referidas velocidades é de 60 segundos para a Vs de 30 cm/min e de 12 segundos para a Vs de 150

cm/min. Para validar os testes, foram feitas 10 medições para cada velocidade e adotado a média como valor verdadeiro.

Um corpo de prova do tipo junta de topo foi fixado no suporte, posteriormente, marcaram-se os pontos para a realização da trajetória no início e no fim do corpo de prova tendo como referência a ponta do eletrodo. Para contagem do tempo foi utilizado um cronômetro esportivo novo, porém, não se tem conhecimento da resolução, erro máximo ou até mesmo se o instrumento estava calibrado.

A medição foi efetuada acionando-se a movimentação do manipulador ao mesmo tempo em que se disparava a contagem de tempo no cronômetro. Os resultados obtidos de cada medição, da média e desvio padrão estão dispostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Valores médios da aferição de velocidades do manipulador Tartilope V2.

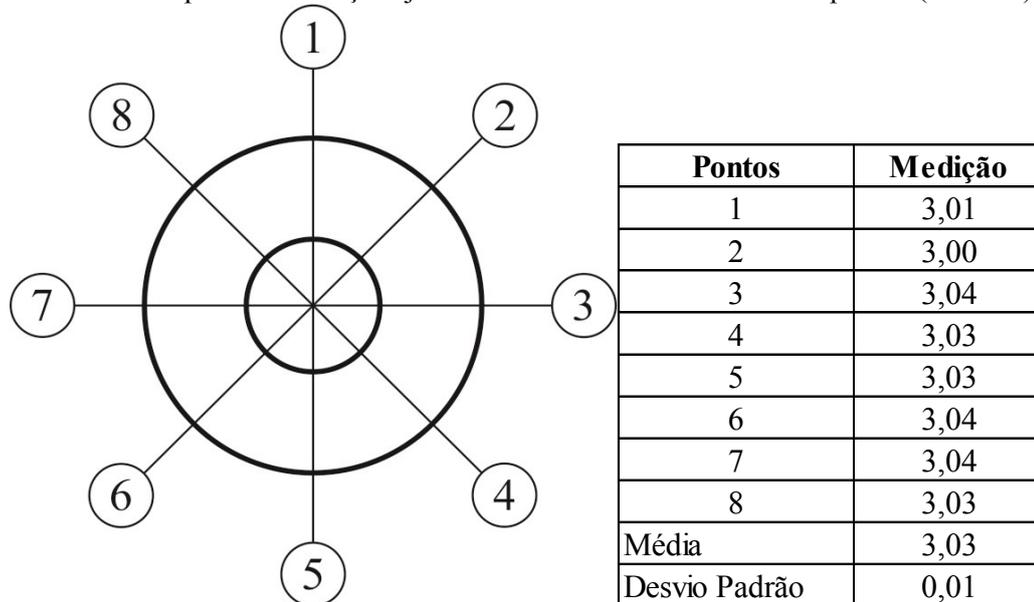
Medições	Velocidades	
	30 cm/min	150 cm/min
1	60,76	12,18
2	60,61	12,61
3	60,77	12,61
4	60,89	12,04
5	60,45	12,42
6	60,61	12,22
7	60,70	12,21
8	60,70	12,25
9	60,61	12,37
10	60,69	12,17
Média	60,68	12,30
Desvio Padrão	0,12	0,19

O manipulador Tartilope V2 apresentou um erro de 1,13% para a velocidade de 30 cm/min e 2,56% para a velocidade de 150 cm/min. Os erros encontrados estão associados ao reflexo de resposta do operador para acionar e parar a contagem de tempo do cronômetro. Como os valores encontrados de desvio padrão em torno da média calculada foram pequenos, considerou-se o equipamento aferido, confiável e apropriado para a realização dos ensaios de soldagem.

3.3.2 Aferição da Distância Eletrodo Peça (DEP)

A regulagem da DEP foi realizada com o uso de uma arruela de aço galvanizada de espessura 3,0 mm. Foram aferidas oito medições da espessura da arruela, cada medição deslocada 45° uma da outra e, em seguida realizou-se o cálculo da média e desvio padrão. A Figura 3.16 mostra o desenho da arruela com a posição dos pontos medidos juntamente com o quadro dos valores das medições, média e desvio padrão das mesmas. Observando-se os valores da média e desvio padrão da arruela medida, nota-se que a espessura da mesma representa um bom padrão para aferição da DEP.

Figura 3.16 - : Desenho representativo da arruela com os oito pontos medidos (à esquerda). Quadro com os valores das respectivas medições juntamente com a média e o desvio padrão (à direita).



Fonte: o próprio autor.

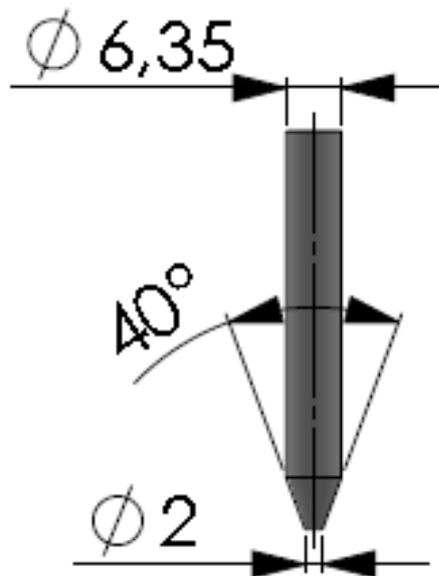
3.3.3 Eletrodo

Como componente essencial do processo TIG, o eletrodo utilizado foi o EWTh-2 especificação norma AWS A5.12-92. Este eletrodo possui composição química de 98% de tungstênio com dopagem de óxido de tório em 2%. Em todo o trabalho foram utilizados mais de um diâmetro de eletrodo de acordo com a aplicação. Os diâmetros de eletrodo usados foram 4,0, 4,8 e 6,35 mm.

Quanto ao ângulo de afiação do eletrodo usou-se o de 40° para todos os testes. Em todos os ensaios aplicados em juntas o eletrodo utilizado foi o de 6,35 mm, somente em ensaios de caracterização do processo usaram-se os outros diâmetros citados.

Quanto ao perfil geométrico, houve casos em que o mesmo foi aplicado em formato pontiagudo ou com truncamento de 1,00 ou 2,00 mm. Quando utilizado com truncamento, a medição da ponta do eletrodo para conferir o diâmetro foi feito por meio de um paquímetro digital do fabricante Mitutoyo® com resolução de 0,01 mm. O diâmetro do truncamento era considerado adequado até uma variação de 0,02 milímetros para mais ou para menos. A Figura 3.17 mostra uma representação esquemática de um eletrodo utilizado na soldagem de junta tipo aresta na posição horizontal. As dimensões do diâmetro do eletrodo e truncamento estão em milímetros e o ângulo de afiação está em graus.

Figura 3.17 - Representação esquemática de um eletrodo com truncamento de 2 mm utilizado na soldagem de junta de aresta.



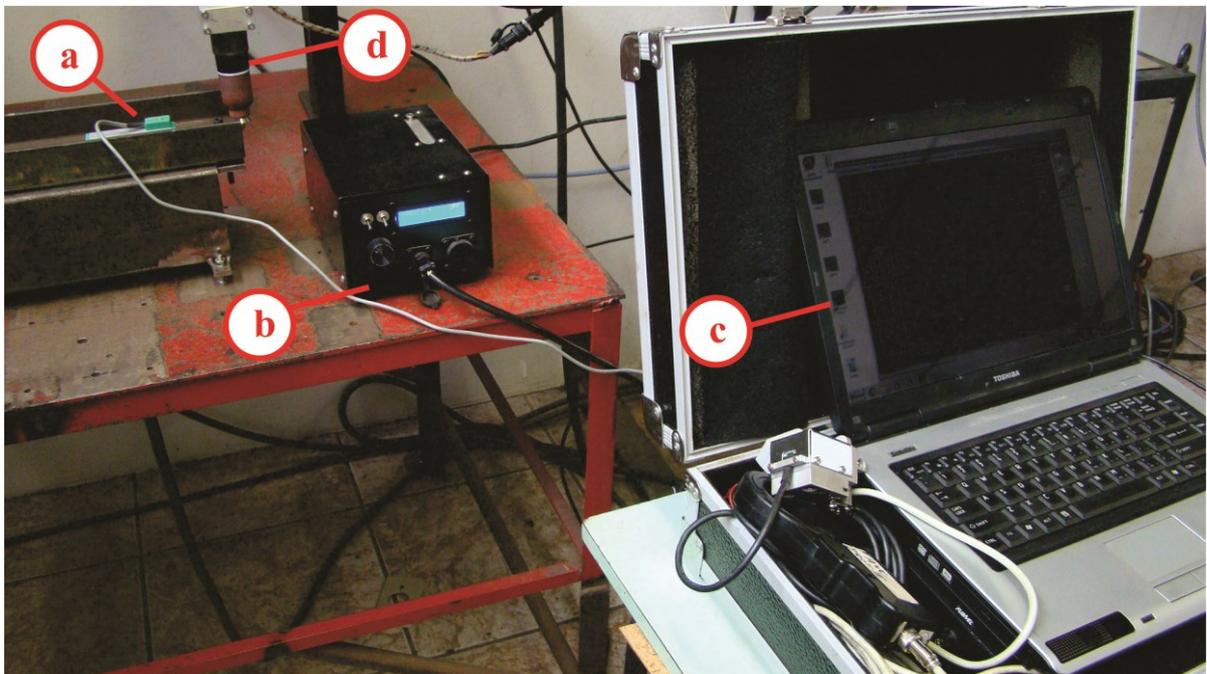
Fonte: o próprio autor.

3.3.4 Aferição da Frequência do Módulo de Controle

Antes de iniciar os ensaios com a aplicação da técnica *switch back* foi necessário aferir o módulo de controle. Esta aferição objetivou verificar se o valor da frequência selecionada no equipamento era o mesmo valor reproduzido no módulo de oscilação da tocha. Para a realização do ensaio foi utilizada uma bancada (Figura 3.18) composta pelo sistema de oscilação (módulos de controle e de oscilação), o medidor de deslocamento linear e o sistema de aquisição portátil SAP.

Definiu-se a faixa de frequências a ser medida entre 0,5 a 12 Hz. Escolheu-se esta faixa porque os valores abrangem a faixa de frequências que será aplicada nas juntas pré-definidas. Espera-se poder empregar o *switch back* na faixa de 4 a 8 Hz. As medições foram todas realizadas com incremento de 0,5 Hz em escala crescente. Já as amplitudes reguladas no módulo de oscilação foram de 4, 6, 8, 10 e 12 mm, também nessa ordem. Esta regulagem foi feita com um paquímetro digital para melhor visualização e garantia da medida selecionada, eliminando-se assim também a presença do erro de *Paralaxe* existente no paquímetro convencional.

Figura 3.18 - Imagem da bancada de ensaios para aferição da frequência. Em (a): medidor de deslocamento linear, em (b): módulo de controle, em (c): Sistema de Aquisição Portátil – SAP V0 e; em (d): tocha de soldagem.



Fonte: o próprio autor.

Quanto ao ponto de medição, considerou-se que o mais adequado para se realizar as medições de deslocamento do módulo de oscilação fosse o mais próximo possível da extremidade da tocha, idealmente, na ponta do eletrodo. Porém, o formato curvilíneo do eletrodo faria com que a ponta do medidor de deslocamento linear ao tocar a sua superfície escorregasse, impossibilitando assim a execução dos ensaios. Para corrigir essa limitação e permitir que os ensaios pudessem ser realizados na ponta da tocha um gabarito de mesmo diâmetro do eletrodo (6,35 mm) foi utilizado (Figura 3.19). Esse gabarito apresenta a vantagem de possuir uma extremidade planificada, desta forma permitindo melhor contato da ponta do sensor com a superfície do gabarito, evitando escorregamento.

Figura 3.19 - Imagem do gabarito usado para aquisição de dados na ponta da tocha.



Fonte: o próprio autor.

O medidor de deslocamento linear foi fixado sobre a bancada, de modo a garantir que o sistema de medição permanecesse o mais estável possível para coleta dos dados. Procurou-se também, utilizar uma mesma faixa de medição para a coleta dos dados, a faixa empregada ficou entre 10 a 20 mm do deslocamento da haste do medidor de deslocamento linear (Figura 3.20). Dessa forma, quando o sistema de oscilação encontrava-se em repouso e a ponta do medidor estava em contato com o gabarito, a haste estava recuada em 15 mm. Essa medida preventiva foi tomada em virtude de haver vibrações no sistema que poderiam produzir valores de amplitude maiores que 6 mm. Caso a posição da ponta do medidor de deslocamento se encontrasse sem esse recuo de 15 mm, poderia ocorrer uma ausência de contato deste com a superfície do gabarito fixado à tocha, prejudicando o resultado das medições.

O medidor de deslocamento foi conectado ao Sistema de Aquisição Portátil SAP V0. Foi necessária a utilização do SAP V0 porque somente esse equipamento possui um canal calibrado para utilização do medidor de deslocamento linear. O canal utilizado em questão é o da vazão de gás.

Após o módulo de oscilação entrar em movimento pelo acionamento do módulo de controle na frequência estabelecida, é necessário aguardar um período de tempo de aproximadamente 5 segundos para que o módulo de oscilação se estabilize na frequência selecionada para o ensaio. Isso ocorre devido à existência de uma rampa de aceleração no motor de passo, o que faz necessário um período de tempo para que o módulo de oscilação entre em regime na frequência desejada.

Figura 3.20 - Posicionamento do medidor de deslocamento linear em relação ao gabarito da tocha de soldagem.



Fonte: o próprio autor.

Depois do módulo de oscilação estar completamente em regime de acordo com a frequência selecionada, iniciou-se a aquisição dos dados através do SAP. O tempo total de aquisição foi de 60 segundos para todas as frequências.

Através dos dados foi possível gerar gráficos para calcular a frequência do módulo de oscilação. Para os cálculos foram selecionadas 20 oscilações a partir de 10 segundos de aquisição. Para calcular a frequência foi necessário primeiramente encontrar o período para uma oscilação de onda. O período de uma oscilação por sua vez, foi conseguido através da média de 20 oscilações. O resultado final da frequência foi obtido pela média entre cinco medições, sendo cada medição, correspondente a uma amplitude diferente entre as propostas.

Os valores obtidos para as frequências reais na ponta da tocha, a plotagem dos gráficos e a comparação com os valores selecionados, encontram-se no capítulo de desenvolvimentos realizados no item 4.3 intitulado Aferição do Sistema de Oscilação.

3.3.5 Aferição da Amplitude no Módulo de Oscilação

Semelhante ao procedimento realizado para a aferição da frequência, também foi realizada a comparação entre os valores de amplitudes reguladas no módulo de oscilação com os valores reais obtidos. As amplitudes reguladas para o estudo foram de 4, 6, 8, 10 e 12 mm. Aqui o objetivo foi verificar se para uma determinada amplitude regulada (6 mm, por

exemplo) ao se aumentar o valor da frequência, ocorreria uma variação no valor da amplitude. Havendo diferença entre os valores de amplitudes reguladas e executadas, também se buscaria examinar se essas diferenças eram iguais para todas as faixas de amplitude. O mesmo ensaio foi realizado com o robô antropomórfico REIS modelo RV-15 para efeito de comparar a rigidez com o manipulador Tartilope V2 da SPS. Porém, nesse caso estabeleceu-se uma única amplitude para comparação. A amplitude selecionada foi de 8 mm.

Os valores obtidos, gráficos plotados e a comparação das medições entre o robô antropomórfico REIS RV-15 e o Tartilope V2 do fabricante SPS encontram-se no capítulo de desenvolvimentos realizados.

3.3.6 Ensaios de medição de tensão na junta de aresta e sobre a placa de cobre.

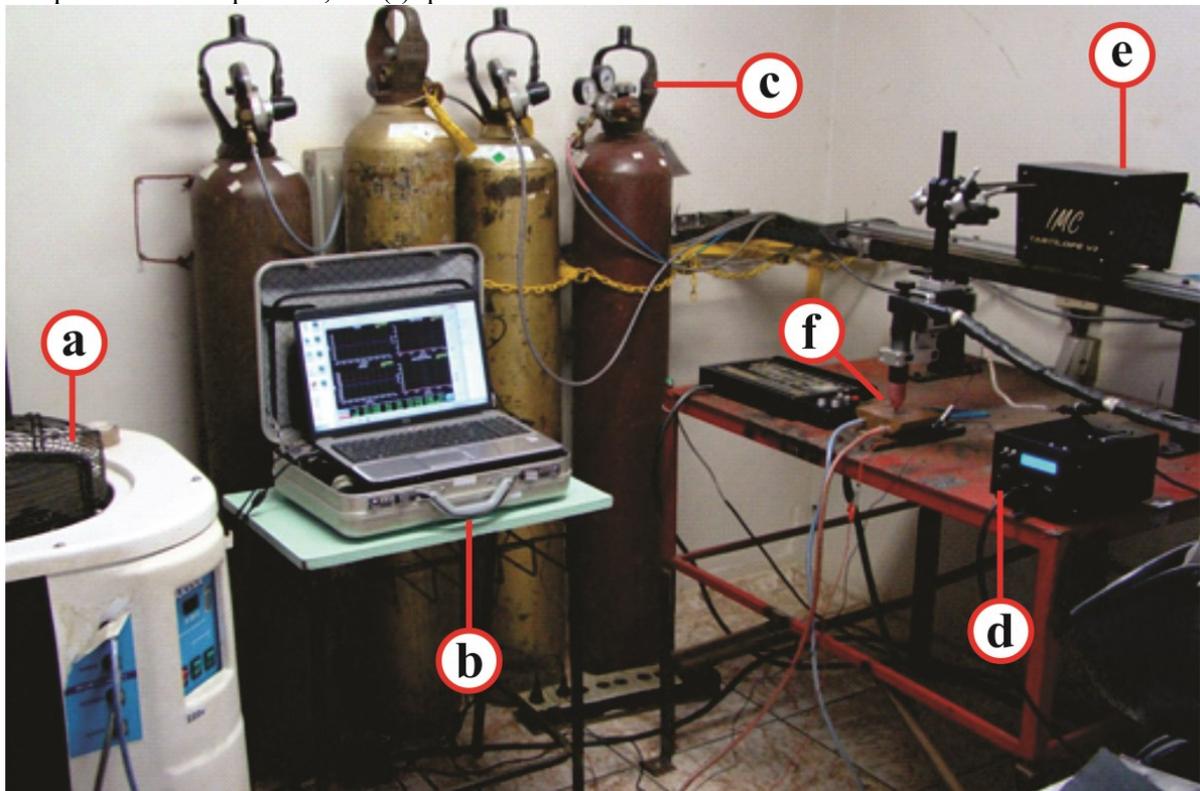
Na fase inicial da soldagem dos corpos de prova tipo junta de aresta, sem gap e com uso do *switch back*, notou-se uma folga no módulo do sistema de oscilação da tocha. Este módulo refere-se ao dispositivo mecânico onde está acoplada a tocha de soldagem. Esta folga era facilmente percebida quando o conjunto estava estacionário, ou seja, não havia operação de soldagem e o módulo estava desligado (não havia movimento oscilatório). O módulo apresentava uma folga que permitia a movimentação da tocha indo contra a junta, diminuindo a distância eletrodo peça. Esta folga foi medida em $1,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Este módulo apresentava apenas uma guia e foi o protótipo com o qual se iniciaram as primeiras soldas. Caso estivesse ocorrendo uma variação brusca da DEP, esta estaria aumentando ou reduzindo a pressão do arco sobre a poça de fusão, modificando a sustentação da poça pelo arco sobre a junta e, conseqüentemente, produzindo gotejamento de material líquido fundido.

Para verificar se, ocorria uma movimentação da tocha em direção à junta de soldagem por motivo da folga existente no mecanismo do oscilador, foi necessário coletar o sinal de tensão deste oscilador que apresentava apenas uma guia e compará-lo com outro oscilador de duas guias, que visivelmente apresentava maior rigidez. Utilizou-se o mesmo módulo de controle em ambos os ensaios. O módulo de controle é o dispositivo onde são reguladas as frequências de oscilação. A Figura 3.21 ilustra as imagens dos módulos dos osciladores utilizados para comparação.

A entrada e saída da placa de cobre são conectadas a unidade de refrigeração por mangueiras. A placa de cobre é fixada sobre uma chapa metálica de aço carbono especificação SAE 1020 de dimensões 100 mm x 200 mm x 9,5 mm. O conjunto da placa de cobre com a chapa de apoio é fixado sobre a bancada de trabalho. O cabo terra é conectado

passando pela bancada e pela chapa de apoio e fixado com parafuso e porca. Tentou-se, inicialmente, utilizar uma corrente de 300 A, porém nesse patamar o ensaio preliminar marcou a peça de cobre refrigerada e, diante desta situação optou-se por trabalhar com uma corrente menor, de 250 A, que não produziu a marcação na peça. Em todos os testes a corrente utilizada foi contínua constante e foi apenas selecionada na fonte de soldagem, não sendo adquirido o seu sinal pelo SAP-4. A Figura 3.22 mostra a placa de cobre fixada sobre a bancada.

Figura 3.21 - Imagem da bancada de ensaios para coleta do sinal de tensão. Em (a): unidade de refrigeração, em (b): Sistema SAP-4, em (c): cilindro de gás, em (d): módulo de controle, em (e): manipulador Tartilope V2 e, em (f): placa de cobre.



Fonte: o próprio autor.

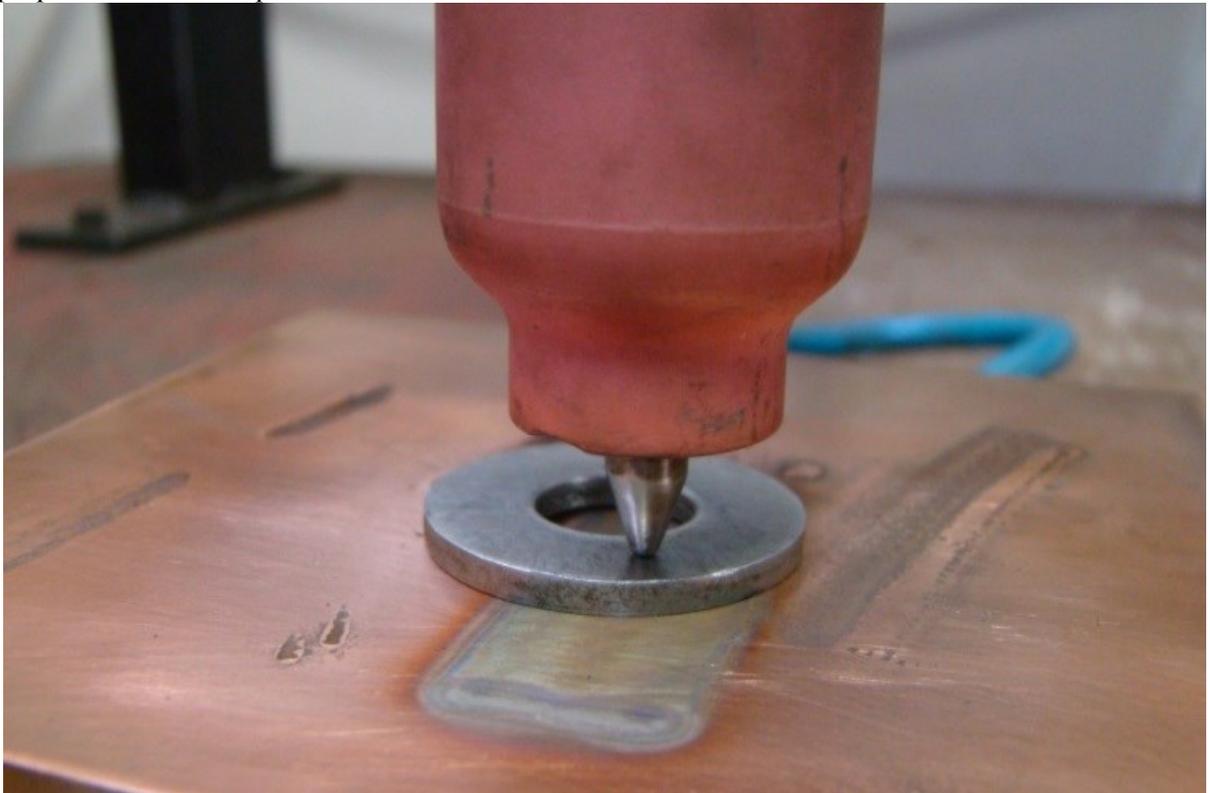
O eletrodo empregado foi o de EWTh-2 com diâmetro de 6,35 mm e ângulo de afiação de 40° com 2 mm de truncamento. A vazão foi medida antes do início dos ensaios com um medidor de fluxo calibrado. Optou-se por este eletrodo, assim como por esta vazão, por serem as mesmas variáveis utilizadas nos ensaios dos corpos de prova. Em todos os ensaios o arco elétrico foi aberto por contato com auxílio de outro eletrodo de igual dopagem, porém com afiação pontiaguda para melhor facilitar a abertura do arco. O ensaio foi realizado na posição plana com a tocha perpendicular a placa de cobre. A DEP foi medida usando um arruela de aço galvanizada com 3 mm de espessura, como ilustra a Figura 3.23.

Figura 3.22 - Imagem da placa de cobre refrigerada com água, fixada sobre a bancada de ensaios.



Fonte: o próprio autor.

Figura 3.23 - Distância eletrodo peça medida com arruela de cobre de 3 mm entre o eletrodo propriamente dito e a placa de cobre.



Fonte: o próprio autor.

Com o sinal da tensão também se desejava averiguar, de maneira genérica, se havia um comportamento no sinal de tensão do arco que fosse único e característico do *switch back*.

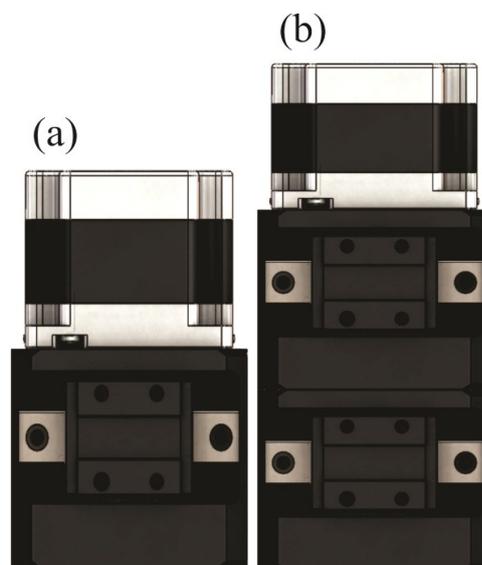
As frequências selecionadas para a realização dos testes foram de 4, 8 e 12 Hz; sendo a frequência a única variável modificada. As outras variáveis adotadas e seus respectivos valores foram: velocidade de soldagem de 150 cm/min, corrente elétrica contínua constante de 280 A. Usou-se o ângulo de ataque da tocha de 45° e o ângulo de trabalho de 0°, a amplitude de oscilação foi de 8 mm, esta amplitude foi regulada com o auxílio e um paquímetro analógico de resolução 0,01 mm. E por fim, empregou-se o argônio como gás de proteção, comercialmente puro, com vazão de 15 l/min. Esta vazão foi aferida com o uso de um fluxômetro devidamente calibrado.

Para aquisição do sinal de tensão do arco utilizou-se o sistema SAP. Os conectores de leitura de tensão foram instalados um na tocha de soldagem e o outro num fio conector pré-disposto entre a base da placa de cobre e a chapa de apoio. Ligando-se os conectores diretamente na tocha e na placa de cobre diminui-se a tendência de aumento da tensão por conta do aquecimento de fios condutores. Para a realização de todos os ensaios foi usada uma tocha TIG automática com capacidade para 500 A. Esta tocha é refrigerada a água e apresenta a vantagem de utilizar *Gas Lens*, componente que possibilita um fluxo mais laminar de gás de proteção. Para a refrigeração da tocha não foi utilizada a mesma unidade de refrigeração da placa de cobre, neste caso, a tocha foi refrigerada pelo sistema de circulação de água da própria fonte de soldagem. Para todos os ensaios foi aguardado tempo suficiente para o resfriamento da tocha. A fonte de soldagem utilizada foi a Digitec 600 do fabricante IMC Soldagem.

As frequências utilizadas nos testes foram 2, 4, 6 e 8 Hz, todas reproduzidas pelo mesmo sistema de oscilação integrado a tocha. Já a amplitude do movimento de tecimento, transversal ao sentido da soldagem, foi mantida em 10 mm para todos os ensaios. Este valor de amplitude foi o selecionado e não o medido, podendo ter sofrido alterações de acordo com as equações anteriormente apresentadas. Por outro lado, na soldagem contínua convencional a tocha permaneceu fixada ao módulo de oscilação, porém este permaneceu desligado. É importante ressaltar que este segundo ensaio não foi realizado especificamente com a movimentação da tocha em *switch back*, pois se desejava verificar também se durante um movimento comum de tecimento a frequência do sinal de tensão do arco reproduzia similar frequência selecionada no módulo de controle. Deram-se início aos ensaios, primeiramente, pela movimentação convencional, sendo posteriormente e, sequencialmente seguidos pelas frequências de 2 a 8 Hz já mencionadas.

O tempo de soldagem aqisitado foi de 60 segundos e, o tempo selecionado para construir os gráficos ficou no intervalo de 45 a 55 segundos. Como a tensão natural do arco leva um período de tempo para estabilizar, adotou-se este intervalo onde a mesma encontra-se estável. Dentro desta faixa de tempo selecionou-se 20 oscilações completas para o cálculo do período e da frequência do sinal de tensão, assim como, para o cálculo da tensão média e do desvio padrão relacionado à mesma. Na sequência, os dados aqisitados por meio do sistema SAP, foram tratados no *software* Microsoft Excel. Como o sinal da tensão apresentava muitos ruídos sendo, portanto, de difícil análise, aplicou-se aos dados coletados um filtro. Este filtro foi aplicado à média ao redor de um determinado dado, 15 valores acima e 15 valores abaixo deste. Desta forma a cada 30 valores constitui-se um único valor que foi plotado no gráfico. A Figura 3.24 apresenta a imagem ilustrativa dos módulos de oscilação com uma e duas guias.

Figura 3.24 - Imagem ilustrativa dos osciladores. Em (a): oscilador com uma guia e; em (b): oscilador com duas guias.



Fonte: Departamento de Projetos dos LABSOLDA.

As frequências foram controladas pelo módulo de controle, também devidamente calibrado e aferido. Primeiramente, acionou-se o disparo da fonte de soldagem e, posteriormente ligou-se o módulo de controle. Foi necessário aguardar alguns segundos para estabilizar o módulo de oscilação na frequência selecionada, isto porque, o referido módulo não atua instantaneamente assim que é acionado, devido à existência de uma rampa de aceleração no motor de passo.

Quanto ao cabo terra, este foi posicionado na região central do suporte de fixação do corpo de prova. O SAP 4 foi utilizado para a aquisição do sinal de tensão, sendo um conector preso a tocha de soldagem e o outro conector fixado no cabo terra.

O tipo de junta utilizada nos ensaios foi de aresta e a posição de soldagem horizontal. O posicionamento do corpo de prova no suporte da bancada foi mantido de modo que a chapa de 2,0 mm ficasse na parte superior da junta. A razão para isto é que esta junta estava sendo estudada para aplicação em um produto industrial.

A movimentação da tocha foi realizada pelo robô antropomórfico REIS modelo RV-15. Neste caso, a movimentação responsável pela velocidade de soldagem era realizada pelo robô antropomórfico, enquanto que, o tecimento *switch back* era feito pelo sistema de oscilação.

Para calcular a variação do sinal da tensão em torno da tensão média, foi realizada a média do sinal de tensão para 20 ciclos na crista da onda e também para 20 ciclos no vale. Em seguida subtraiu-se o valor médio encontrado nas cristas pelo valor médio encontrado nos vales. Para os dois osciladores foram aplicados a técnica de filtro pela média. Esta técnica consiste em selecionar uma determinada quantidade de valores e realizar a média dos mesmos. Cada média obtida torna-se um novo ponto, que posteriormente é plotado no gráfico. Este tipo de filtro é muito utilizado quando os dados plotados em um gráfico apresentam uma quantidade grande de ruídos que impedem uma melhor interpretação, análise e conclusão dos resultados. Nos testes realizados não houve repetição dos ensaios. A Figura 3.25 mostra a preparação da bancada para a realização destes ensaios.

Figura 3.25 - Montagem da bancada para os ensaios de aquisição do sinal de tensão.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para filmagem do arco com a câmera de alta velocidade.

Descrição dos Parâmetros	Quantificação dos Parâmetros
Taxa de Aquisição	2000 quadros por segundo
Tempo de Exposição	10 microssegundos
Área de Aquisição	1016 x 720 pixels
Taxa de Amostragem	20000 amostras por segundo
Número de Amostras por Quadro	10

Os cálculos foram realizados fazendo-se a subtração do valor da DEP no início da reversão com o valor da DEP no início do avanço. Estas medições foram repetidas de acordo com o número de eventos disponíveis para a filmagem de cada vídeo. Como o tempo de filmagem foi o mesmo em cada ensaio, para os ensaios com frequências mais altas foi possível obter mais valores médios do ensaio analisado. Somente para os ensaios com 4, 6 e 8 Hz é que conseguiu-se realizar 4 medições, para o ensaio de 2 Hz somente foi possível obter 2 medições pelas razões já explicadas.

3.3.7 Metodologia para Análise do Perfil de Penetração Longitudinal

Para se fazer essa verificação foram cortados tres corpos de prova referentes à aqueles utilizados para os ensaios de caracterização da técnica *switch back*. Os corpos de prova escolhidos foram: 1 Hz com 4 mm, 1 Hz com 8 mm e 5 Hz de frequência com 4 mm de amplitude. A razão desta escolha foi verificar o perfil de penetração tanto com uma variação de frequência como para uma variação de amplitude, sendo que nenhum dos corpos de prova selecionados apresentava *humping*.

Os corpos de prova foram seccionados transversalmente entre as posições 90 e 140 mm, totalizando um comprimento de 50 mm. Posteriormente, os mesmo foram seccionados no sentido longitudinal de formação do cordão de solda. Houve o cuidado de posicionar a lâmina da serra fita ao lado do risco central do cordão, de modo que apenas uma lado do corte fosse analisado e representasse realmente a metade do cordão para não prejudicar a análise da penetração.

3.3.8 Metodologia de Filmagem da Poça de Fusão em Alta Velocidade

Sequencialmente, para estudar o comportamento da poça de fusão com aplicação da técnica *switch back*, utilizou-se uma filmagem realizada com a câmera de alta velocidade (Figura 3.26). Os dados da filmagem encontram-se na Tabela 3.4.

Figura 3.26 - Imagem da bancada de ensaios para execução da filmagem com a câmera de alta velocidade das soldas sobre chapa com o switch back.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para filmagem da poça de fusão com a câmera de alta velocidade.

Descrição dos Parâmetros	Quantificação dos Parâmetros
Taxa de Aquisição	1000 quadros por segundo
Tempo de Exposição	7 microssegundos
Área de Aquisição	1016 x 720 pixels
Taxa de Amostragem	20000 amostras por segundo
Número de Amostras por Quadro	10

3.3.9 Ensaios de caracterização do *Switch Back*

O processo de soldagem utilizado para a caracterização dos ensaios com o *switch back* foi o TIG autógeno. A comparação se deu entre uma soldagem convencional, em que a tocha se deslocou apenas em um único sentido e, múltiplos ensaios realizados com o modo de oscilação, onde houve avanço e reversão da mesma. A velocidade de soldagem empregada foi de 20 cm/min, juntamente com uma corrente contínua constante de 250 A. Os tempos de subida e de decida da corrente foram ajustados no *display* da fonte em 3 segundos.

O corpo de prova foi fixado sobre um suporte rígido (Figura 3.27), porém para evitar que o aquecimento do suporte pudesse interferir nos resultados quando uma chapa fosse substituída por outra, se utilizou um corpo de prova auxiliar em temperatura ambiente embaixo do corpo de prova que estava sendo soldado. Este corpo de prova que servia de sustentação era sempre substituído por outro a cada ensaio realizado. Dessa forma eliminou-se

a influência térmica, que ocasionaria maior penetração e, o calor gerado pela soldagem foi distribuído da mesma forma em todas as situações. Outro detalhe importante foram os pontos de fixação do corpo de prova para impedir sua movimentação durante a soldagem. Ao invés de utilizar fixadores metálicos, optou-se pelo uso de pequenas peças retangulares de Celeron (material de alta resistência e bom isolante elétrico), desta forma, contribuindo para que o fluxo de corrente para o cabo terra tivesse o mesmo caminho preferencial. A ausência de pontos metálicos de contato com o corpo de prova é uma das formas de evitar desvio do arco e, conseqüentemente que os resultados da soldagem possam ser influenciados por esse fenômeno. A Figura 3.27 mostra com detalhe a fixação do corpo de prova no suporte da bancada.

Figura 3.27 - Fixação do corpo de prova no suporte da bancada, utilizando peças de Celeron.



Fonte: o próprio autor.

Como uma maneira de padronizar os ensaios, os mesmos foram realizados na posição plana com a tocha formando ângulo de 90° em relação à peça. A regulagem deste ângulo foi efetuada com auxílio de um goniômetro.

A vazão foi mensurada com auxílio do MVG-3 e conferida com um fluxômetro de bocal devidamente calibrado. O pré-gás e o pós-gás foram regulados em 3 segundos e 10 segundos, respectivamente. Buscou utilizar um pós-gás com tempo maior em razão de melhor refrigeração e proteção do eletrodo ainda quente, dessa forma reduzindo oxidações em sua superfície cônica.

Foram escolhidos 3 valores de amplitude e 6 valores de frequência. As amplitudes utilizadas foram de 4, 8 e 12 mm; já as frequências foram de 1, 2, 4, 5, 6 e 8 Hz. Na literatura não são encontradas informações sobre a caracterização do *switch back* em frequências de 1 e 2 Hz. Por ser um ensaio que visa padronizar o estudo da técnica *switch back*, foi necessário contemplar as baixas frequências. Para efeito de melhor análise estatística foi repetido 3 vezes o ensaio para cada cordão de solda, inclusive para o cordão do ensaio convencional.

A abertura do arco foi realizada por contato, utilizando-se um eletrodo de igual diâmetro para abrir o arco elétrico entre o eletrodo fixado na tocha e o corpo de prova. Assim que o arco era aberto acionava-se a movimentação da tocha pelo Tartilope, portanto não era esperada a formação de uma poça de fusão inicial.

Após programar os pontos de início e fim da soldagem com o auxílio do manipulador Tartilope V2, habilitava-se a fonte de soldagem e acionava-se o disparo que abria a tensão em vazio e liberava a saída de gás na tocha. Em seguida, (quando da soldagem com o *switch back*), acionava-se a oscilação da tocha no módulo de controle e aguardavam-se cerca de 5 segundos até o módulo de oscilação entrar em regime. Após abria-se o arco e acionava-se a chave de comando no teclado do Tartilope para possibilitar a movimentação da tocha. Ao término da soldagem interrompia-se primeiramente o arco elétrico e posteriormente a movimentação do módulo mecânico de oscilação, encerrando o processo. Os ensaios foram realizados de maneira totalmente aleatória de modo que não se pudesse estar aprendendo com o experimento, evitando assim ser tendencioso na análise.

Após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram cortados nas posições 110, 120 e 130 mm. Escolheram-se essas regiões em função de se esperar que do meio para o final do corpo de prova, o mesmo já se encontrava pré-aquecido quando iniciada a soldagem e, a quantidade de material fundido ou de profundidade de penetração fosse maior, facilitando assim as análises.

Em seguida realizou-se o ensaio metalográfico macroscópico. Primeiramente, as amostras foram lixadas com lixas d'água com granulometria nº 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 sequencialmente. Foi alternada a posição da amostra em relação à lixa para cada granulometria, dessa forma aumentando a taxa de remoção dos riscos da peça com a utilização da lixa subsequente. O lixamento das amostras foi realizado por uma politriz de bancada em rotação de 300 rpm (revoluções/minuto).

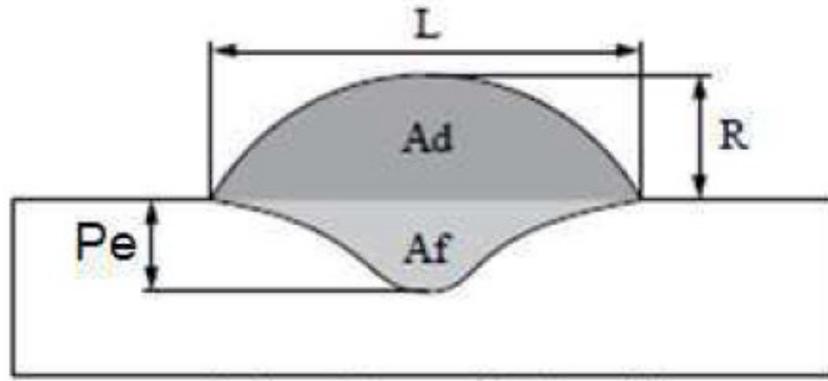
Posteriormente, fez-se o polimento com suspensão aquosa de alumina e o ataque químico com solução de Nital com 2% de concentração por um tempo de 5 segundos, depois lavado com detergente neutro, molhado com álcool etílico comercial e secado. E por fim,

passou-se verniz tipo fosco nas amostras para evitar oxidação. As amostras foram fotografadas em estereoscópio e a medição dos parâmetros geométricos da seção transversal de cada cordão feita em software. O software utilizado para edição e medição das imagens das amostras foi o *Image J*[®] (versão *freeware*). Este software é calibrado de acordo com a quantidade de pixels (pontos/polegada ao quadrado) que a imagem apresenta em uma medida de comprimento especificada pelo usuário. Neste caso há duas possibilidades, uma é utilizar uma escala na própria amostra e a outra é conhecer uma medida pré-definida no corpo de prova, como por exemplo, a sua espessura. No caso deste trabalho utilizou-se a espessura do corpo de prova (9,525 mm) em todas as imagens. Após a calibração do software e a escolha a unidade de medida (mm), foi possível obter os valores de penetração, largura e área fundida de cada amostra.

Os dados obtidos do software de edição de imagens foram exportados para um software de planilhas e gráficos (MS Excel). Com valores obtidos nas posições 110, 120 e 130 mm do corpo de prova realizou-se o cálculo da média e, os dados da soldagem em modo convencional foram comparados graficamente com os do *switch back*. Ressalta-se que nos cordões que apresentaram *humping* em uma das posições de 110, 120 e 130 mm, realizou-se uma média de 3 cortes no corpo de prova. Porém nos cordões que não apresentaram *humping*, realizou-se apenas a média de 2 cortes, nas posições 110 e 120 mm.

Já com relação à forma pela qual se mediu a penetração, largura e a área fundida cabem uma elucidação. Traçou-se uma linha horizontal tangente à superfície da chapa e, perpendicularmente a esta uma linha vertical. A distância desta linha vertical, que vai da linha horizontal tangente à superfície da chapa até o ponto máximo de fusão da amostra, é denominado de penetração. Todo o material que fundiu acima da linha horizontal tangente à superfície da chapa é conhecido como reforço. Já a área fundida é toda a área acima ou abaixo da linha da chapa que produziu fusão. A Figura 3.28 ilustra o que é considerado a penetração, área fundida e reforço de uma solda.

Figura 3.28 - Parâmetros dimensionais de um cordão de solda. Onde as siglas representam (L): largura, (R): altura do reforço, (Pe): penetração total, (Af): área fundida e; (Ad): área depositada.



Fonte: referência [24].

Outro detalhe importante, é que mesmo que a região fundida abaixo da linha horizontal da chapa não esteja preenchida de material, esta região é mensurada como área fundida. Pode ser que esta região tenha sofrido *humping* ou *tunneling* (um tipo específico de *humping*) e o material que ali se encontrava inicialmente fundiu, deslocando-se para outra região do cordão de solda, possivelmente, formando protuberâncias. Portanto, para que este material tenha se deslocado, o mesmo o fez na fase líquida, o que significa que houve fusão.

3.3.10 Metodologia de soldagem das juntas de aresta

Antes de descrever especificamente a metodologia dos ensaios de soldagem em junta de aresta, alguns detalhes ainda merecem explicações.

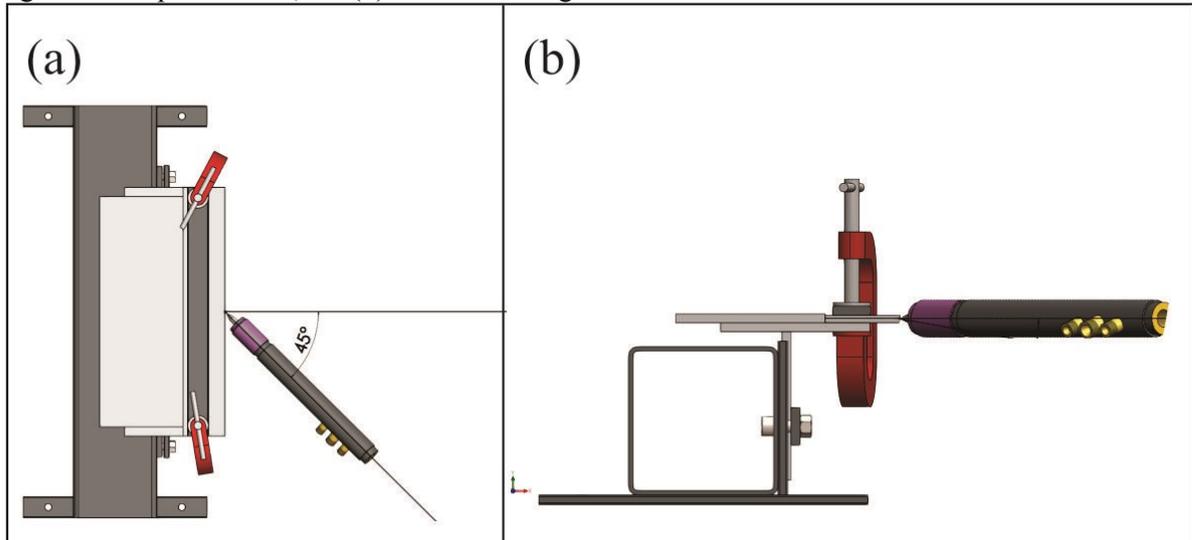
Com relação ao truncamento do eletrodo foi usado com 2 mm de diâmetro, em virtude de que com 1 mm de diâmetro as quinas das chapas que constituem a junta ficavam sem fundir completamente. Isso ocorria porque o arco não tinha uma largura suficiente para abranger toda a junta. A Figura 3.17 citada anteriormente mostra as dimensões do eletrodo utilizadas neste ensaio.

Quando se faz referência ao posicionamento da tocha é preciso diferenciar os ângulos a que se faz menção. Na soldagem dos corpos de prova na posição horizontal se utilizou dois ângulos: o de ataque e o de trabalho. O ângulo de ataque é aquele formado no plano horizontal pela inclinação da tocha com a junta, já o ângulo de trabalho é formado no plano vertical entre a referida tocha e a junta.

Na literatura não é encontrado nenhuma terminologia que nomeie e conceitue o “ângulo de trabalho” (inclusive buscas feitas nos materiais da FBTS nada revelam), porém em

uma linguagem coloquial de campo os soldadores assim se referem quando tratam desta angulação. A Figura 3.29 (a) e Figura 3.29 (b) mostram respectivamente, o ângulo de ataque e o ângulo de trabalho. Neste estudo o ângulo de ataque foi mantido sempre em 45° enquanto o ângulo de trabalho ficou em 0° .

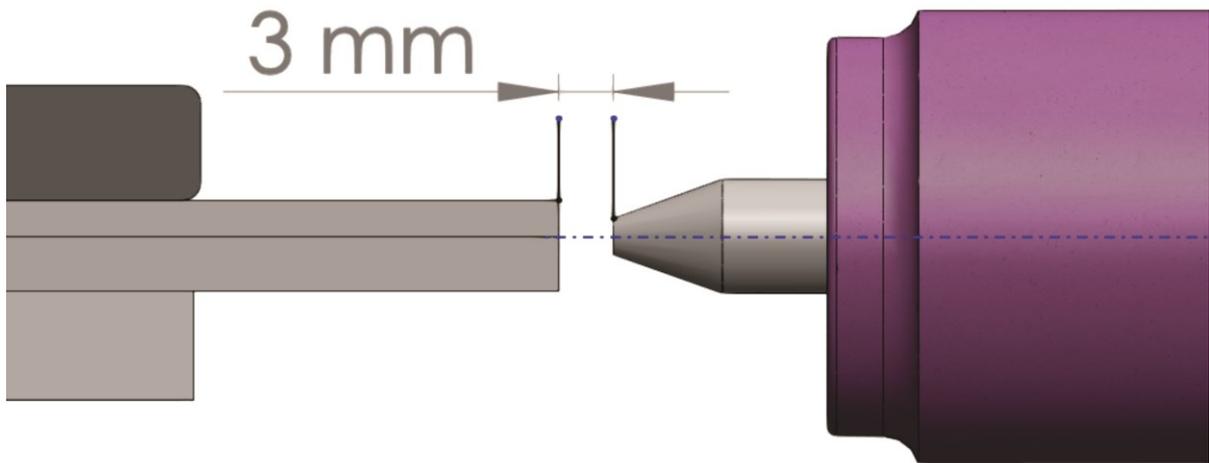
Figura 3.29 - Desenho representativo dos ângulos de posicionamento da tocha. Em (a): tocha com ângulo de ataque de 45° e, em (b): tocha com ângulo de trabalho de 0° .



Fonte: o próprio autor.

Este posicionamento foi perfeitamente alinhado o centro do eletrodo com o centro da linha da junta que marca o encontro da chapa de 2 mm com a chapa de 3 mm. Isto era feito porque produzia maior sustentação da poça de fusão na junta. Caso a posição fosse mais próximo da quina da chapa de 2 mm, a quina da chapa de 3 mm não fundia, o mesmo ocorria quando se posicionava o centro do eletrodo da linha central da junta para baixo, a chapa de 3 mm era fundida e borda da chapa de 2 mm não; com uma diferença em relação a primeira condição, neste último, ocorria uma grande quantidade de gotejamento da poça. A Figura 3.30 ilustra a distância eletrodo peça empregada e o posicionamento do eletrodo relativo à junta.

Figura 3.30 - Distância eletrodo peça de 3 mm e posicionamento relativo do centro do eletrodo à linha central da junta tipo aresta.



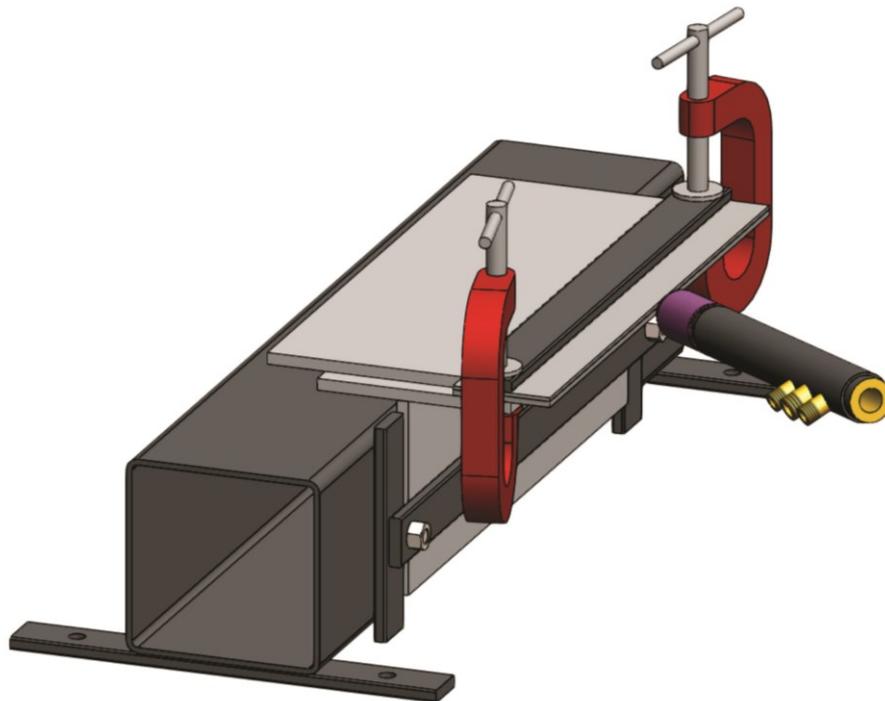
Fonte: o próprio autor.

O suporte onde o corpo de prova foi fixado é composto de uma adaptação de um suporte pré-disposto para soldagem de uma junta sobreposta. Esta adaptação consiste em duas chapas de aço soldadas em formato T fixadas nesse suporte. Desta maneira consegue-se posicionar o corpo de prova deitado sobre estas chapas em formato T, permitindo assim a soldagem na posição horizontal.

Sobre as chapas em formato T ainda foi soldado uma contra chapa para fornecer o alinhamento com o eixo (X) do Tartílope, garantindo assim que a DEP de 3 mm fosse respeitada. Visualizando-se a Figura 3.31 pode-se observar o modelo do suporte utilizado nestes ensaios.

Encerrando a descrição da metodologia de preparação dos ensaios, o corpo de prova foi fixado com uma barra chata apertada por dois grampos de 2 in de abertura, desta forma impedindo que durante a soldagem por aquecimento do mesmo este empena-se, ocasionando consequentemente desvio de posicionamento do arco em relação a linha da junta.

Figura 3.31 - Desenho representativo do suporte com a fixação do corpo de prova para realização da soldagem em uma junta tipo aresta.



Fonte: o próprio autor.

Já com relação ao procedimento para a realização dos ensaios propriamente ditos, a seguinte metodologia foi adotada: os testes deram início com a soldagem convencional. Nesta fase era arbitrada uma velocidade de soldagem e selecionada uma determinada corrente. Caso ocorresse falta de fusão da junta, a corrente de soldagem era aumentada com incrementos de 10 A, até o ponto onde se obtivesse um resultado adequado. Por outro lado, se ocorria gotejamento (expulsão de material da poça), a corrente era diminuída com decrementos de 10 A até se conseguir o resultado desejado. Quando se conseguia obter um bom resultado para uma determinada velocidade de soldagem, buscava-se uma repetir este ensaio por mais duas vezes para validá-lo. Caso a validação fosse positiva, buscava-se aumentar a velocidade de soldagem com incrementos de 10 cm/min, buscando-se também encontrar a melhor corrente para essa nova V_s , e os testes eram reiniciados.

Posteriormente, programava-se a técnica *switch back*. A aplicação da técnica *switch back* tinha duas finalidades, a primeira, da repetibilidade e, a segunda de se conseguir obter um resultado favorável nos testes onde o modo convencional por ventura falha-se.

Quando da aplicação do movimento *switch back*, procurou-se empregar a mesma corrente de soldagem utilizada no modo convencional. E no que se refere às variáveis de amplitude e frequência, as mesmas foram aplicadas do seguinte modo: selecionou-se a

frequência de 5 Hz e amplitude de 8 mm. Os incrementos aplicados para a frequência e amplitude foram de 1 Hz e 2 mm, respectivamente. Dependendo do resultado obtido no teste inicial com os valores de 5 Hz para a frequência e 8 mm para a amplitude, esses parâmetros regulagens. Primeiramente, variava-se a frequência, caso a poça de fusão não fundisse completamente as bordas da junta ou o centro da mesma, aumentava-se a frequência para obter uma poça mais larga. Se por outro lado, ocorre-se gotejamento de material fundido da junta, fazia-se o processo contrário, diminuindo o valor da frequência para se conseguir melhor controle da poça. Após encontrar o melhor resultado na manipulação da variável da frequência, buscava-se um ajuste mais fino selecionando-se a amplitude que melhor atendesse ao experimento.

Estes ensaios tiveram como objetivos estudar a possibilidade de incrementar a produtividade do processo TIG autógeno convencional através da utilização da técnica *switch back* na soldagem de chapas finas, com e sem *gap*, em juntas tipo aresta na posição horizontal.

Os ensaios foram divididos em dois grupos, aqueles realizados sem *gap* na junta e aqueles com o *gap* de 1 mm no centro da junta e, são apresentados no texto nesta sequência respectivamente.

Primeiramente os ensaios foram realizados com o modo convencional, e depois com o *switch back* para efeito de comparação.

Para a realização dos ensaios foram atribuídas três velocidades, a saber, 150 cm/min, 180 cm/min e 200 cm/min. Para cada uma das velocidades foi encontrado por método experimental a corrente elétrica de soldagem que melhor se adequava.

Após a realização das soldas com o modo convencional aplicou-se a técnica *switch back*. Neste caso, manteve-se a mesma corrente elétrica utilizada no modo convencional, para que dessa forma a potência fosse mantida a mesma, possibilitando avaliar apenas o efeito causado pela aplicação da técnica *switch back*.

Para a aplicação da técnica *switch back*, as variáveis de frequência e amplitude também foram arbitradas. Utilizou-se os patamares de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz para as frequências e; 4 mm e 8 mm para as amplitudes. A seguir são apresentados os resultados, o que foi possível observar experimentalmente sobre os mesmos, as análises e a discussão com a literatura pesquisada.

As siglas ou símbolos utilizados nas tabelas para expressar as suas variáveis ou grandezas são:

Vs: Velocidade de soldagem [cm/min];
 Im: Corrente elétrica média, expressa em [A];
 Aa: Amplitude aparente, expressa em [mm];
 Ar: Amplitude real, expressa em [mm];
 f: Frequência de oscilação, expressa em [Hz];
 S: Sobreposição de trajetória, expresso em [%];
 Vmax: Velocidade máxima da tocha, expressa em [cm/min];
 Vmin: Velocidade mínima da tocha, expressa em [cm/min];
 Da: Deslocamento de avanço da tocha, expresso em [mm];
 Dr: Deslocamento de reversão da tocha, expresso em [mm];

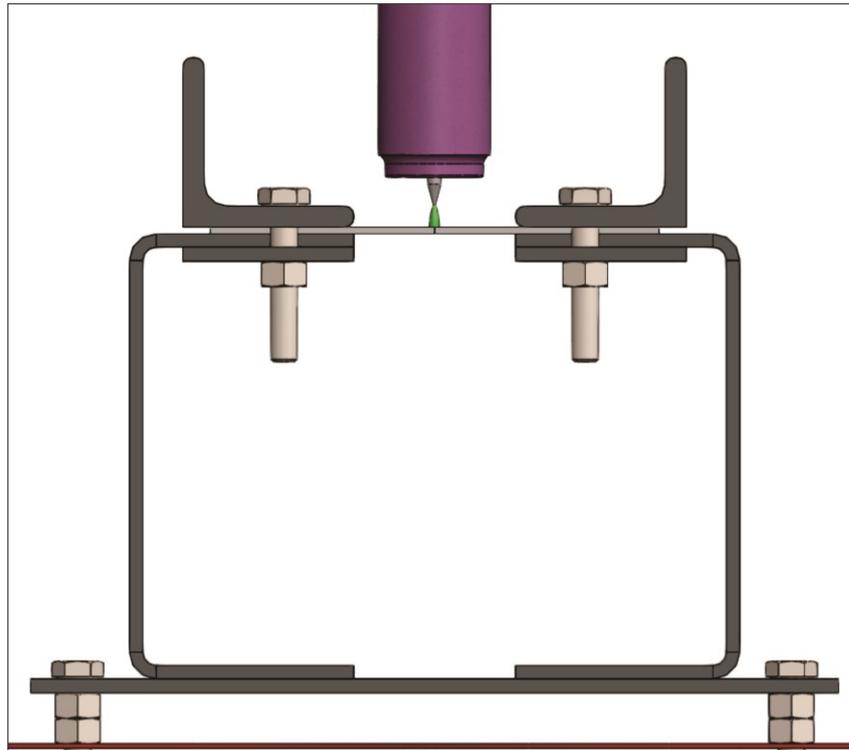
3.3.11 Metodologia de soldagem das juntas de topo

Quanto à metodologia empregada na soldagem das juntas de topo, alguns aspectos foram mantidos os mesmos que os aplicados na soldagem da junta de aresta. Por outro lado, a soldagem das juntas de topo possui algumas características particulares que merecem ser esclarecidas. Mesmo fazendo-se uso da arruela de espessura 3 mm para manter a DEP, tomou-se cuidado para mantabilidade desta variável. Uma vez que o eixo (Z) do Tartilope não possuía movimento vertical, a alteração do valor da DEP poderia ocorrer por duas razões. A primeira, é que há uma variação no aperto dos parafusos do suporte para fixação do corpo de prova quando da substituição de um corpo de prova pelo próximo a ser soldado. Desta maneira, pode haver o afastamento da ponta do eletrodo as chapas, modificando o valor da DEP previamente regulada prejudicialmente. Já a segunda possibilidade, diz respeito ao desgaste do eletrodo, mesmo sendo um processo considerado de eletrodo não consumível, o mesmo sofre alterações geométricas e oxidações com o uso, sendo necessário constantemente refazer sua afiação. Portanto, a verificação da DEP foi feita para todos os corpos de prova, sendo sempre atestada em três pontos, no início, fim e região central do corpo de prova.

Já o suporte utilizado para fixação do corpo de prova, este apresenta um detalhe importante em sua construção, que é o fato de ser vazado (aberto) na sua região central no sentido longitudinal do mesmo. Nesse caso, a soldagem é realizada sem apoio na região do cordão, ou seja, sem *backing*. A largura dessa abertura é de 40 mm, sendo distribuídos durante o posicionamento do corpo de prova em 20 mm para cada lado das chapas que compõem o corpo de prova.

O padrão de comparação dos ensaios realizados com a técnica de tecimento *switch back*, também foi a soldagem convencional autógena. Ambas realizadas nas mesmas condições de igualdade. A Figura 3.32 ilustra a vista frontal do suporte para melhor compreensão de sua construção.

Figura 3.32 - Vista frontal do suporte de fixação dos corpos de prova para soldagem em junta de topo.



Fonte: o próprio autor.

Com relação ao truncamento do eletrodo, especificamente para os ensaios em junta de topo, usou-se com 1 mm de diâmetro.

Estes ensaios tiveram como objetivos estudar a possibilidade de incrementar a produtividade do processo TIG autógeno convencional através da utilização da técnica *switch back* na soldagem de chapas finas, sem *gap*, em juntas de topo na posição plana. Além disso, desejou-se compreender os efeitos da sobreposição sobre o resultado da soldagem, por intermédio da variação da frequência e da amplitude.

Os ensaios foram divididos em dois grupos, aqueles realizados em chapas com espessura de 2 mm e os realizados em chapas de 3 mm, sendo apresentados no texto nessa sequência, respectivamente.

Primeiramente, os ensaios foram realizados com o modo convencional, e depois com o *switch back* para efeito de comparação. A metodologia adotada foi arbitrar uma velocidade de soldagem e combinar junto com a mesma, por experimentação, a corrente elétrica mais adequada para cada ensaio. A velocidade arbitrada para o início dos ensaios foi de 20 cm/min.

Após a obtenção dos resultados com o modo convencional, aplicou-se a técnica *switch back*. Neste caso, manteve-se a mesma corrente elétrica adotada no modo

convencional, para que dessa forma a potência fosse mantida a mesma, possibilitando avaliar apenas o efeito produzido pela aplicação da técnica *switch back*.

Para a aplicação da técnica *switch back*, as variáveis de frequência e amplitude também foram arbitradas. Utilizou-se os patamares de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz para as frequências, todas para uma amplitude de 8 mm. A razão pela qual se decidiu utilizar apenas a amplitude de 8 mm e não de 4 mm conjuntamente é, porque de acordo com os experimentos de caracterização do processo quanto maior a amplitude menor a penetração, como o objetivo da junta é ser soldada sem anteparado na raiz, é necessário um controle da poça para evitar o *burn through*. Em ensaios preliminares verificou-se que a estabilidade do processo era maior com a amplitude de 8 mm do que com 4 mm.

A seguir são apresentados os resultados, o que foi possível observar experimentalmente sobre os mesmos, as análises e a discussão com a literatura pesquisada.

As siglas ou símbolos utilizados nas tabelas para expressar as suas variáveis ou grandezas são os mesmos utilizados nos ensaios realizados com as juntas de aresta, não necessitando repeti-los.

Nestes ensaios, espera-se que com a aplicação da técnica *switch back*, se consiga um cordão de solda com penetração total, boa qualidade de acabamento superficial, repetibilidade, fusão completa da raiz e, principalmente sem ocorrência de *burn through*, além de um aumento de produção pela maior velocidade de soldagem quando comparada ao processo convencional.

4 DESENVOLVIMENTOS REALIZADOS

4.1 EQUACIONAMENTO DA SOBREPOSIÇÃO

Uma possível forma de se estudar e compreender os efeitos resultantes da aplicação da técnica *switch back* sobre a solda produzida é através do percentual de sobreposição. Esta sobreposição está diretamente associada à relação dos movimentos de avanço e reversão que são intrínsecos da própria técnica. A principal característica deste método de movimentação da tocha de soldagem é que ela é composta por duas variáveis adicionais, as saber, a amplitude e a frequência de oscilação, ambas não pertencentes à soldagem TIG em modo convencional. Todavia, a movimentação de tecimento também possui estas duas variáveis, porém no caso do *switch back* a oscilação da tocha ocorre em sentido longitudinal em relação ao cordão de solda, diferindo do tecimento que ocorre em sentido transversal.

A sobreposição depende da combinação das variáveis de velocidade de soldagem, frequência e amplitude. A sobreposição como resultado permite uma análise matemática sob dois aspectos, primeiro, pelo próprio percentual obtido entre a relação do deslocamento de reversão e de avanço da tocha de soldagem e, segundo pela comparação entre a velocidade do módulo de oscilação da tocha e a própria velocidade de soldagem.

Para se obter o percentual de sobreposição faz-se necessário equacionar o movimento combinado da oscilação da tocha (módulo de oscilação) com o movimento que desloca a tocha ao longo da trajetória de soldagem (Tartílope). Cabe ressaltar que quando o *switch back* é empregado por um robô, o mesmo é responsável pelos deslocamentos de avanço e reversão da tocha assim como pela sua movimentação efetiva ao longo da trajetória de soldagem. Neste trabalho deseja-se estudar os efeitos da técnica *switch back*, primordialmente, em altas frequências, e não há um robô de soldagem disponível para essa finalidade, fez-se necessário, portanto, um sistema de oscilação de tocha que permita separar os movimentos de oscilação da mesma do movimento que realiza o seu deslocamento efetivo ao longo da trajetória de soldagem.

Por outro lado, é necessário acrescentar que embora a utilização do robô disponível para a realização do *switch back* esteja limitado a baixas frequências (até 3 Hz), a utilização do mesmo propicia certa vantagem. Durante a programação do movimento de oscilação é possível selecionar os deslocamentos e velocidades para o avanço e reversão da tocha de maneira independente uns dos outros, o que no caso do sistema de oscilação não é possível de

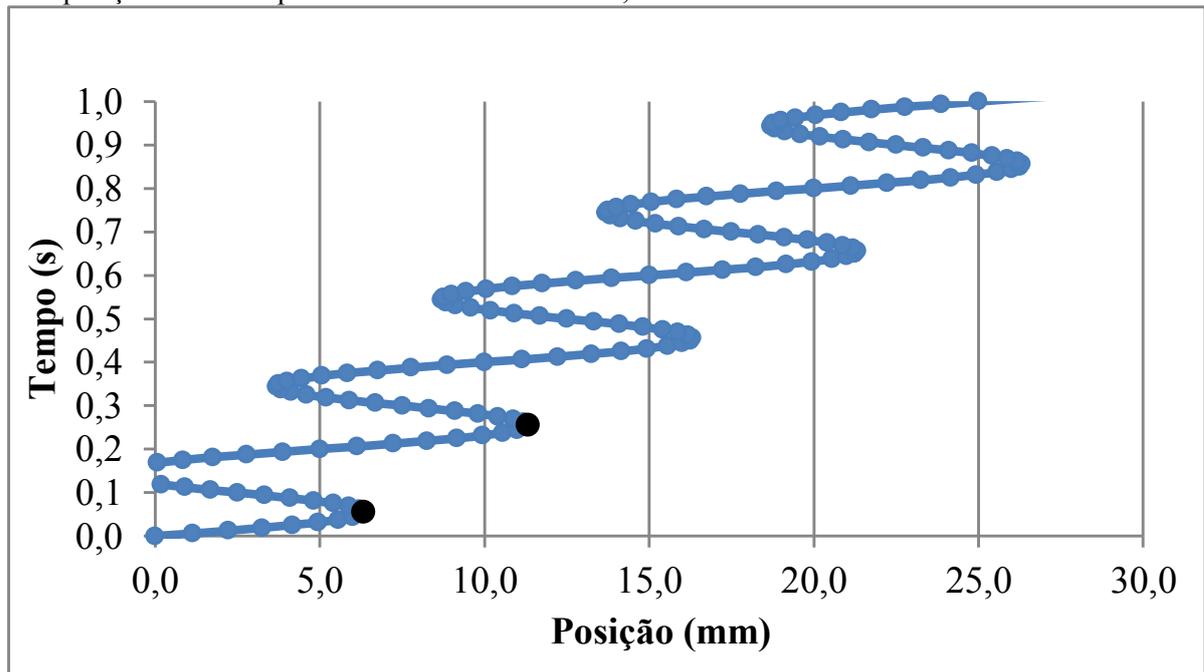
ser feito. Outra forma encontrada na literatura foi selecionando os períodos de avanço e reversão da tocha ao invés das referidas velocidades.

Em virtude da utilização de um sistema de oscilação independente, os deslocamentos de avanço e reversão da tocha ficam dependentes da combinação da frequência e amplitude de oscilação com a velocidade de soldagem selecionada no manipulador. E, quanto à velocidade resultante, esta fica distribuída entre uma mínima e uma máxima, uma vez que por se tratar de um movimento que soma a translação do Tartilope V2 com o senoidal, a mesma muda seu estado constantemente, como será visto mais a seguir no seu equacionamento. A Figura 4.1 ilustra graficamente uma trajetória típica realizada por uma tocha de soldagem quando esta realiza o *switch back* por um sistema de oscilação de alta frequência.

Outro aspecto expressa a razão pela qual o cálculo da sobreposição torna-se relevante. Para uma dada combinação de valores selecionados das variáveis: velocidade de soldagem, amplitude e frequência de oscilação pode ocorrer que o movimento resultante do avanço da tocha seja mais veloz que o mesmo movimento resultante da reversão da mesma. Isso faz com que aparentemente se visualize o método *switch back* sendo empregado, quando na realidade, não há nenhuma sobreposição de cordão ocorrendo. Neste caso não havendo sobreposição, não ocorre *switch back*, em termos matemáticos, o resultado do cálculo da sobreposição retorna um valor negativo. Na falta de terminologia para definir a ocorrência desses casos, o presente trabalho adota o termo pseudo *switch back*. A Figura 4.2 ilustra essa situação para um valor numérico de sobreposição igual zero.

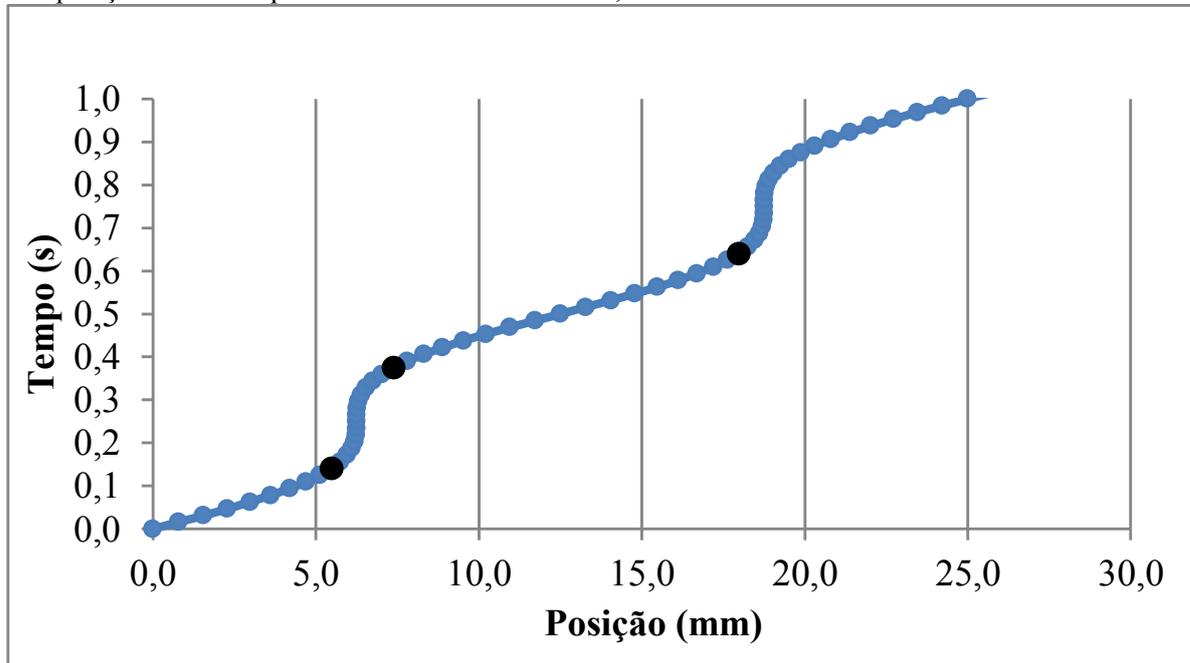
A modelagem matemática para o cálculo da sobreposição foi desenvolvida pela aplicação das equações de mecânica vetorial dinâmica [8], [9].

Figura 4.1 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica *switch back* com sobreposição de 60% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 5$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

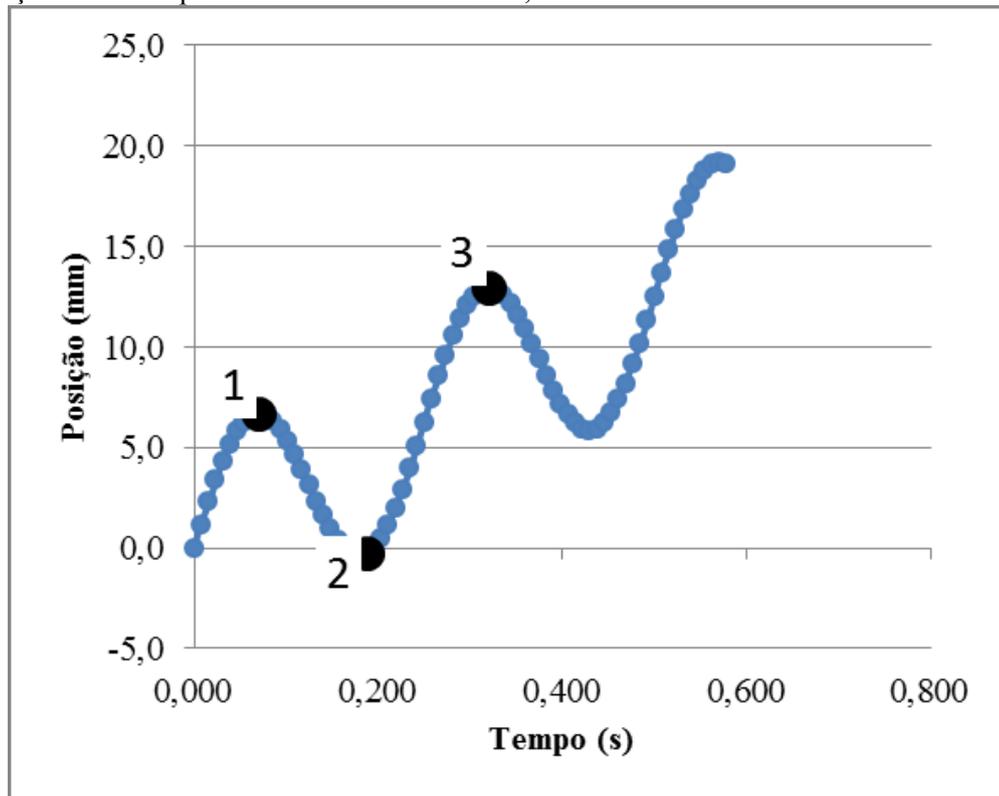
Figura 4.2 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica *switch back* com sobreposição de 60% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 5$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Como dito anteriormente, a sobreposição depende de relação entre os deslocamentos de reversão e de avanço. Para obter os valores desses deslocamentos, primeiramente, é necessário conseguir encontrar as equações de posição para os pontos (1, 2 e 3) próximos da extremidade da onda senoidal na trajetória *switch back*, como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Representação esquemática do movimento da tocha executando a técnica *switch back* com sobreposição de 53% e parâmetros $V_s = 150$ cm/min; $A = 10$ mm e $f = 4$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

A equação geral de posição da trajetória para o *switch back*, sendo esta combinada pelo movimento do módulo de oscilação e pelo manipulador é dada pela equação (4.1). Por esta equação a posição da tocha em relação ao módulo de oscilação pode ser descrita como uma função seno, (uma vez que se trata de um movimento cíclico e periódico em torno de um ponto central), somado ao movimento do manipulador de soldagem (que é expressa pela função do movimento retilíneo uniforme)

$$x(t) = \frac{A}{2} * \text{sen}(\omega t) + V_s * t \quad (4.1)$$

Onde:

$x(t)$ = posição em função do tempo [mm];

A = amplitude do movimento do módulo de oscilação [mm];

sen = função trigonométrica do seno; [rad];

ω = velocidade angular [rad/s];

t = instante de tempo [s];

V_s = velocidade de soldagem [mm/s].

Com base na mecânica vetorial a velocidade angular (ω) pode ser expressa por:

$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

Onde:

f = frequência do módulo de oscilação [Hz];

π = relação matemática entre o comprimento da circunferência e o seu diâmetro, lê-se (pi) [adimensional].

Substituindo-se a equação (4.2) na equação (4.1) tem-se a equação geral da posição (4.3) para o movimento de *switch back* estudado.

$$x(t) = \frac{A}{2} * \text{sen} (2\pi ft) + V_s.t \quad (4.3)$$

Onde:

$x(t)$ = posição em função do tempo [mm];

A = amplitude do movimento do módulo de oscilação [mm];

sen = função trigonométrica do seno [rad];

f = frequência do módulo de oscilação [Hz];

t = instante de tempo [s];

V_s = velocidade de soldagem [cm/min].

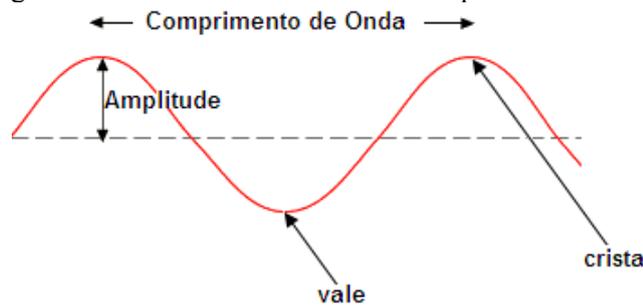
Antes de prosseguir faz-se necessário uma breve explicação sobre o modelamento matemático. É importante salientar que se o movimento resultante da tocha fosse apenas aquele produzido pelo sistema de oscilação, a velocidade teria valor zero no instante de tempo “ t ” onde ocorre a inversão do sentido do módulo de oscilação. Ou seja, supondo que o módulo estivesse avançando (sentido da esquerda para a direita), ao final do avanço a tocha pararia instantaneamente e seguidamente iniciaria o movimento de reversão no sentido contrário do avanço (sentido da direita para a esquerda). No momento da inversão de sentidos a tocha teria uma velocidade resultante igual a zero, portanto os pontos onde a velocidade resultante da tocha é zero estariam exatamente nas extremidades do movimento.

Contudo, em comunhão com o movimento oscilatório do módulo, está também o movimento de avanço do conjunto tocha mais módulo de oscilação. Como já dito, esse movimento que desloca o conjunto é produzido pelo manipulado, exatamente no *display* do qual se seleciona a velocidade de soldagem. Acontece que ao acrescentar o movimento do Tartilope o cenário muda completamente, pois os pontos ou instantes de tempo “ t ”, onde a velocidade resultante é igual a zero não estão mais precisamente nas extremidades do módulo de oscilação, onde ocorre a mudança de sentido de avanço para reversão e vice versa. Isso ocorre, fundamentalmente, porque a velocidade do módulo de oscilação não é constante, ou seja, ela varia de zero em suas extremidades originais até um valor máximo que se encontra no centro do eixo do módulo, exatamente na metade da amplitude regulada. Para explicar melhor como esse fenômeno ocorre vamos utilizar um exemplo: suponhamos que a velocidade de soldagem selecionada no Tartilope seja de 150 cm/min e, que a velocidade

máxima atingida pelo módulo, para uma dada frequência e amplitude, seja 450 cm/min e, ainda que o sentido da soldagem seja da esquerda para a direita, assim como o avanço inicial do módulo de oscilação. A partir deste ponto, o Tartílope desloca-se com velocidade constante de 150 cm/min para a direita e, o módulo de oscilação desloca a tocha avançando, onde a mesma parte do repouso (velocidade zero) passando pelo centro do eixo do oscilador com velocidade 450 cm/min e novamente reduzindo para zero na outra extremidade. Até esse ponto a velocidade resultante da tocha é uma soma das velocidades do Tartílope com a velocidade do módulo de oscilação, porque mesmo que haja uma variação de velocidade do módulo, as duas velocidades estão vetorialmente no mesmo sentido. Porém, algo diferente ocorre quando há a inversão de sentido do módulo de oscilação. Percebe-se que o Tartílope continua a movimentar-se no mesmo sentido (da esquerda para a direita), no entanto o módulo de oscilação faz o sentido inverso (da direita para a esquerda). Nesse caso, a velocidade do módulo inicia novamente do repouso e alcança a velocidade máxima de 450 cm/min, ocorre que para que isso seja possível o módulo passa obrigatoriamente pela velocidade de 150 cm/min, em sentido contrário do Tartílope, fazendo com que neste instante de tempo “t” a velocidade resultante da tocha seja zero. Isso ocorre também quando ao passar pelo centro a velocidade máxima do módulo reduz para zero encerrando o movimento de reversão. Portanto, para cada oscilação do módulo e, dependendo da velocidade de soldagem empregada, esse fenômeno ocorrerá duas vezes, significando que a tocha fica parada. Consequentemente, nas extremidades do movimento do módulo de oscilação a velocidade resultante da tocha terá sempre o valor da velocidade de soldagem propiciado pelo Tartílope. A interpretação correta deste fato faz-se necessária para o modelamento matemático.

Outro aspecto que merece ressalva, é que na equação original da função seno a variável amplitude (A) não é mostrada com denominador 2. Isso ocorre porque sob o ponto de vista matemático, o conceito de amplitude é a distância entre o centro da onda, ou ponto de equilíbrio, (linha tracejada) até o pico ou o vale da mesma, como mostrado na Figura 4.4. Porém, para efeito do *switch back* este e outros trabalhos entendem que a amplitude do módulo de oscilação é a distância entre as duas extremidades da onda, ou matematicamente, a distância entre a crista e o vale da onda. Este mesmo entendimento é aplicado a trabalhos onde se realiza tecimento. Portanto, para que a o modelamento fique correto foi utilizado o artifício da divisão por dois.

Figura 4.4 - Representação gráfica do conceito matemático de amplitude



Fonte: referência [11].

Prosseguindo com o modelamento, para encontrarmos os instantes de tempo onde a velocidade resultante da tocha é igual a zero é preciso derivar a equação geral da posição em função do tempo (4.3) e, dessa forma obter a velocidade resultante em função do tempo equação (4.4). Fazendo esta operação temos:

$$v(t) = [A * \pi f * \cos(2\pi ft) + Vs] * 6 \quad (4.4)$$

Onde:

$v(t)$ = velocidade resultante da tocha em função do tempo [cm/min];

\cos = função trigonométrica do cosseno [rad].

A multiplicação por 6 mostrado na equação (4.4) é para transformar a unidade da velocidade de mm/s para cm/min. Para encontrarmos o primeiro ponto onde a velocidade resultante da tocha é igual a zero, basta isolarmos a variável “t” da equação (4.4), assim obtêm-se a equação (4.5):

$$v(t) = [A * \pi f * \cos(2\pi ft) + Vs] \quad (4.5)$$

$$0 = A * \pi f * \cos(2\pi ft) + Vs$$

$$-Vs = A * \pi f * \cos(2\pi ft)$$

$$\frac{-Vs}{A * \pi f} = \cos(2\pi ft)$$

$$t_1(0) = \left[\frac{\left(\arccos\left(\frac{-Vs}{A * \pi * f} \right) \right)}{2\pi * f} \right] \quad (4.6)$$

A equação (4.6) representa o instante de tempo “t” para o ponto (1) onde a velocidade resultante da tocha é igual a zero. Encontrado esse ponto os demais são de fácil

solução. As equações (4.7) e (4.8) que se encontram a seguir exprimem o mesmo significado que a equação (4.6), apenas sendo destinadas aos pontos (2) e (3), respectivamente.

$$t_2(0) = \frac{\{2\pi - \text{arc. cos}[\frac{-Vs}{A * \pi f}]\}}{2\pi f} \quad (4.7)$$

$$t_3(0) = t_1 + \frac{1}{f} \quad (4.8)$$

Finalmente, basta substituir as equações (4.6), (4.7) e (4.8) na equação geral da posição em função do tempo (4.3). Portanto tem-se que:

$$x(1) = \frac{A}{2} * \text{sen} \left(2\pi f * \text{arc. cos} \frac{\frac{-Vs}{A * \pi f}}{2\pi f} \right) + Vs. \text{arc. cos} \frac{\frac{-Vs}{A * \pi f}}{2\pi f}$$

$$x(2) = \frac{A}{2} * \text{sen} \left\{ 2\pi f * \frac{[2\pi - \text{arc. cos}(\frac{-Vs}{A * \pi f})]}{2\pi f} \right\} + Vs. \left\{ \frac{[2\pi - \text{arc. cos}(\frac{-Vs}{A * \pi f})]}{2\pi f} \right\}$$

$$x(3) = \frac{A}{2} * \text{sen} \left(2\pi f * \text{arc. cos} \frac{\frac{-Vs}{A * \pi f}}{2\pi f} + \frac{1}{f} \right) + Vs. \left(\text{arc. cos} \frac{\frac{-Vs}{A * \pi f}}{2\pi f} + \frac{1}{f} \right)$$

Após encontrarmos as posições em função do tempo para os pontos (1), (2) e (3) da figura 4.3, basta substituí-los na equação (4.9), que é a equação final da sobreposição para o modelamento matemático proposto. O valor da sobreposição em um percentual que representa o quanto a tocha de soldagem sobrepõe durante a reversão sobre uma região que já percorreu durante o avanço da mesma.

$$S = \frac{d_r}{d_a} = \frac{x(2) - x(1)}{x(3) - x(2)} * 100 [\%] \quad (4.9)$$

Onde:

S = sobreposição [%];

d_r = deslocamento de reversão [mm];

d_a = deslocamento de avanço [mm].

Um mesmo percentual de sobreposição pode ser obtido através de diferentes combinações de amplitude e frequência, mantendo-se neste caso, a mesma velocidade de

soldagem. Neste aspecto, alguns questionamentos que vem a tona podem ser estudados, destacando-se entre eles os que seguem:

- a) O mesmo percentual de sobreposição obtido pela combinação de diferentes frequências e amplitudes, produz o mesmo resultado em termos de parâmetros geométricos do cordão de solda;
- b) De acordo com a interpretação da literatura pesquisada, a técnica *switch back* possui a capacidade de controlar melhor a poça de fusão para o passe de raiz, alcançando uma penetração sem perfurações, quando comparado a soldagem convencional. Este fato abre espaço ao questionamento se o parâmetro da penetração sofre efeito por causa da sobreposição ou se isoladamente as variáveis de frequência e amplitude é que tem maior significância para controlar o resultado.
- c) Existe um valor específico ou uma faixa de valores de sobreposição nas quais o processo é repetitivo para uma dada aplicação de soldagem?
- d) Ou ainda, o percentual de sobreposição não afeta o resultado da soldagem, pois se trata de uma relação entre a velocidade do módulo de oscilação e a velocidade de soldagem realizada pelo Tartilope?

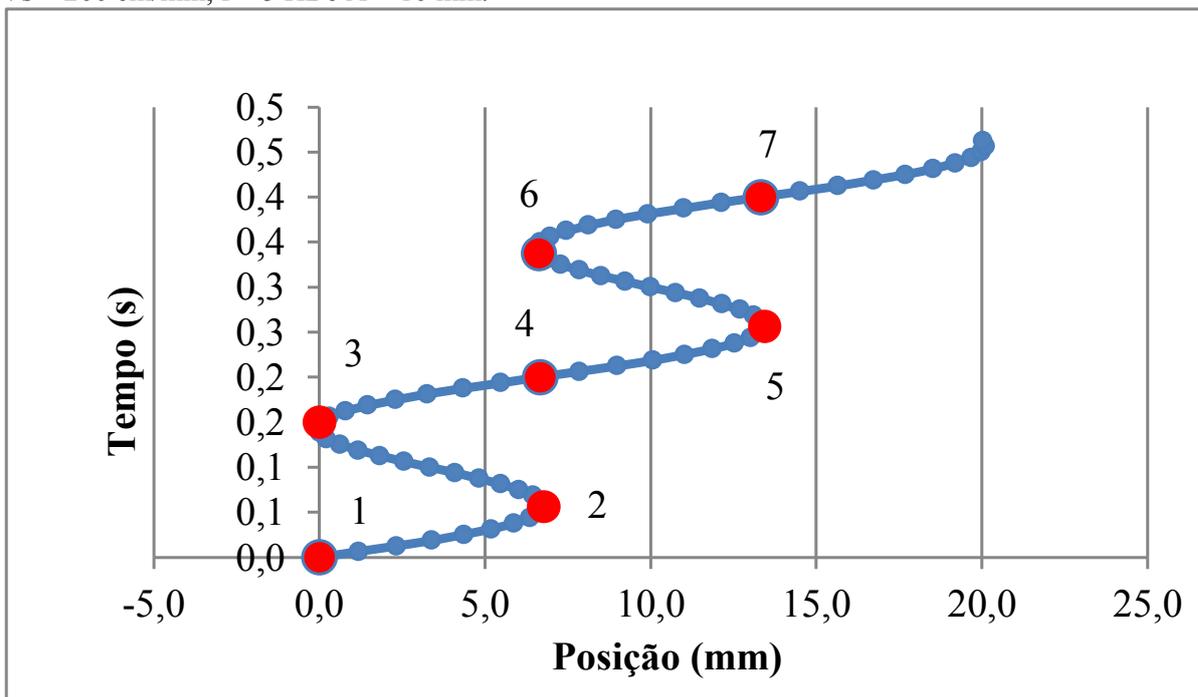
Para responder estas e outras perguntas é que se faz necessário estudar a sobreposição de um ponto de vista matemático, a fim de comparar com os resultados obtidos pela experimentação em soldagem.

Não foi encontrado em nenhuma publicação, modelo para equacionar a sobreposição. Desta maneira deixando uma lacuna científica quanto ao que esse parâmetro pode ou não representar e que influencias tem sobre o resultado dos cordões de solda.

É importante esclarecer que existem algumas formas de se pensar em sobreposição. Uma delas é a maneira tradicional, encontrado nas publicações científicas sobre o *switch back*. Essa forma leva em consideração a relação entre a distância percorrida pela tocha durante o movimento de reversão pela distancia percorrida pela mesma durante o movimento de avanço, isso tudo em termos percentuais. Por exemplo: se, utilizando-se de um robô, a tocha deslocou-se 10 mm avançando e retrocedeu 5 mm, disse que a sobreposição de trajetória foi de 50%.

Outra maneira de se estudar a sobreposição é pensar no número de vezes, de forma constante ou intercalada, que a tocha passou pela mesma região (posição) do cordão de solda. Utilizando-se do mesmo exemplo anterior, posse afirmar que se a sobreposição de trajetória é de 50%, a tocha cobriu 3 vezes 100% do cordão de solda. Para exemplificar melhor utilizou-se o gráfico da Figura 4.5.

Figura 4.5 - Gráfico representativo da trajetória *switch back* com 50% de sobreposição de trajetória. $V_s = 200$ cm/min, $f = 5$ Hz e $A = 10$ mm.



Fonte: o próprio autor.

Analisando a Figura 4.5 é possível perceber que nos trechos (1-2), (2-3) e (3-4) a tocha sobrepôs 100% dessa região do cordão 3 vezes. O mesmo ocorreu com os trechos (4-5), (5-6) e (6-7). Também é possível perceber que os pontos (2), (4) e (6) estão alinhados o que significa que em todas as regiões do cordão de solda esse padrão irá se repetir, sendo esta outra forma de analisar o *switch back*.

Além do equacionamento da sobreposição de trajetória, também se resolveu equacionar as velocidades mínima e máxima do movimento resultante da tocha. Dito novamente, a velocidade resultante da tocha é dependente da combinação do movimento de soldagem (realizado pelo Tartilope) mais o movimento oscilatório senoidal (realizado pelo sistema de oscilação).

A definição velocidade máxima e mínima são as seguintes: a velocidade máxima da tocha é a soma da velocidade de soldagem com a velocidade máxima do módulo de oscilação, quando os dois movimentos estão vetorialmente no mesmo sentido. A velocidade máxima do módulo de oscilação ocorre quando a tocha passa pelo centro do módulo. Ou seja, se a amplitude selecionada for de 10 mm, a tocha desloca-se 5 mm para a esquerda e para a direita em relação ao eixo central. Pensando apenas no mecanismo, no momento em que a tocha passa pelo centro do mecanismo ela atinge a sua velocidade máxima, depois segue para a sua extremidade, onde a sua velocidade zera e começa a acelerar novamente em sentido contrário

até atingir a velocidade máxima novamente. Isso se repete quatro vezes a cada ciclo, duas para cada lado do módulo.

Por outro lado, a velocidade mínima é aquela em que ocorre a subtração do valor da velocidade máxima do módulo e o valor da velocidade de soldagem, isso ocorre quando há a reversão de movimento do módulo e, ao invés de avançar, o mesmo passa a retroceder. Em outras palavras, o módulo de oscilação e o deslocamento do Tartilope estão vetorialmente em direções opostas. Por razões vetoriais a velocidade mínima será apresentada nesse trabalho como apresentando sinal matemático de subtração (-). Isto significa que é uma velocidade contrária a trajetória de formação do cordão de solda.

Dito isso, a equação da velocidade máxima pode ser obtida através da equação (4.4), porém com o diferencial de acrescentar a média dos tempos na posição 3 e 2, resultando na equação (4.11). Da mesma forma a equação (4.12) ilustra a velocidade mínima da tocha, porém neste caso a média dos tempos refere-se aos instantes de tempo “t” nas posições 1 e 2.

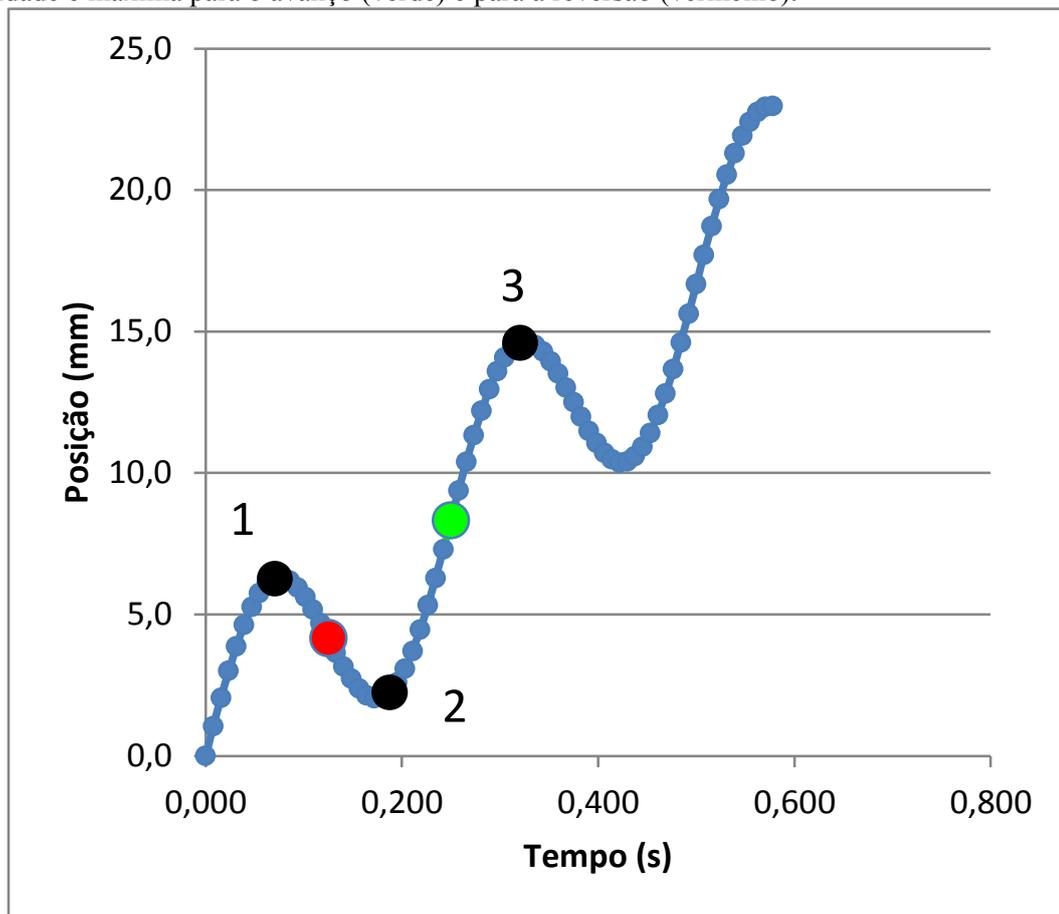
$$v(t) = [A * \pi f * \cos (2\pi f t) + V_s] * 6 \quad (4.10)$$

$$v_{máximo} = \left[A * \pi f * \cos \left(2\pi f \left(\frac{t_3 + t_2}{2} \right) \right) + V_s \right] * 6 \quad (4.11)$$

$$v_{mínimo} = \left[A * 2\pi f * \cos \left(2\pi f \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right) + V_s \right] * 6 \quad (4.12)$$

Observando-se o gráfico da Figura 4.6, pode-se entender mais claramente a razão pela qual é realizada a média dos tempos para as posições citadas. O ponto grifado em verde representa o centro da trajetória no avanço e o ponto em vermelho o centro da trajetória na reversão. Exatamente nesses pontos (verde e vermelho) incide a velocidade máxima do módulo de oscilação, respectivamente, para o movimento de avanço (compreendido entre as posições 2 e 3) e o movimento de reversão (compreendido entre as posições 1 e 2).

Figura 4.6 - Representação esquemática do movimento *switch back* com marcação dos pontos onde a velocidade é máxima para o avanço (verde) e para a reversão (vermelho).



Fonte: o próprio autor.

O equacionamento das velocidades resultante mínima e máxima da tocha se faz necessários porque a partir das mesmas é possível extrair relações matemáticas que podem auxiliar na compreensão e na obtenção de faixas de operação do *switch back* onde os resultados sejam favoráveis.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE OSCILAÇÃO

O trabalho realizado por Weizenmann [2] havia demonstrado bastante potencial para a aplicação da técnica *switch back* em processo TIG autógeno com a finalidade de atenuar o defeito de *humping*. O seu trabalho também demonstrou que os resultados das soldas melhoravam conforme se aumentava a frequência de oscilação da tocha de soldagem. Por outro lado, a simulação produzida por Kaneko et al [19], mostra que os resultados dos cordões poderiam ser melhores quando a distância de reversão aumentava para 75% da distância de avanço da tocha, representando assim, 75% de sobreposição de trajetória.

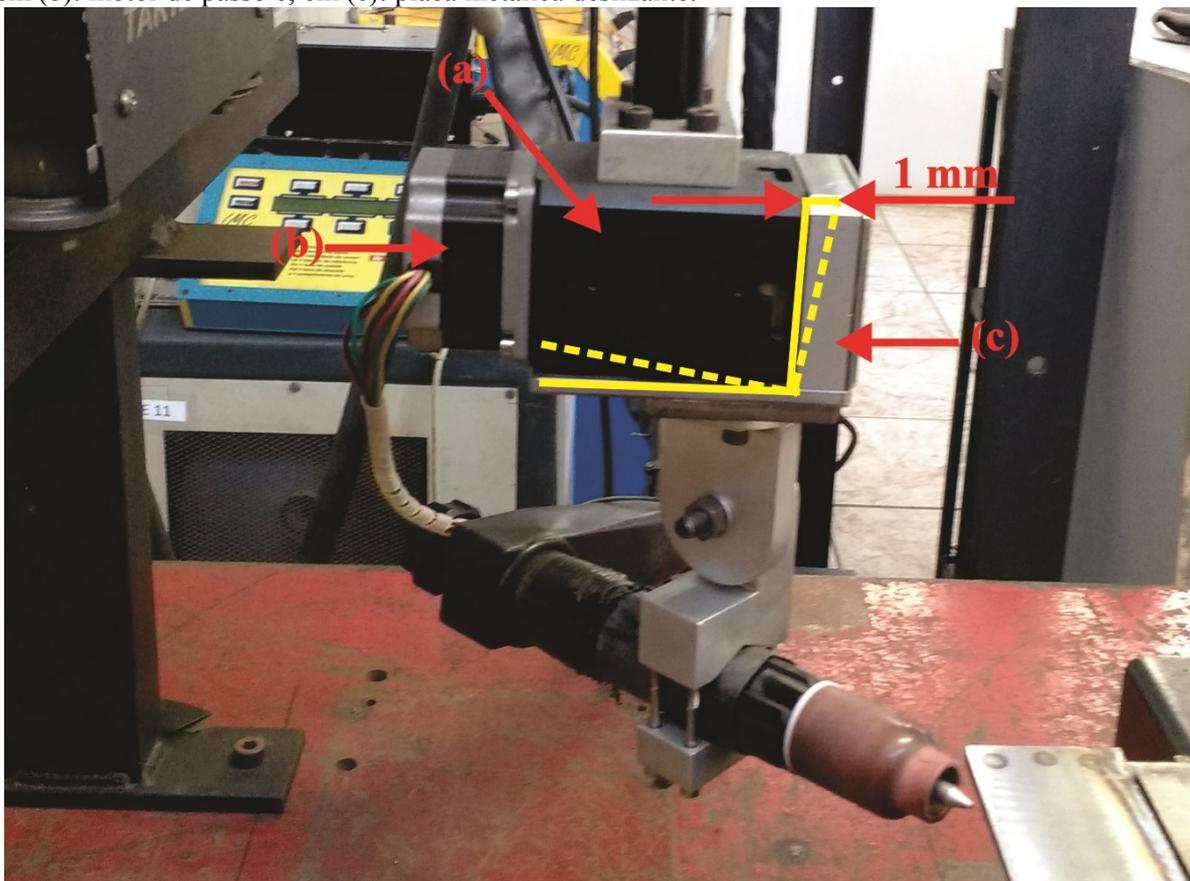
A união destes dois fatos levou ao raciocínio de que para se alcançar uma elevada velocidade de soldagem com o processo TIG e manter uma alta sobreposição (maior que 50%), era necessário a utilização de elevadas frequências de oscilação para aplicação do *switch back*.

A princípio, o único equipamento disponível para reproduzir o movimento de *switch back* era o robô antropomórfico do fabricante REIS modelo RV-15. É necessário dizer que originalmente o robô antropomórfico em questão não realizava o *switch back*, porém o mesmo passou por um *retrofitting*¹. A modernização realizada no próprio Labsolda desenvolveu a infraestrutura eletroeletrônica, o software para os cálculos de trajetória do robô e o IHM (interface homem máquina), a fim de se conseguir executar a trajetória *switch back*. Mesmo com os avanços tecnológicos obtidos, não foi possível utilizar o robô REIS RV-15 para gerar a trajetória *switch back* em elevadas frequências. Isso ocorreu devido os servos motores, que são responsáveis pela movimentação dos eixos do robô, não possuírem uma elevada dinâmica para operação. A frequência máxima conseguida com robôs industriais não ultrapassa 3 Hz. Por esta razão, foi necessário empregar um sistema de oscilação que fixado a flange do robô antropomórfico produziria a oscilação desejada e permitiria o estudo da técnica em alta frequência.

O primeiro protótipo do módulo de oscilação era constituído de apenas um mecanismo de guia com patim deslizante. Este mecanismo permite a movimentação linear da placa deslizante do módulo, sendo que é na referida placa que está fixada a tocha de soldagem. Ocorre que, durante a execução de ensaios exploratórios realizados nos corpos de prova das chapas finas em junta tipo aresta, verificou-se que a forte oscilação da tocha produzia uma folga entre a placa deslizante e o bloco de poliacetal, componentes estes do módulo de oscilação (Figura 4.7). Observou-se também que mesmo com ajustes e apertos realizados pelo departamento de projeto do Labsolda, o sistema sempre retornava a folga habitual. Este problema necessitava ser solucionado, pois se entendia que havia uma possibilidade de que a folga permitisse a variação da DEP regulada, fazendo com que dessa maneira o eletrodo se deslocava em direção ao corpo de prova que estava sendo soldado.

¹ *Retrofitting*: termo originário da língua inglesa que se refere à modernização de um equipamento considerado obsoleto tecnologicamente.

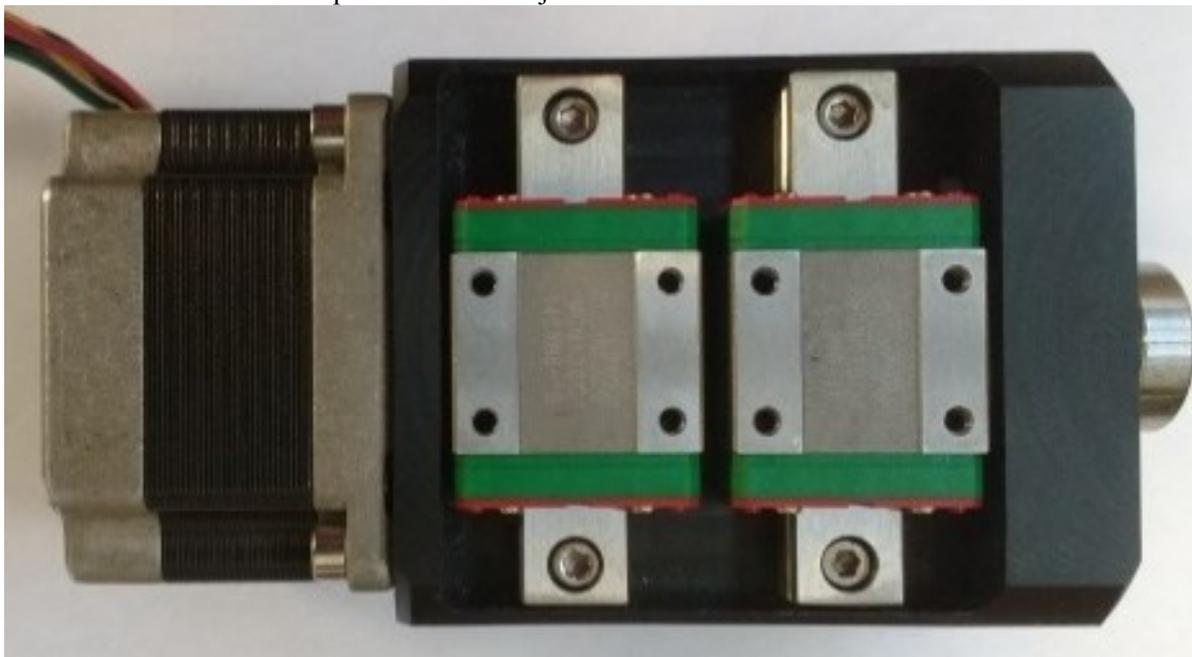
Figura 4.7 - Representação da folga de 1 mm no oscilador de uma guia. Em (a): bloco de poliacetal, em (b): motor de passo e; em (c): placa metálica deslizante.



Fonte: o próprio autor.

A folga apresentada pelo oscilador de uma guia media 1 mm aproximadamente, essa medição foi realizada com um paquímetro digital para facilitar a leitura. Depois de algumas análises, verificou-se que o problema existente tratava-se uma folga angular existente entre os rolamentos esféricos do patim com a guia de deslizamento. Isso possivelmente ocorria em função da combinação de massa e velocidades exigidas para a aplicação da técnica *switch back*. A massa que necessitava ser deslocada foi medida em 1,948 kg somente para efeito de constatação. A solução encontrada foi adicionar mais um conjunto patim com guia deslizante para reforçar o módulo de oscilação (Figura 4.8). A partir dessa modificação a folga não se tornou mais perceptível e, o sistema tonou-se rígido o suficiente para a realização dos ensaios.

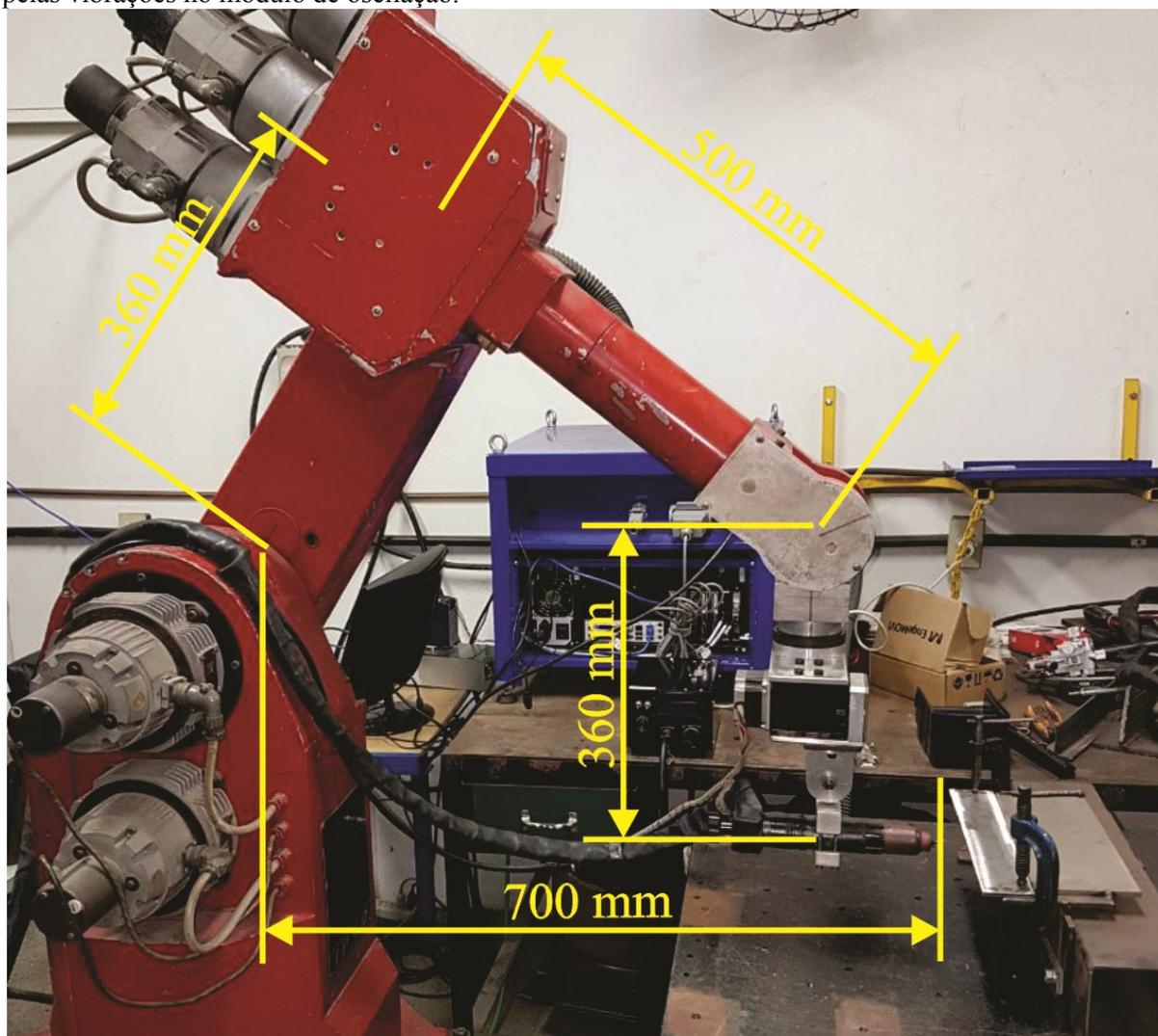
Figura 4.8 - Imagem do oscilador de duas guias evidenciando os patins utilizados para transmitir movimento entre o bloco de poliacetal e o conjunto móvel.



Fonte: o próprio autor.

Esse mesmo sistema de oscilação foi adaptado para o robô antropomórfico REIS RV-15 (com duas guias). Porém, devido a um longo braço de alavanca formado com um dos eixos do robô (Figura 4.9), ao mover o módulo de oscilação em elevadas frequências ocorriam vibrações elevadas em todo o conjunto. Essas vibrações produziam, visivelmente, alteração na amplitude de movimento. Além disso, testes de soldagem exploratórios realizados com o corpo de prova na junta de aresta mostraram que a quantidade de material expulso da poça de fusão era bastante considerável e ocorria ao longo de toda a junta.

Figura 4.9 - Dimensões dos eixos do robô REIS RV-15 mostrando os braços de alavanca responsáveis pelas vibrações no módulo de oscilação.



Fonte: o próprio autor.

4.3 AFERIÇÃO DO SISTEMA DE OSCILAÇÃO

Antes de iniciar os ensaios de soldagem com a aplicação da técnica *switch back*, foi necessário aferir o sistema de oscilação. Como o efeito da sobreposição é gerado pelo sistema de oscilação, garantir que os valores selecionados de amplitude e frequência correspondam aos executados mostra-se de fundamental importância. Iniciando pelo módulo de oscilação, a Figura 4.10 ilustra o resultado das amplitudes reais com relação às amplitudes selecionadas em função da frequência de oscilação.

A Figura 4.11 mostra o comportamento da variável amplitude conforme se aumenta o valor da frequência de oscilação. De acordo com o gráfico é possível verificar que a partir de 5 Hz de frequência para uma amplitude de 12 mm e, 6 Hz para as demais amplitudes,

ocorre um aumento desta variável acima do patamar selecionado. Este fenômeno é atribuído a falta de rigidez suficiente do braço de alavanca formado entre a ponta da tocha e o eixo (Y) do Tartilope. O conjunto tocha de soldagem e módulo de oscilação está fixado no eixo (Z) do manipulador, que por sua vez, está fixado no eixo (Y).

Outro aspecto que se observa é que os patamares das amplitudes reais estão abaixo das selecionadas. Para as amplitudes de 4, 6, 8 e 10 mm isso ocorreu para frequências menores de 6 Hz e com a amplitude de 12 mm, para menores de 5 Hz. O módulo de oscilação foi analisado pelo departamento de projetos do Labsolda e verificou-se que o mesmo não possuía nenhuma folga que justificasse uma amplitude executada menor do que aquela que havia sido regulada com o paquímetro. Porém, percebeu-se que a distância entre a placa deslizante e o bloco de poliacetal era diferente em ambos os lados, ou seja, quando se utilizava o paquímetro para ajustar 6 milímetros entre a placa deslizante e o bloco de poliacetal pelo lado esquerdo do conjunto, o lado direito do mesmo não apresentava a mesma medida e sim, uma medida maior.

Após análise detalhada do dispositivo descobriu-se a razão pela qual isso ocorria. Trata-se de um erro de usinagem, o bloco de poliacetal é originalmente um cilindro, este corpo cilíndrico passa por um processo de usinagem interna para alocar os componentes que transferem o movimento para a placa deslizante. Posteriormente, é realizada a usinagem externa do bloco onde o mesmo é planificado para tornar-se um paralelepípedo. Acontece que em relação ao centro do movimento de rotação dos componentes internos a distância até as bordas do bloco não é a mesma. Em outras palavras a placa deslizante gira fora de centro em relação ao bloco de poliacetal. Este defeito do dispositivo só foi identificado após as medições de frequência, pois não era algo passível de previsibilidade. Para se ter uma ideia do erro máximo produzido, considerou-se que a 0,5 Hz de frequência a movimentação do módulo de oscilação não teria grande influência sobre o braço de alavanca a fim de que a amplitude realizada fosse diferente da selecionada. A Tabela 4.1 mostra o erro percentual produzido pela relação entre os valores das amplitudes reais pelas selecionadas, para uma frequência de 0,5 Hz.

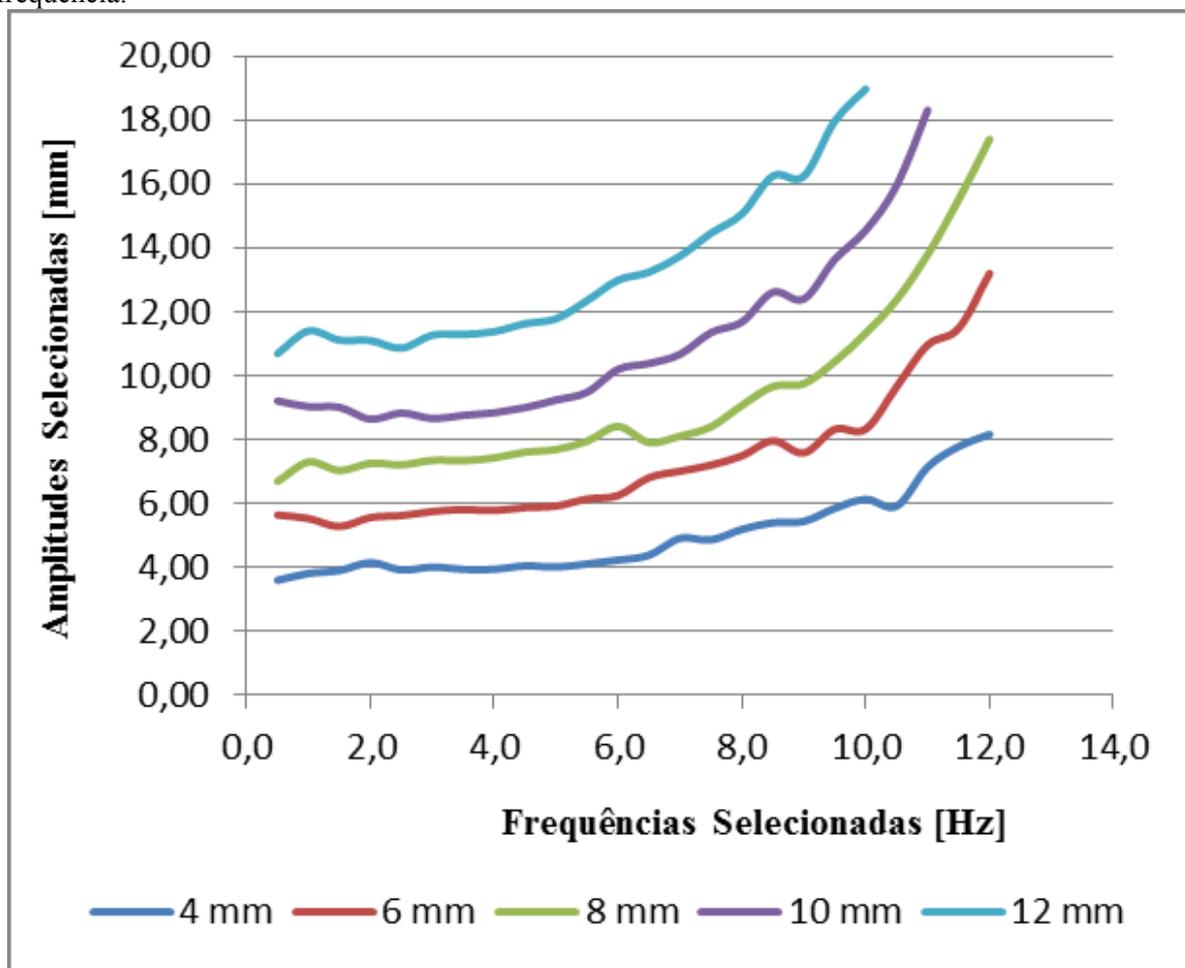
Tabela 4.1: Erro Percentual entre a Amplitude Seleccionada e a Amplitude Realizada para uma Frequência de 0,5 Hz.

Amplitude Seleccionada [mm]	Amplitude Real [mm]	Erro Máximo (%)
4,00	3,85	3,75
6,00	5,64	6,00
8,00	6,69	7,37
10,00	9,21	7,90
12,00	10,69	10,92

Para melhor visualização e comparação do comportamento real desta variável em relação ao valor seleccionado (ideal), buscou-se alocar cada faixa de amplitude em um gráfico separadamente. Além disso, como cada curva possui uma equação de correção diferente, por razões didáticas a separação das faixas se faz necessário cada qual em seu gráfico.

Todas as vezes que foi calculada a sobreposição de trajetória, utilizaram-se os valores de amplitude realizada. Os patamares descritos no trabalho das amplitudes são os valores ideais, porque foram aqueles seleccionados com o paquímetro no momento dos ensaios. Posteriormente os valores das amplitudes ideais foram aplicados nas suas respectivas fórmulas e encontrados os valores reais das amplitudes, ou seja, amplitudes estas que foram realmente executadas pelo sistema de oscilação. Com a posse dos valores reais de amplitude e frequência, juntamente com a velocidade de soldagem é possível calcular com boa precisão o percentual de sobreposição para análise dos ensaios realizados.

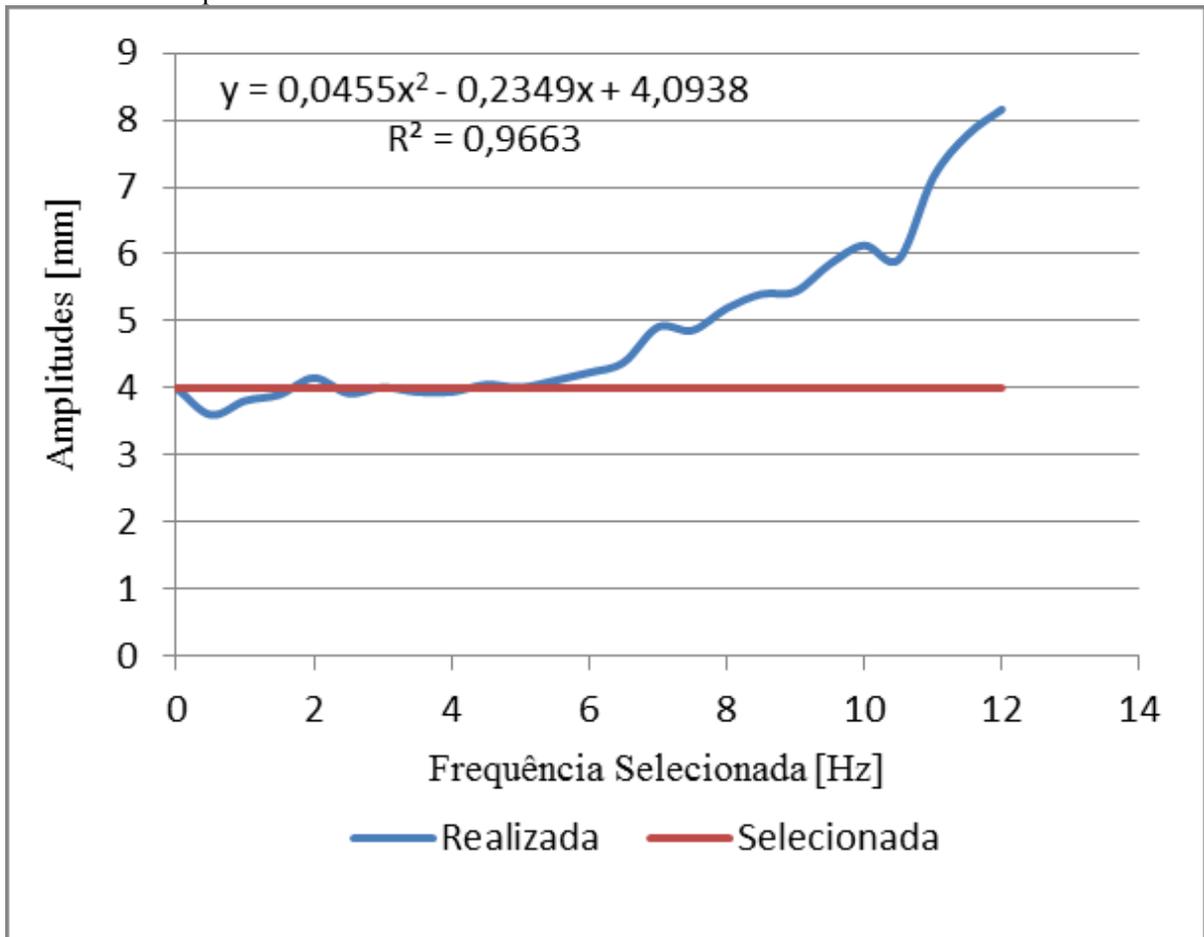
Figura 4.10 - : Resposta do módulo de oscilação para as amplitudes selecionadas quando aumenta-se a frequência.



Fonte: O próprio autor.

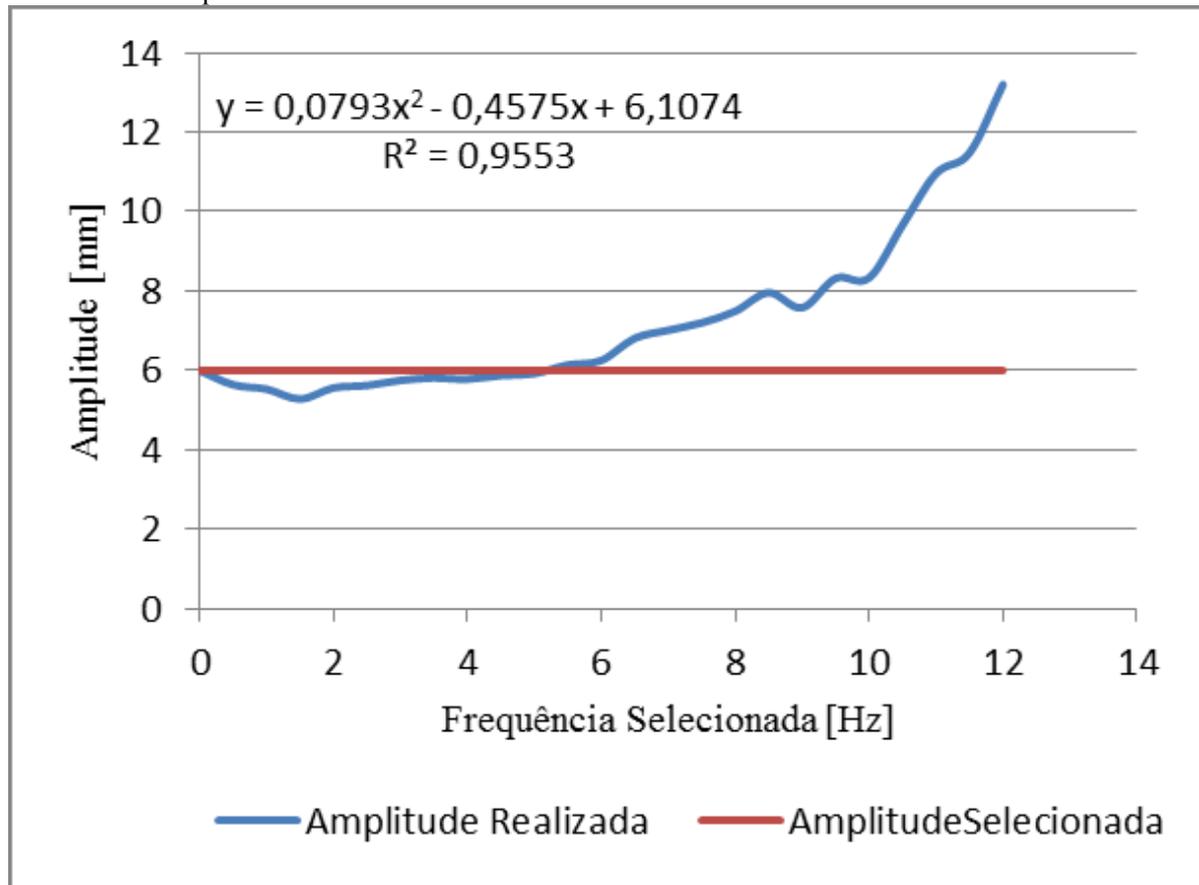
Os gráficos da Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 representam as respostas das amplitudes reais do módulo de oscilação para as amplitudes selecionadas de 4, 6, 8, 10 e 12 mm, respectivamente.

Figura 4.11 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 4 mm quando aumenta-se a frequência.



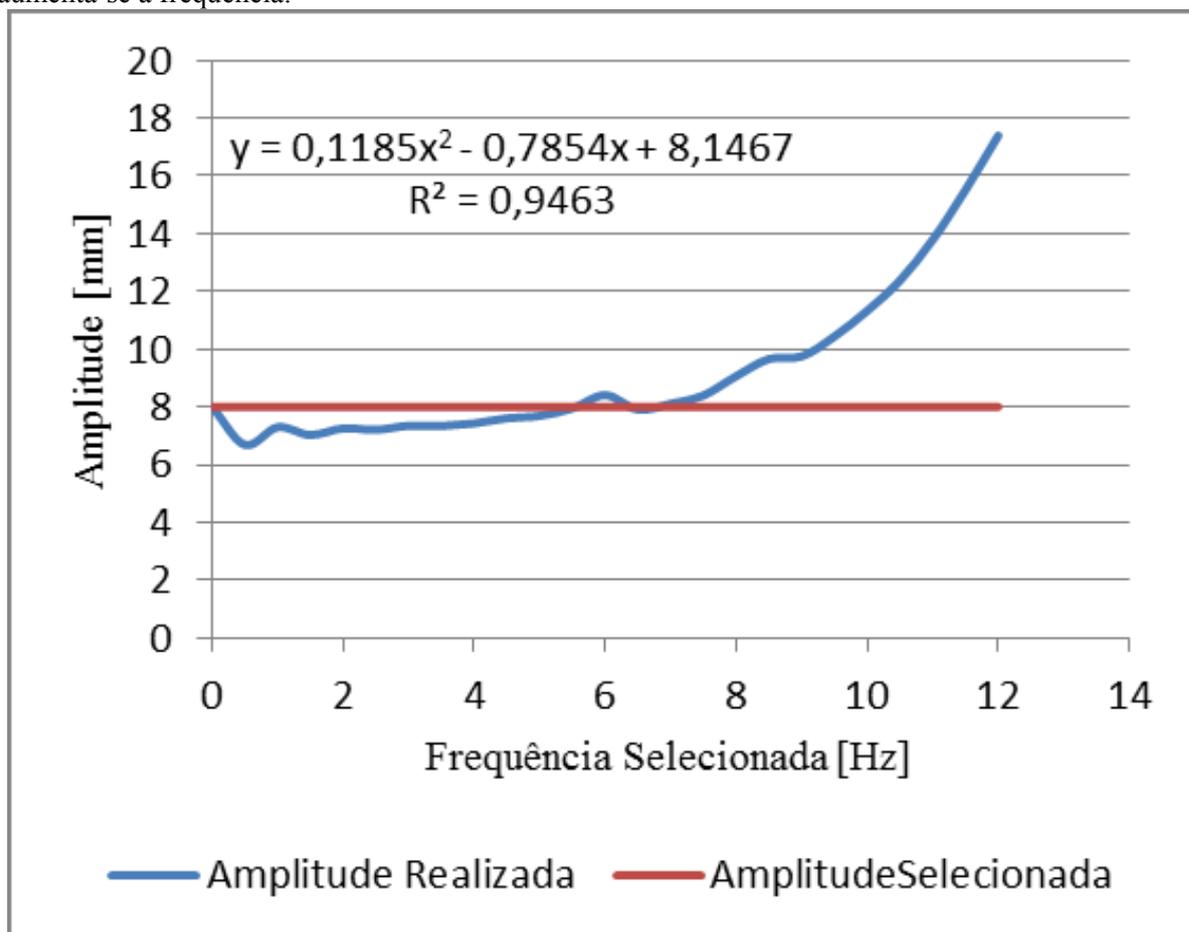
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.12 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 6 mm quando aumenta-se a frequência.



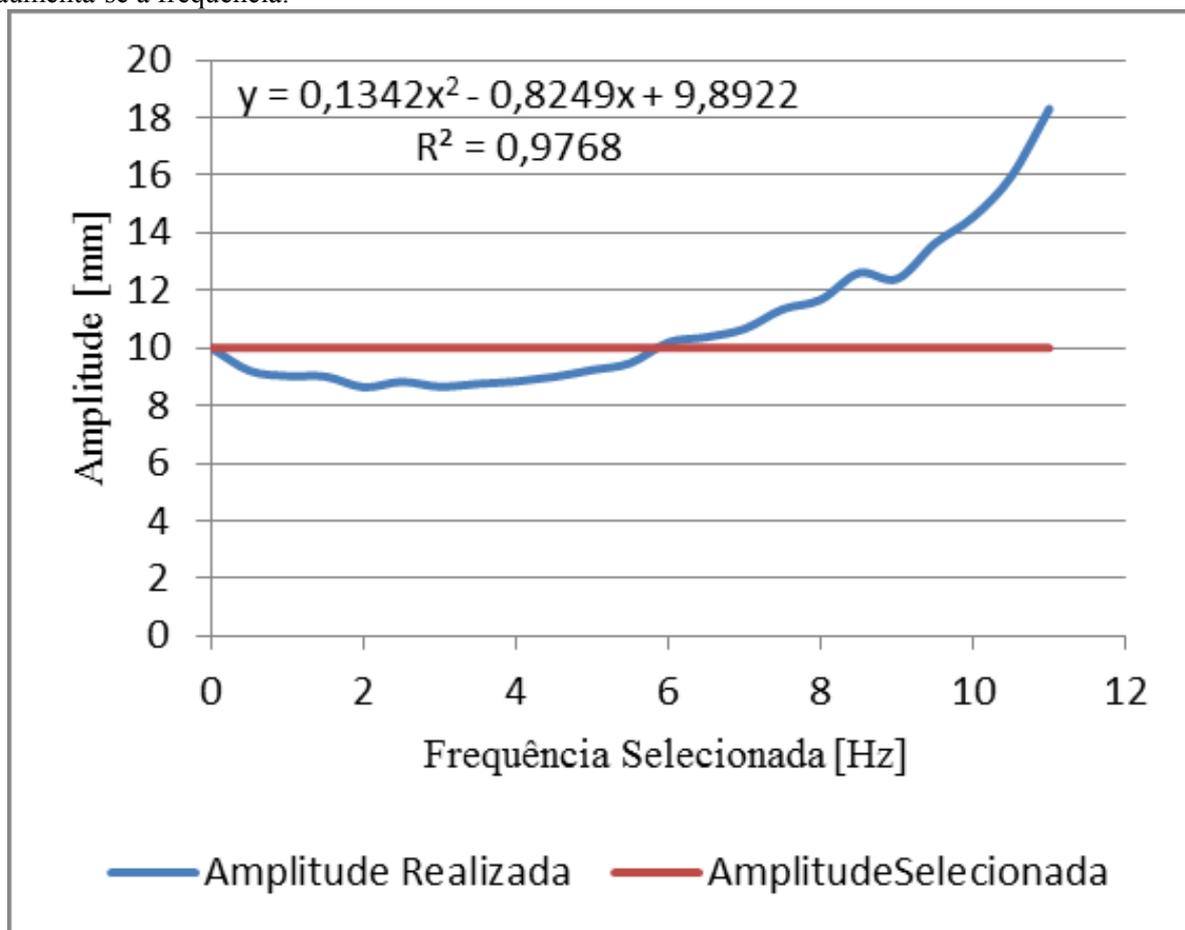
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.13 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 8 mm quando aumenta-se a frequência.



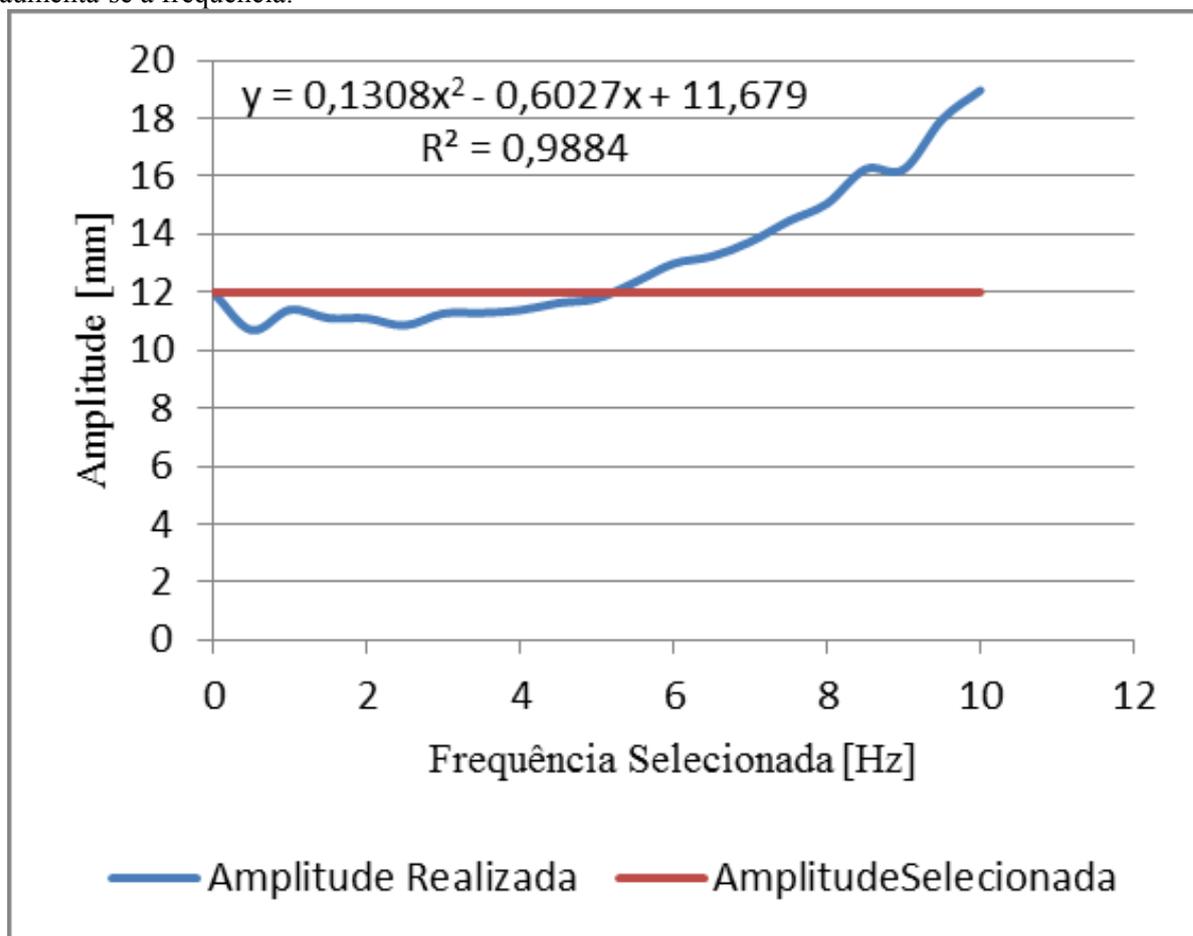
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.14 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 10 mm quando aumenta-se a frequência.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.15 - Resposta do módulo de oscilação para a amplitude selecionada de 12 mm quando aumenta-se a frequência.

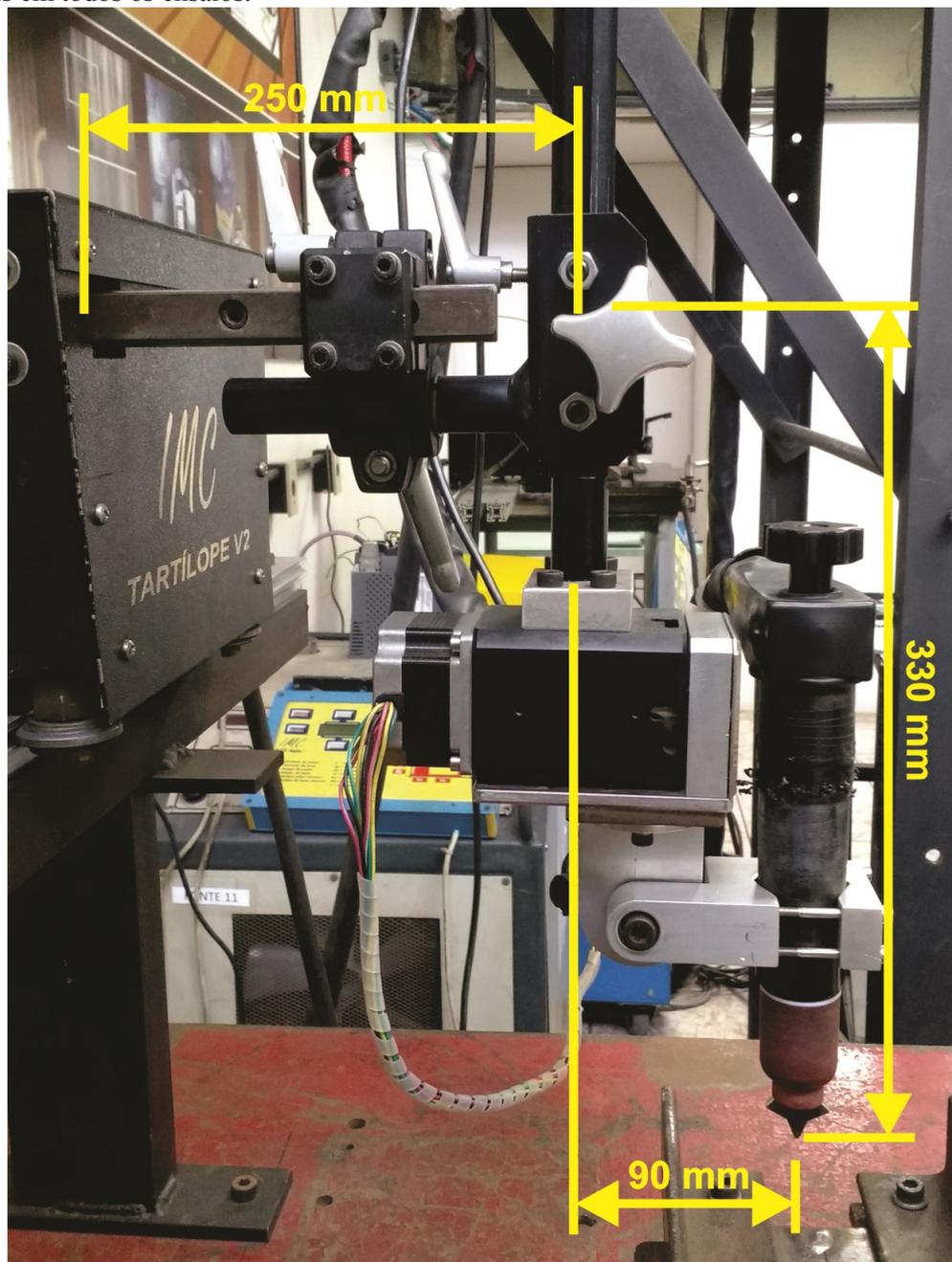


Fonte: o próprio autor.

Pela análise dos gráficos fica claro que as amplitudes reais executadas pela tocha são reflexo direto das amplitudes selecionadas no módulo de oscilação e das frequências reguladas no módulo de controle. Porém, a informação desses gráficos não resolve todos os problemas, principalmente se não for aplicada com atenção. Para que as informações desses gráficos expressem com fidelidade os valores reais das amplitudes executadas pela tocha é necessário que os braços de alavanca formados pelos eixos do Tartilope em relação a tocha, tenham sempre as mesmas dimensões. Em outras palavras, com braços de alavanca mais longos os valores de amplitudes serão maiores. Para solucionar esse problema foi necessário padronizar a posição da tocha em relação a bancada, de modo que, os suportes de fixação dos corpos de prova e a posição dos corpos de prova ajustassem-se a posição da tocha. A Figura 4.16 mostra o posicionamento padrão dos eixos do Tartilope V2 em relação a ponta da tocha. Medidas estas empregadas em todos os ensaios.

Por esta razão era necessário condicionar os ensaios a uma posição específica do Tartilope V2, dessa forma os braços de alavanca formados entre os eixos e a ponta da tocha seriam sempre os mesmos, não produzindo alterações nos valores reais das amplitudes.

Figura 4.16 - Medidas padrões do posicionamento dos eixos do Tartilope V2 até a ponta da tocha utilizadas em todos os ensaios.



Fonte: o próprio autor.

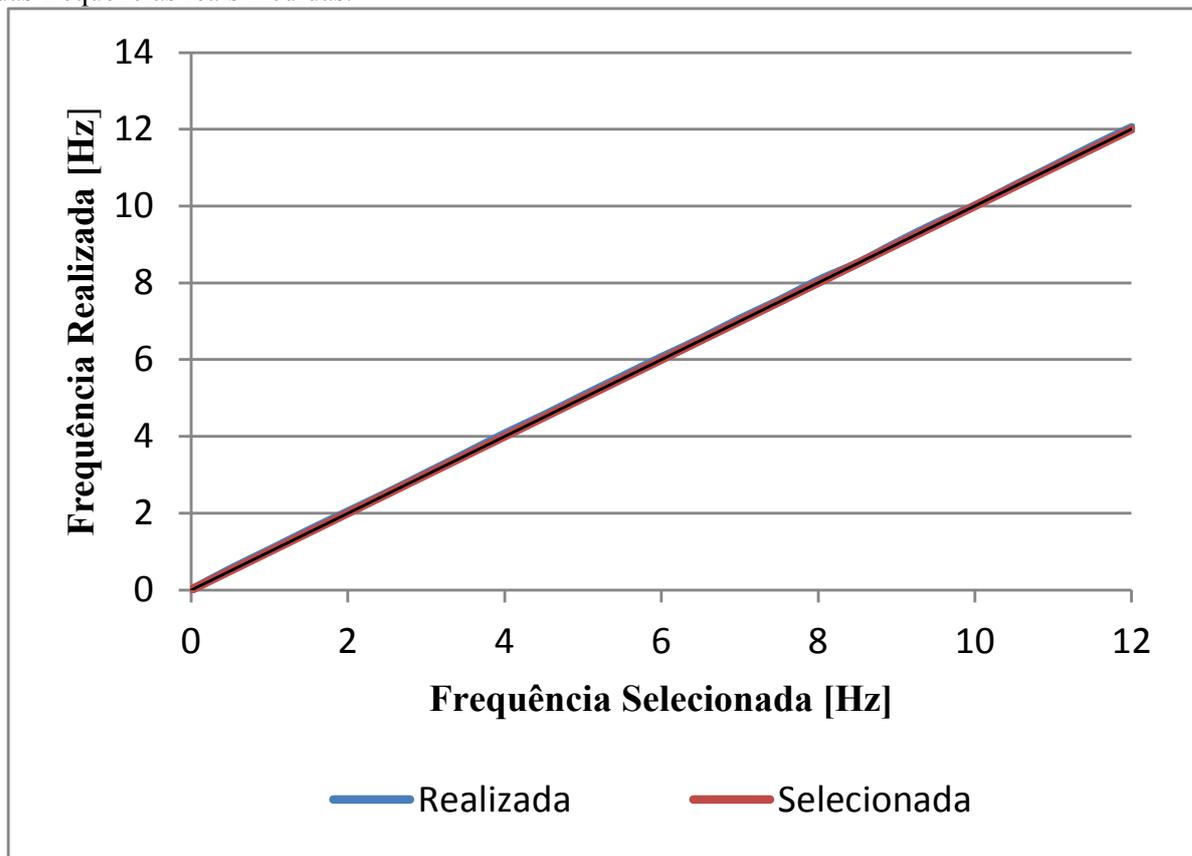
Já com relação a variável da frequência, a Figura 4.17 mostra o gráfico com a média das frequências reais obtidas para as cinco amplitudes mencionadas (4, 6, 8, 10 e 12 mm). Por exemplo: selecionou-se a frequência de 1 Hz no módulo de controle, com esta frequência fez-

se aquisições para as todas as amplitude mencionadas, o valor real considerado dessa frequência em relação a selecionada é a média aritmética dos cinco valores.

Observando-se o gráfico da Figura 4.17 torna-se difícil verificar qual é a disparidade entre os valores de frequências selecionadas e os valores reais executados pelo módulo de controle. Dessa maneira esse trabalho apresenta os referidos valores na Tabela 4.2.

Observando-se na Tabela 4.2 os valores das frequências medidas e, comparando-os com os valores das frequências selecionadas percebe-se que o módulo de controle tem uma ótima precisão e confiabilidade, garantindo que é capaz de reproduzir com bastante fidelidade os patamares de frequências impostos ao mesmo.

Figura 4.17 - Gráfico que relaciona as frequências selecionadas no módulo de controle com a média das frequências reais medidas.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 4.2: Relação entre os valores de frequência selecionados no módulo de controle com a média dos valores das frequências medidas.

Frequência Selecionada [Hz]	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
Frequência Real [Hz]	0,54	1,04	1,55	2,04	2,53	3,04	3,55	4,07
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,07
Frequência Selecionada [Hz]	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
Frequência Real [Hz]	4,55	5,06	5,56	6,06	6,54	7,06	7,54	8,06
Desvio Padrão	0,05	0,06	0,06	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06
Frequência Selecionada [Hz]	8,50	9,00	9,50	10,00	10,50	11,00	11,50	12,00
Frequência Real [Hz]	8,51	9,04	9,55	10,01	10,53	11,04	11,56	12,05
Desvio Padrão	0,01	0,04	0,05	0,01	0,03	0,04	0,06	0,05

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO *SWITCH BACK*

O objetivo principal aqui foi caracterizar os ensaios de soldagem com a aplicação da técnica *switch back*. Esta caracterização foi efetuada estudando como as variáveis de amplitude e frequência afetam as características geométricas do cordão de solda e, dessa forma, construir os resultados graficamente para comparar com o modo convencional. As características geométricas analisadas foram penetração, largura e área fundida. Além, se pretendia estudar o efeito da sobreposição de trajetória com relação à atenuação ou eliminação de *humping* para uma determinada corrente elétrica e velocidade de soldagem.

O primeiro corpo de prova ensaiado foi no modo convencional. A velocidade de soldagem empregada foi de 20 cm/min com corrente contínua constante de 250 A, como já mencionado no capítulo de metodologia. A matriz de ensaios utilizada para avaliar a técnica *switch back* encontra-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Matriz de ensaios para a caracterização da soldagem com aplicação da técnica *switch back*.

Frequências [Hz]	Amplitudes [mm]		
1	4	8	12
2	4	8	12
4	4	8	12
5	4	8	12
6	4	8	12
8	4	8	12

Os valores de amplitudes (4, 8 e 12 mm) demonstrados na Tabela 5.1 são todos considerados selecionados, uma vez que são aqueles regulados no dispositivo mecânico do sistema de oscilação. Como demonstrado anteriormente, cada valor de frequência selecionada produz um valor de amplitude real, diferenciando-se da amplitude selecionada. Por esta razão, calcularam-se as amplitudes reais utilizando-se as equações respectivas das figuras Figura 4.11, Figura 4.13 e Figura 4.14. A Tabela 5.2 mostra as amplitudes reais calculadas para cada amplitude selecionada, em função da variação da frequência. Já para as frequências não foram utilizados os valores reais, uma vez que os valores selecionados apresentaram variabilidades ínfimas em relação aos primeiros, de acordo com as medições efetuadas e descritas anteriormente.

Tabela 5.2: Amplitudes reais calculadas para cada amplitude selecionada em função da variação da frequência.

Frequências [Hz]	Amplitudes [mm]		
	4	8	12
1	3,904	7,480	11,207
2	3,806	7,050	10,997
4	3,882	6,901	11,361
5	4,057	7,182	11,936
6	4,322	7,700	12,772
8	5,127	9,448	15,229

Na sequência as sobreposições de trajetória foram calculadas usando-se a equação (4.9). Os valores de sobreposição foram calculados utilizando-se os valores reais das amplitudes. A Tabela 5.3 mostra o quadro de sobreposições expressa em percentual para cada frequência e amplitude relacionada.

Os valores percentuais de sobreposição grifados em azul são referentes àqueles em que as três repetições do cordão de solda não ocasionaram em *humping*, já os grifados em verde são os valores referentes aos cordões que obtiveram duas repetições sadias e uma com defeito, por outro lado, os valores grifados em vermelho demonstraram presença de *humping* em duas das três amostras.

Tabela 5.3: Quadro percentual das sobreposições calculadas para a matriz e ensaios relacionando frequência e amplitude.

Frequências [Hz]	Amplitudes Selecionadas [mm]		
	4	8	12
1	43%	66%	76%
2	66%	81%	87%
4	81%	90%	93%
5	85%	92%	95%
6	87%	93%	96%
8	90%	95%	97%

As figuras Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 mostram os resultados dos cordões obtidos com a primeira, segunda e terceira repetição dos ensaios, respectivamente.

O primeiro corpo de prova ensaiado para cada repetição foi no modo convencional. O arco apresentou formato característico de sino, ocorrendo surgimento de *humping*, sendo mais acentuado nas duas primeiras repetições. A terceira repetição apresentou *humping* somente no centro do cordão, interrompendo a formação regular do mesmo.

A partir deste momento os ensaios seguiram com a técnica *switch back*. A velocidade de soldagem e a corrente foram mantidas as mesmas, variando-se apenas a amplitude e a frequência nos patamares pré-estabelecidos.

Os resultados obtidos com 1 e 2 Hz para uma amplitude de 4 mm apresentaram formação de *humping* de modo semelhante ao que comumente ocorre com a soldagem convencional. Nesta condição foi observado visualmente que o material líquido fundido da poça de fusão desloca-se pelos canais laterais da cratera formada no metal de base e o arco apresentou-se bastante rígido e constricto. Na condição de 5 Hz com a amplitude de 8 mm a solda também apresentou o defeito de *humping*, porém em 50% do cordão, sendo do meio para o final sem defeitos. Como as frequências e as amplitudes utilizadas foram diferentes não se pode afirmar até o momento qual das duas variáveis foi responsável pela sutil redução de defeitos.

As soldas alcançadas com 5, 6 e 8 Hz para uma amplitude de 12 mm apresentaram *humping* em um pequeno ponto no início do cordão, não apresentando nenhum defeito no restante da soldagem, este fato ocorreu em apenas uma repetição. O aumento da amplitude para 12 mm demonstrou visualmente uma sensível redução na largura do cordão quando comparados com as amplitudes de 4 e 8 mm. E durante o ensaio observou-se uma menor penetração e baixa altura do reforço, praticamente o cordão ficou na altura da chapa, dando a impressão de ter fundido um volume menor de material. Conforme se aumentava a frequência de 5 Hz para 6 Hz e de 6 Hz para 8 Hz a poça de fusão aparentemente apresentou uma redução de tamanho. Este fato leva a hipótese que quando se tem um incremento da frequência mantida fixa uma mesma amplitude, tem-se uma diminuição no volume da poça de fusão. A soldagem com 4 Hz e 12 mm, apresentando aparentemente um volume de poça o dobro da soldagem com 8 Hz com um volume de poça mais estável. Percebeu-se que com frequência de 8 Hz a agitação da poça de fusão é maior, isso devido a maior velocidade gerada no módulo de oscilação.

As soldas obtidas com as frequências de 4 Hz e 5 Hz para 4 mm de amplitude apresentaram um cordão sem *humping*, a poça de fusão mostrou-se em formato elíptico e o volume da poça permaneceu regular do início ao fim do ensaio. Já a solda de 8 Hz com 8 mm, demonstrou as mesmas características que a solda com 5 Hz e 4 mm, porém com um volume de poça reduzido, também aqui foi possível perceber um maior alongamento longitudinal da poça de fusão, não somente a poça reduziu de volume mas a impressão visual mostrou uma diminuição na largura. O mesmo ocorreu com a frequência de 8 Hz e 4 mm de amplitude, todavia nesse caso, a poça de fusão em formato elíptico sofreu um alongamento longitudinal.

O que se percebe até aqui é que o incremento na frequência resulta em um alongamento longitudinal da poça de fusão e que o incremento da amplitude produz um volume menor de poça assim com na largura do mesmo.

Para os ensaios com frequências de 1 Hz e 2 Hz e 8 mm de amplitude ocorreu incidência de *humping* do início ao fim do cordão de solda para apenas uma repetição. Nesta condição, observou-se que o material deslocado para traz da poça solidifica-se antes do movimento de reversão da tocha retornar sobre essa mesma quantidade de material. Em todos os ensaios onde este fenômeno foi percebido o defeito de *humping* incidiu sobre o cordão. É possível afirmar que o ensaio com 2 Hz apresentou menor quantidade de *humping* quando comparado ao ensaio com 1 Hz para a amplitude de 8 mm. Atribui-se essa redução de *humping* ao incremento da frequência.

Para o ensaio com 1 Hz de frequência e 12 mm de amplitude houve incidência de *humping* de forma mais espaçada. Nesse ensaio observou-se que no instante em que a poça estava terminando de se solidificar, a tocha realizava o movimento de reversão e incidia o arco novamente sobre este ponto, produzindo uma refusão, ou seja, fazendo com que aquele material que acabara de se solidificar retorna-se a fase líquida novamente. Como a formação de *humping* ficou um pouco mais espaçada foi possível notar que toda vez que a reversão da tocha conseguia realimentar ou reaquecer a parte anterior da poça antes que a mesma se solidificasse, o defeito de *humping* não ocorria.

Há duas hipóteses para explicar a razão pela qual a poça se liquefazia, a primeira é a alimentação da poça atrás do arco pelo material que estava sendo fundido na frente do arco, ou seja, numa tentativa de formar o *humping*. A segunda hipótese é o calor do próprio arco que incidia na região da poça que acabara de se solidificar, como ainda encontrava-se em uma temperatura próxima da temperatura de fusão, a incidência de calor do arco por pouco tempo era suficiente para retornar a poça a fase líquida. Aqui não está se aceitando uma hipótese e descartando a outra, pois também é possível que ambas ocorram simultaneamente.

A percepção deste fato levou a pressupor que para uma amplitude menor que os 12 mm utilizados, o *humping* tenderia a reduzir ou desaparecer completamente. Infelizmente, isso não se comprovou ao se realizar os testes para 1 Hz com 4 e 8 mm, que demonstraram não haver melhora nesse aspecto.

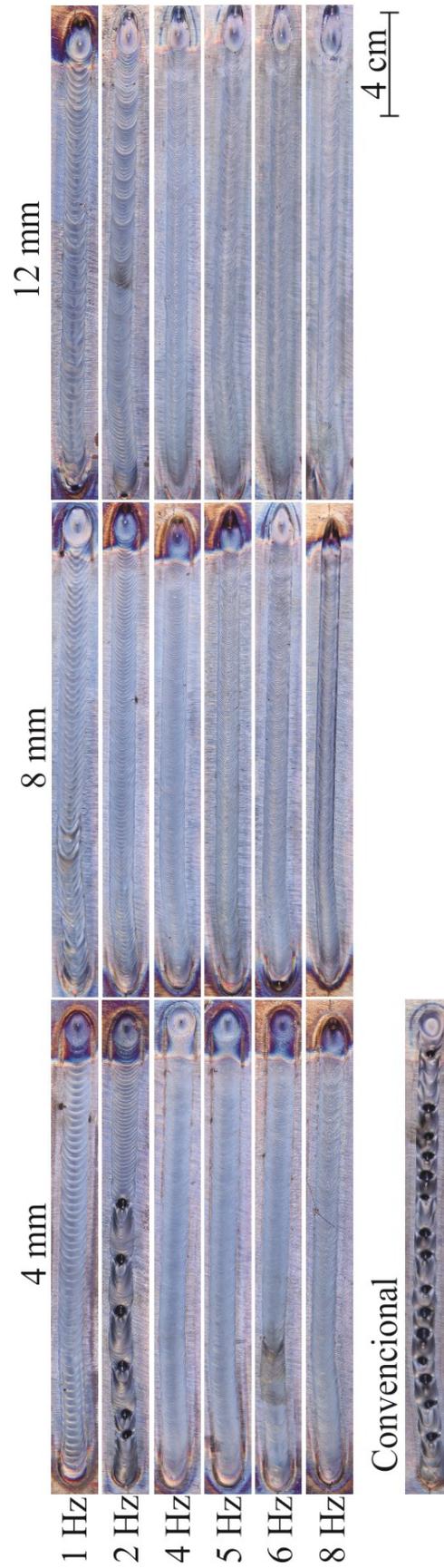
Um comportamento muito semelhante ao ensaio com 1 Hz e 12 mm foi verificado ao se efetuar o ensaio com 2 Hz e mesma amplitude. No entanto, nesse caso a quantidade de *humping* formada foi consideravelmente menor, sobrevivendo defeito em pequena região de apenas uma amostra.

Figura 5.1 - Resultados da primeira repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica *switch back*.



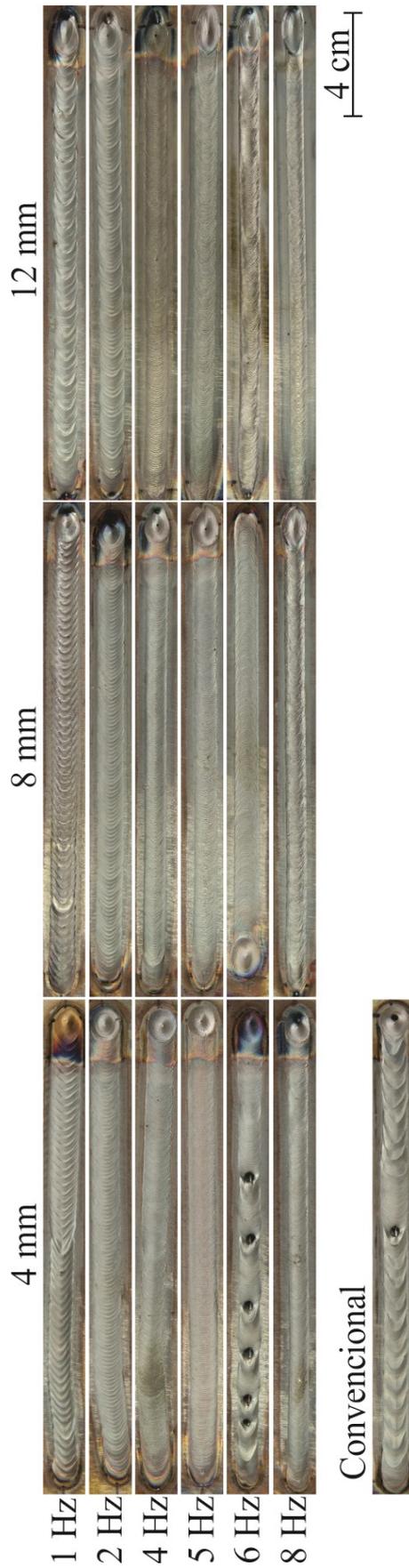
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.2 - Resultados da segunda repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.3 - Resultados da terceira repetição dos cordões de solda para a matriz de ensaios de caracterização da técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

O ensaio realizado com 6 Hz e 4 mm apresentou um comportamento diferente do esperado. Como as soldas realizadas com 4, 5 e 8 Hz não haviam apresentado *humping* para a mesma amplitude, o mesmo deveria acontecer com a frequência de 6 Hz. Porém, ocorreu efeito contrário, e para confirmar ainda mais a falta de repetibilidade, apresentou dois cordões defeituosos. Com base nesse resultado apresentado acredita-se que exista uma faixa de operação da frequência em que os resultados têm boa repetibilidade e uma determinada faixa onde o mesmo não ocorre. No entanto, não se conseguiu explicar o porquê esse ensaio produziu um resultado tão afastado dos demais. Acredita-se que ocorreu algum tipo de ressonância ou outro tipo de interação, porém como isso não foi estudado, não é possível fazer afirmações.

Por fim, os cordões obtidos com a configuração de 6 Hz e 8 mm e sequencialmente de 4 Hz e 8 mm apresentaram uma poça de fusão arredondada de pequeno comprimento, porém com largura visivelmente maior. Nesses casos a poça de fusão comportou-se com bastante agitação, causando a impressão de que havia uma recirculação da própria poça, em outras palavras, é como se a poça girasse sendo impulsionada pelas forças eletromagnéticas do arco ou do arraste do jato de plasma. O cordão com 4 Hz e 8 mm não apresentou *humping* em nenhuma amostra, porém o cordão com 6 Hz apresentou uma pequena região de *humping* na primeira amostra, notadamente demonstrando que alguma instabilidade ocorre com as soldas realizadas na frequência de 6 Hz.

Procurou-se inicialmente avaliar a proporção de melhora nos resultados analisando-se as variações de frequência e posteriormente de amplitude. Sobre a variação da frequência foi possível observar que o seu incremento para a amplitude de 12 mm foi capaz de produzir cordões com menores quantidades de *humping*. De modo geral, o mesmo fato pode ser observado para a amplitude de 8 mm, onde com valores maiores de frequência obteve-se mais cordões sem defeitos. Embora, também tenha sido possível repetir em duas amostras bons resultados com as frequências de 1 Hz e 2 Hz, nestes casos observou-se uma aparência disforme na região entre 50 e 60 mm do cordão, dando a impressão de uma sobreposição de material. Além disso, na segunda amostra é possível observar uma marca de solidificação semelhante a um poro no cordão executado na frequência de 2 Hz. Por outro lado, embora aparente que o acréscimo de frequência produz melhores resultados, o mesmo não ocorreu para a amplitude de 4 mm, pois não se consegue afirmar que a quantidade de *humping* tenha sido menor para o ensaio com 6 Hz de frequência quando comparado ao ensaios com 1 Hz e 2 Hz.

Sequencialmente, no que diz respeito aos efeitos produzidos pela variação de amplitude, analisando-se individualmente para cada frequência, observou-se uma melhora apenas para os casos com frequência de 2 Hz e 6 Hz. Mesmo tendo ocorrido defeito em apenas uma amostra não é factível afirmar que houve melhora nos cordões produzidos com a frequência de 1 Hz. Com as frequências de 4 Hz e 8 Hz os ensaios não apresentaram defeitos nas três amostras. Já para a frequência de 5 Hz não é possível dizer que o aumento da amplitude tenha sido responsável por um melhor resultado, uma vez que, o cordão com 8 mm de amplitude apresentou *humping* e os cordões com 4 mm e 12 mm não produziram defeitos.

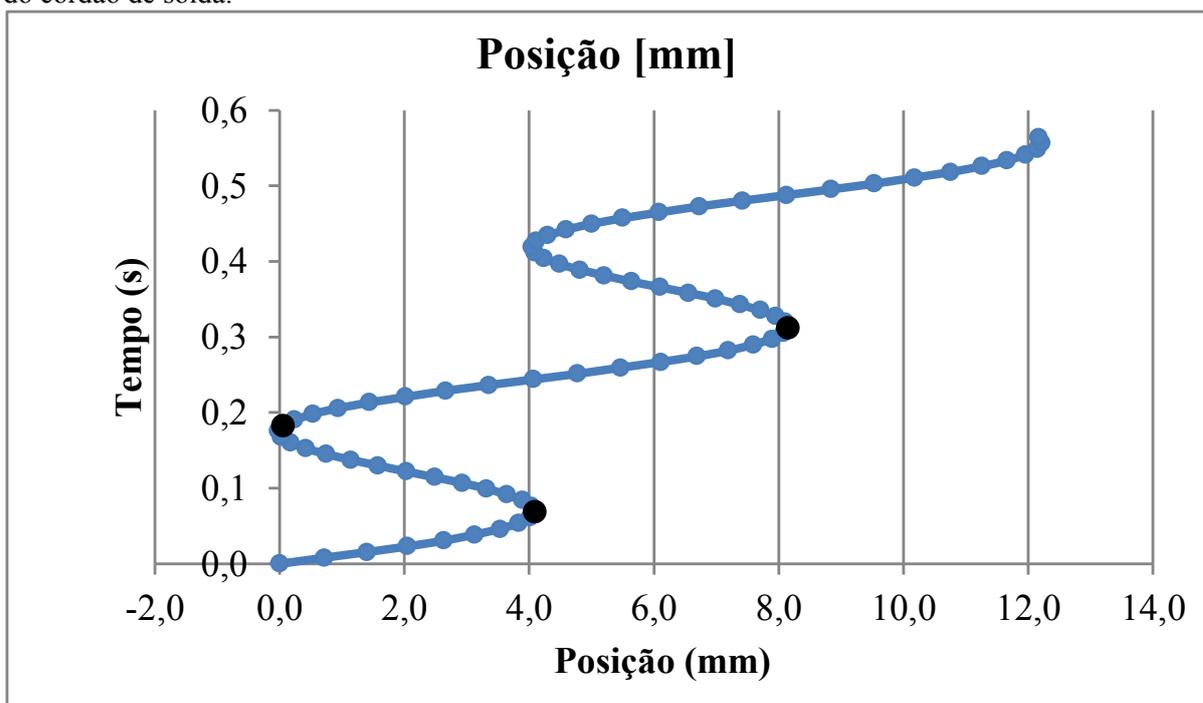
Compararam-se os resultados das três amostras das soldas com o indicador do percentual de sobreposição de trajetória. Observou-se que, para percentuais idênticos de sobreposição (logicamente obtidos por combinações das variáveis frequência e amplitude), os resultados dos cordões apresentaram repetibilidade diferentes. Por exemplo: o ensaio com 1 Hz e 8 mm demonstrou duas repetições sem defeito, por outro lado, o resultado com 2 Hz e 4 mm apresentou todos os cordões com defeitos. Em ambos os casos a sobreposição de trajetória é de 66%. Caso idêntico ocorreu com a sobreposição de 87%, onde com 2 Hz e 12 mm houve duas repetições com cordões sem defeitos, já com a configuração 6 Hz e 4 mm incidiu *humping* em todas as repetições.

Entretanto, os casos com 81% e 93% apresentaram cordões com três repetições sem defeitos com as configurações 4 Hz e 4 mm; 4 Hz e 12 mm, mas também demonstraram condições em que apenas duas repetições mostraram-se adequadas, neste caso com as configurações 2 Hz e 8 mm; 6 Hz e 8 mm.

Apenas em duas condições ocorreu que as sobreposições obtidas produziram bons cordões nas três amostras. A primeira foi com 90% (4 Hz 8 mm e 8 Hz 4 mm) e, a segunda com 95% (5 Hz 12 mm e 8 Hz 8 mm). Com base nessas prudentes observações, é possível afirmar que o parâmetro da sobreposição não demonstra ser um bom indicador para avaliar corretamente a técnica de movimentação *switch back*. Ou seja, não é possível definir um único valor, ou uma faixa de valores de sobreposição que faça com que todas as repetições realizadas produzam excelentes cordões. Dessa forma, também fica demonstrada que não há uma relação ou dependência que ligue a velocidade média do módulo de oscilação a velocidade de soldagem, pois com as combinações de 1 Hz e 8 mm e, 2 Hz e 4 mm, o módulo de oscilação apresenta a mesma velocidade média, porém os ensaios apresentam resultados e repetibilidade distintas. Este fato comprova que não há uma terceira variável formada pela combinação de amplitude e frequência e, que a interdependência entre as mesmas é bastante baixa.

Também se procurou analisar em termos de qual o número de vezes que a tocha de soldagem passa sobre uma mesma região do cordão de solda. Antes de realizarmos essa análise cabe uma explicação do significado dessa avaliação. Observando-se a Figura 5.4, que é meramente ilustrativa, verifica-se que no intervalo de posição de 0 a 2 mm a tocha sobrepõe 3 vezes 100% do cordão de solda e, que o mesmo acontece nos intervalos de 2 a 4 mm, 4 a 6 mm, 6 a 8 mm e, assim sucessivamente. A Figura 5.4 foi gerada para uma condição de 100 cm/min de velocidade de soldagem, 6 mm de amplitude e 4 Hz de frequência, resultando numa sobreposição percentual de trajetória de 50%. Em outras palavras, para uma sobreposição qualquer de 50% a tocha de soldagem percorre totalmente (100%) 3 vezes a mesma região do cordão de solda.

Figura 5.4 - Sobreposição da quantidade de vezes que a tocha de soldagem percorre a mesma região do cordão de solda.



Fonte: o próprio autor.

Com base nesse fundamento de análise, a Tabela 5.4 apresenta os resultados adequados e não adequados dos cordões de solda comparando com o percentual e número de vezes que a tocha passa sobre a mesma região do cordão. Fizeram-se diversas comparações entre os valores de cada região dos cordões que apresentaram bons resultados para verificar a existência de um padrão que explique em quais circunstâncias o processo é repetitivo e não apresenta *humping*.

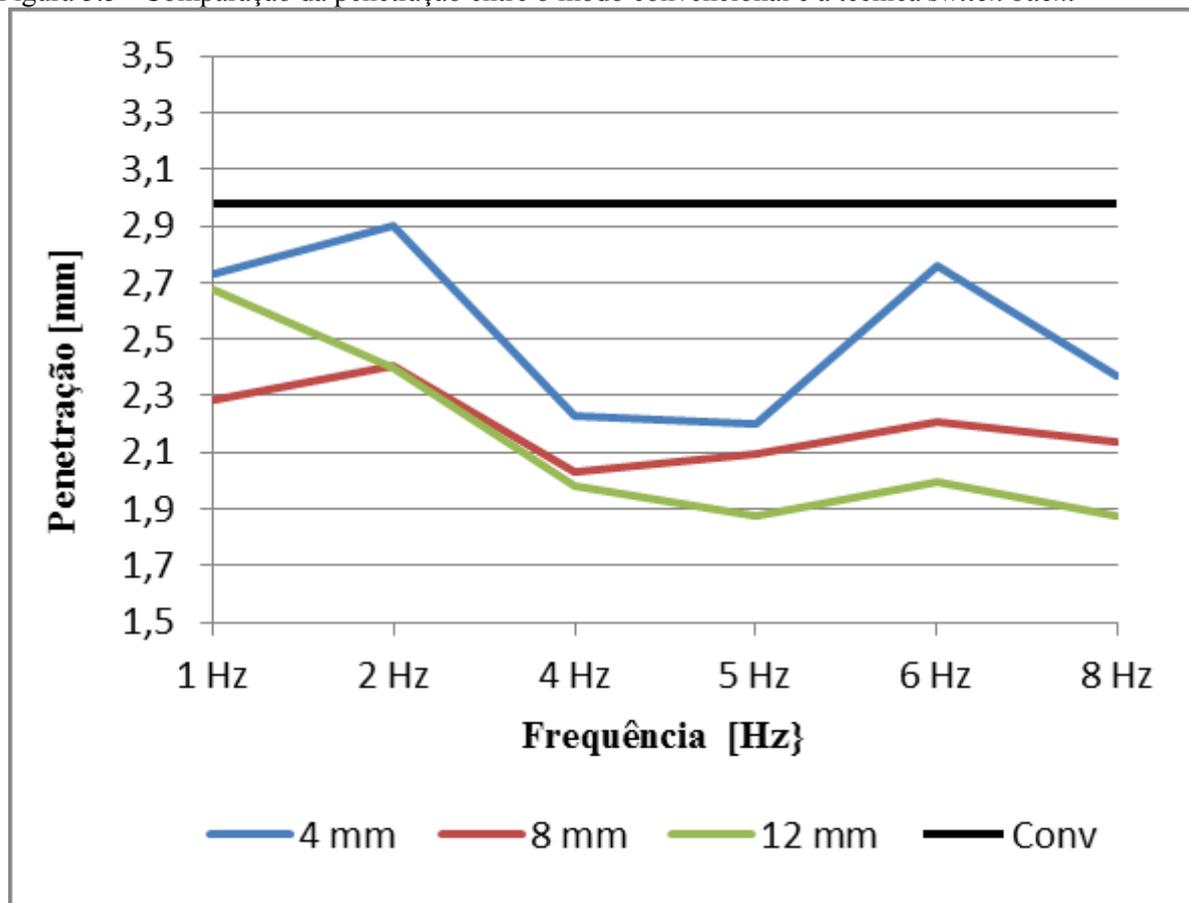
Tabela 5.4: Relação do percentual e número de vezes que a tocha cobre uma mesma região do cordão de solda.

Vs [cm/min]	f [Hz]	A [mm]	Número de vezes que a tocha para por região do cordão de solda				S [%]
			1 ^a Região	2 ^a Região	3 ^a Região	4 ^a Região	
20	1	4	3 vezes	1 vez	3 vezes	1 vez	42
20	1	8	3 vezes	3 vezes	3 vezes	5 vezes	64
20	1	12	5 vezes	5 vezes	7 vezes	5 vezes	74
20	2	4	3 vezes	3 vezes	5 vezes	5 vezes	64
20	2	8	5 vezes	7 vezes	7 vezes	5 vezes	79
20	2	12	7 vezes	9 vezes	11 vezes	11 vezes	86
20	4	4	5 vezes	5 vezes	5 vezes	5 vezes	81
20	4	8	9 vezes	11 vezes	13 vezes	9 vezes	89
20	4	12	15 vezes	19 vezes	20 vezes	14 vezes	93
20	5	4	7 vezes	7 vezes	7 vezes	3 vezes	85
20	5	8	13 vezes	17 vezes	13 vezes	8 vezes	91
20	5	12	19 vezes	20 vezes	20 vezes	14 vezes	95
20	6	4	9 vezes	11 vezes	6 vezes	1 vez	88
20	6	8	15 vezes	20 vezes	12 vezes	6 vezes	93
20	6	12	20 vezes	20 vezes	20 vezes	20 vezes	96
20	8	4	13 vezes	19 vezes	15 vezes	8 vezes	92
20	8	8	25 vezes	30 vezes	26 vezes	16 vezes	96
20	8	12	31 vezes	31 vezes	31 vezes	31 vezes	97

As cores grifadas na Tabela 5.4 representam em verde (bom resultado nas três repetições), na cor azul (bom resultado em duas repetições) e, na cor vermelha (não foi possível obter nenhum resultado adequado). Cada região do cordão representada de 1 a 4 representa um comprimento de 2 mm. Mesmo realizando diversas análises não foi possível identificar matematicamente porque a técnica *switch back* funciona bem em algumas situações e em outras não. Contudo, isso não significa que o estudo das relações entre as variáveis de soldagem, utilizando-se para isso modelos ou padrões matemáticos, não seja efetivo ou correto. Apenas para as situações encontradas nesse trabalho os métodos matemáticos de análise não identificaram um padrão.

A partir deste momento, os cordões foram seccionados e realizados os ensaios de metalografia analisando a macroestrutura de cada solda. A Figura 5.5 mostra a relação da frequência com a penetração para as três amplitudes ensaiadas, comparando as mesmas com a soldagem no modo convencional. Foram analisadas nove amostras de cada ensaio e os valores apresentados graficamente para os parâmetros geométricos são uma média dos mesmos.

Figura 5.5 - Comparação da penetração entre o modo convencional e a técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

Como se esperava, transcorreu uma menor penetração com o emprego da técnica de *switch back* quando comparado ao modo convencional. E, essa redução de penetração ocorreu tanto pelo incremento da frequência como da amplitude, corroborando com a impressão visual obtida durante os ensaios. Supunha-se também que quanto maior a sobreposição menor seriam os valores de penetração da solda. Analisando-se as linhas do gráfico da Figura 5.5 observa-se que os valores de penetração foram maiores para a amplitude de 4 mm com as frequências de 2 e 6 Hz, para a amplitude de 8 mm com as frequências de 2 Hz, 5 Hz e 6 Hz e, para a amplitude de 12 mm obteve um leve acréscimo de penetração para a frequência de 6

Hz. Com exceção do cordão com a configuração de 12 mm e 6 Hz, as configurações de 6 Hz e 4 mm e, 6 Hz e 8 apresentaram formação de *humping* em alguma das repetições.

Possivelmente, a medição realizada nos cordões com a presença de *humping* incidiu uma das seções de corte sobre uma região de cratera, o que fez com que o valor médio da penetração aumenta-se. Provavelmente, se o defeito não tivesse ocorrido os valores de penetração teriam sido menores. Quanto à exceção, não se notou a presença de defeitos em nenhuma das amostras.

Outro fato merece destaque. Citando-se, como exemplo, as configurações de 4 Hz e 8 mm e; o seu inverso de 8 Hz 4 mm, pode se verificar que ambas possuem o mesmo percentual de sobreposição de 90%, porque nesse condição a Vs foi mantida a mesma de 20 cm/min. Observa-se no entanto, que os valores médios da penetração foram diferentes, para o primeiro caso o valor foi de 2,033 mm e para o segundo de 2,372 mm. Para averiguar se isso ocorria para mais situações de mesma sobreposição, montou-se a Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Relação dos valores idênticos de sobreposição com a penetração.

Frequência [Hz]	Amplitude [mm]	S [%]	Vmín. [cm/min]	Vmáx. [cm/min]	Penetração [mm]
1	8	66	-130,8	170,8	2,282
2	4	66	-130,8	170,8	2,901
2	8	81	-281,6	321,6	2,405
4	4	81	-281,6	321,6	2,226
6	4	87	-432,4	472,4	2,758
2	12	87	-432,4	472,4	2,395
4	8	90	-583,2	632,2	2,033
8	4	90	-583,2	632,2	2,372
6	8	93	-658,6	698,6	2,211
4	12	93	-884,8	924,8	1,983
8	8	95	-1186,4	1226,4	2,135
5	12	95	-1111,0	1151	1,877

Observa-se pelas imagens das figuras Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 que, apenas os cordões com a configuração de 4 Hz e 8 mm e seu inverso (já citados anteriormente) e, também as sobreposições com a configuração de 8 Hz 8 mm e 5 Hz 12 mm não apresentaram *humping*. Nesta última a penetração também diferiu, sendo 2,135 mm para a primeira combinação e 1,877 mm para a segunda. Em todos os outros casos de sobreposição, em pelo menos uma das configurações, quando não as duas, apresentaram o referido defeito. O fato de muitos casos terem apresentado o defeito, dificulta a análise dos valores medidos da penetração relativos às mesmas sobreposições obtidas por configurações de frequência e

amplitudes distintas. Portanto, com base nos valores que puderam ser corretamente verificados, fica demonstrado que para um mesmo percentual de sobreposição obtido por diferentes combinações de amplitude e frequência, obtêm-se valores distintos de penetração.

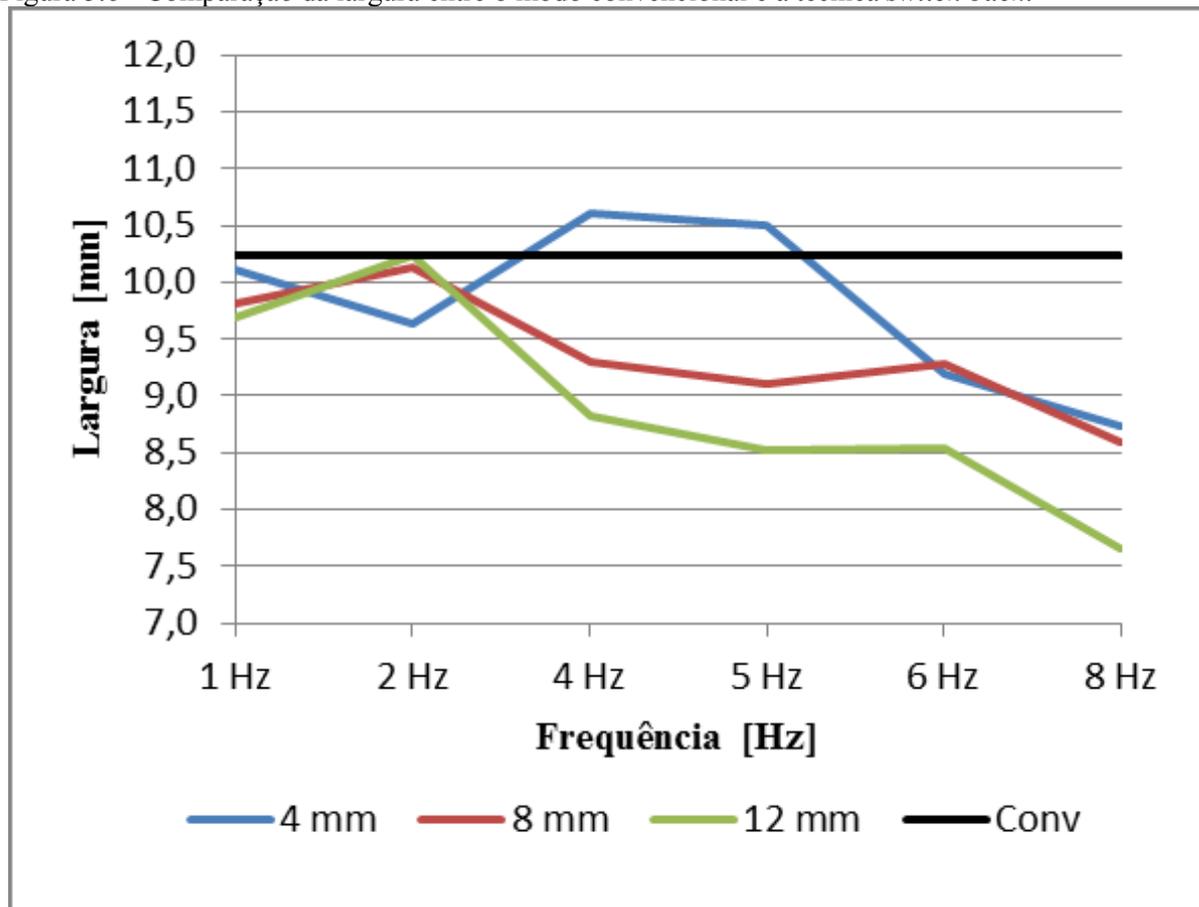
Semelhante ao estudo da penetração buscou-se averiguar o parâmetro geométrico da largura e da área fundida. Conforme esta sendo demonstrado por este trabalho e também pelos efeitos descritos na literatura, a técnica *switch back* tem a capacidade de diminuir a penetração. Com a análise da quantidade de área fundida e da largura dos cordões tem-se o intuito de verificar se a redução da penetração é fruto de uma largura maior de cordão ou se ocorre menor penetração porque funde menos material no corpo de prova.

Sequencialmente, são apresentados os gráficos obtidos para largura e área fundida da matriz de ensaios já conhecida. A Figura 5.6 e Figura 5.7 mostram a associação da frequência com a largura e área fundida, respectivamente, para as três amplitudes ensaiadas, comparando as mesmas com a soldagem no modo convencional.

De maneira abrangente e, por similitude com o gráfico da Figura 5.5, é possível afirmar que com o incremento da amplitude e da frequência, a largura e área fundida dos cordões sofrem diminuição.

Analisando primeiramente o gráfico da largura referente à Figura 5.6, observa-se que a aplicação da técnica *switch back* produziu cordões com larguras menores comparados com o modo convencional. As exceções ocorreram para as frequências de 2, 4, 5 e 6 Hz com 4 mm de amplitude e; 2 Hz com 12 mm, porém ao retomarmos a atenção para o gráfico da penetração, percebe-se que para essas mesmas configurações ocorreram uma grande redução da penetração da solda, dando a impressão de que um parâmetro age em contrário do outro. Para os casos envolvendo as frequências de 2 e 6 Hz com a amplitude de 4 mm, atenta-se ao fato de em ambos os casos sucedeu incidência de *humping*, o que produziu forte aumento da penetração, em contrapartida observa-se uma acentuada redução da largura. Em outras palavras, quando a penetração diminui a largura aumenta e vice versa.

Figura 5.6 - Comparação da largura entre o modo convencional e a técnica *switch back*.

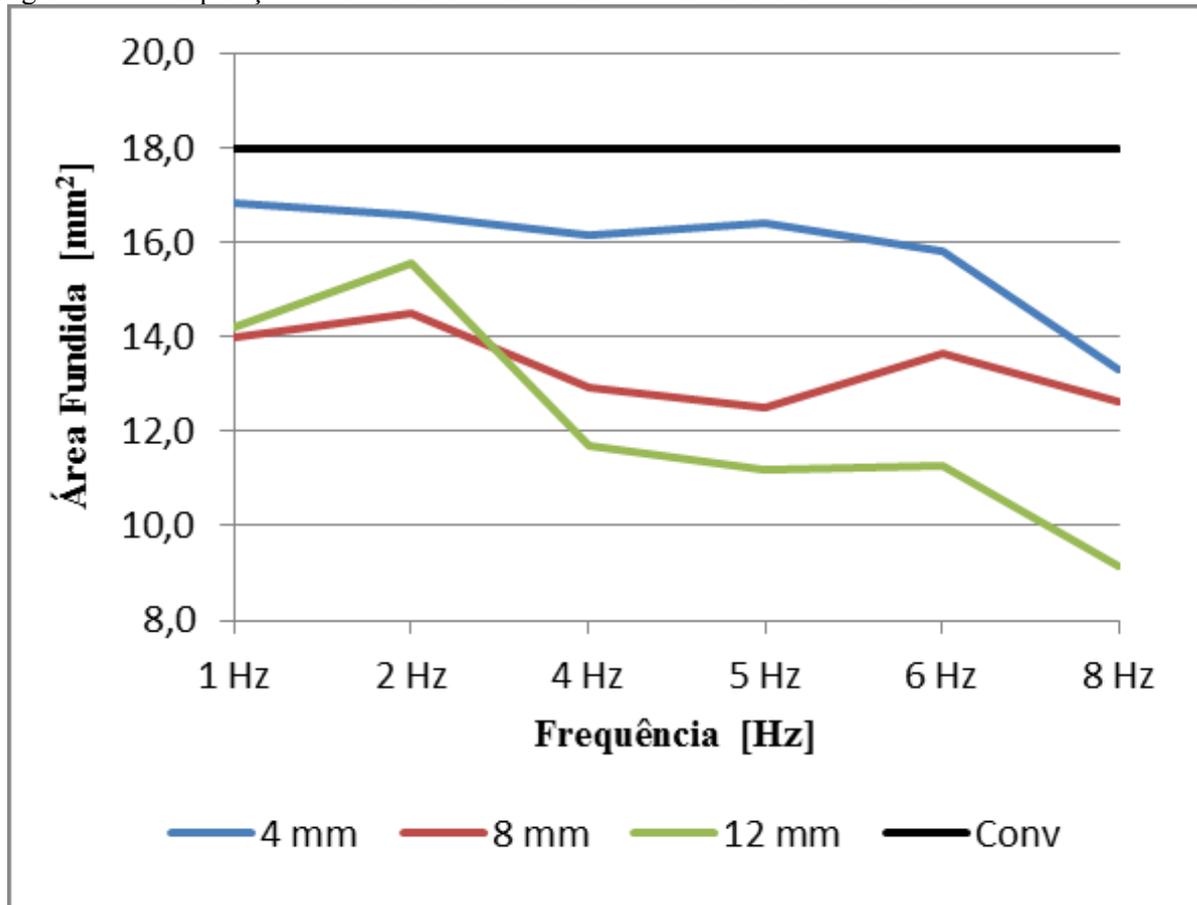


Fonte: o próprio autor.

Porém, quando analisamos os demais casos para as frequências de 1, 4, 5, 6 e 8 Hz com a amplitude de 12 mm e; todas as frequências relacionadas amplitude de 8 mm, consta-se que há uma proporcionalidade direta entre os parâmetros geométricos da penetração e largura, pois observa-se que quando um diminuiu, o outro comportou-se da mesma forma.

Curiosamente, outro detalhe averiguado é que para baixas frequências (1 e 2 Hz) têm-se a impressão de que os valores da largura para as três amplitudes estão aglomerados numa mesma região com valores bem próximos e, que a medida com que se aumenta a frequência há um distanciamento maior entre as linhas de amplitude, evidenciando que para altas frequências (maiores que 3 Hz) o incremento da amplitude reduz significativamente a largura.

Figura 5.7 - Comparação da área fundida entre o modo convencional e a técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

Dando continuidade à análise, e por fim, explorando o parâmetro da área fundida (Figura 5.7), também é praticável a interpretação de que tanto os incrementos de frequência quanto de amplitude produzem uma redução de área fundida quando comparado à quantificação do mesmo parâmetro geométrico com a soldagem no modo convencional. No entanto, percebe-se de modo mais evidente que a diminuição da área fundida é maior quando produzida pela variabilidade da amplitude.

Aqui, faz-se a presença de dois comportamentos distintos. No primeiro, quando se analisa a configuração com 2 Hz e 12 mm, nota-se que transcorreu uma redução da penetração, um aumento da largura e área fundida. Já no segundo caso, com a configuração de 6 Hz e 8 mm, a largura e área fundida repetiram o mesmo comportamento do primeiro caso, porém houve acréscimo da penetração. A partir desse ponto de contradição, faz-se necessário interpretar separadamente o comportamento dos parâmetros geométricos para a relação de aumento de frequência para cada amplitude plotada no gráfico.

Começando pela amplitude de 4 mm é admissível aceitar pela observância dos dados que para a faixa de frequência de 1 a 5 Hz, a penetração e a largura são inversamente

proporcionais e que a área fundida não parece sofrer grandes variações a isso, demonstrando apenas uma leve queda. Já para as frequências de 6 e 8 Hz, os três fatores parecem corroborar na mesma direção, neste caso de decréscimo.

Prosseguindo a análise, no que tange a amplitude de 8 mm, é factível de se comungar com a opinião de que os três critérios compartilham do mesmo comportamento. Ou seja, quando a penetração aumenta a largura e a área fundida também apresenta crescimento e quando o contrário ocorre, isso também se mostra verdadeiro. É importante destacar que os picos levemente elevados demonstrados nos gráficos desta amplitude, para as frequências de 2 Hz e 6 Hz, são por ventura influenciados pelos cordões que produziram *humping*.

E por fim, a análise da amplitude com 12 mm, demonstra de modo abrangente que quando ocorre a redução da penetração, o mesmo se segue com a largura e com a área fundida. A única exceção a regra observada é para a frequência de 2 Hz que parece realizar o oposto, ou seja, para esta frequência em específico a queda da penetração produziram elevações da largura e área fundida.

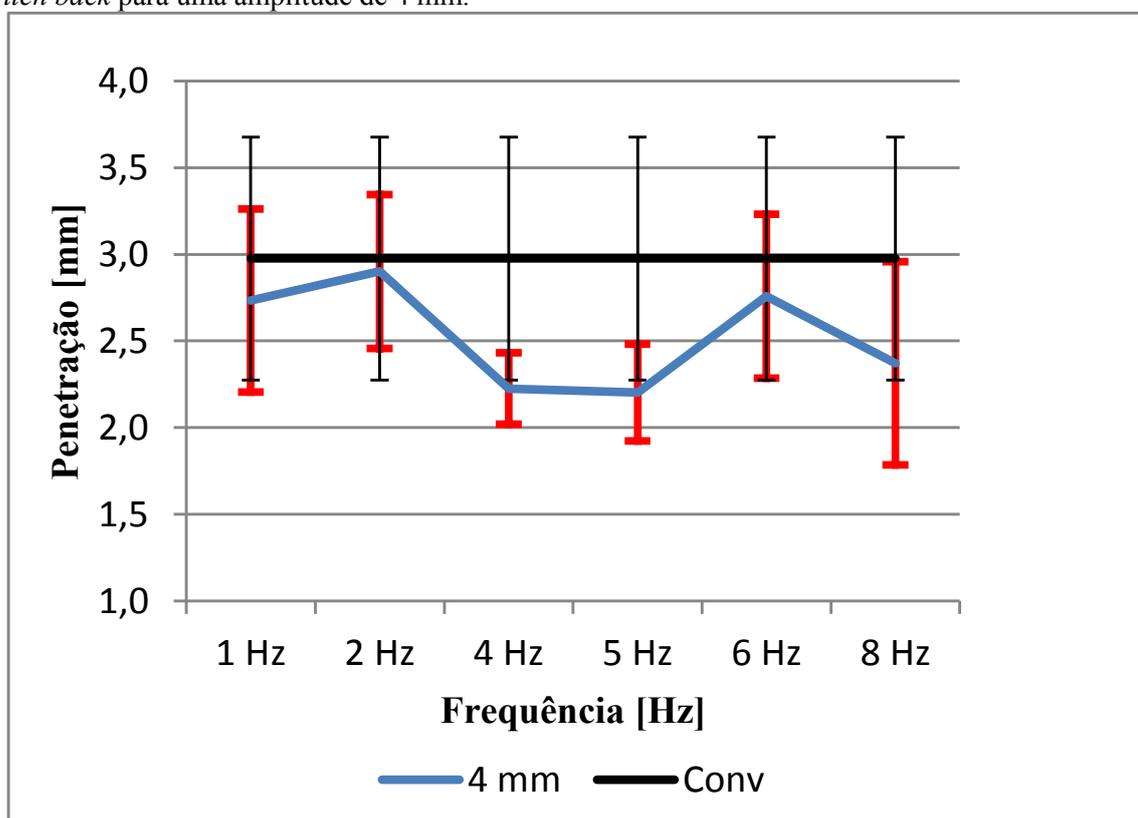
Se isolarmos a análise da largura, podemos categoricamente afirmar que a técnica *switch back* gera, pelo efeito de suas variáveis, um melhor controle da poça de fusão, impedindo o sucesso do *burn through*. Com a ação da frequência e da amplitude ocorre a redução da penetração, em virtude desta primeira a área fundida também se reduz, muito embora isso não ocorra para todas as situações, como já descrito anteriormente. Este trabalho atribui a este fenômeno a resposta que explica o êxito da aplicação da técnica *switch back* em soldagem de tubulação com juntas tipo “V” sem a utilização de anteparos. Fenômeno este, que não é explicado, mas apenas observado pelos autores que utilizaram a técnica até este momento.

Seguidamente, procurou-se verificar qual a variabilidade que existia em torno do valor médio das penetrações obtidas com o emprego da técnica *switch back*. Esta verificação foi feita calculando o desvio padrão das amostras para cada amplitude individualmente e dentro da gama de frequências utilizadas nos ensaios, após, os gráficos foram novamente plotados. O objetivo desta análise foi verificar a confiabilidade dos ensaios realizados. Por exemplo: se a variabilidade da penetração para um determinado ensaio for alta e, este ensaio tiver fornecido uma penetração acima daquela obtida pelo modo convencional, isso significa que este resultado não é muito confiável, o que necessitaria aumentar o número de ensaios para se conseguir um valor médio com menos variação. Por outro lado, se o desvio padrão das amostras para um determinado ensaio for pequena, significa que a confiabilidade é maior e pode-se afirmar que aquele valor de penetração pode estar realmente correto em relação ao

modo convencional. As figuras Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram o desvio padrão em torno da penetração média para as amplitudes de 4, 8 e 12 mm, respectivamente. Os valores representados no eixo da frequência estão entre as escalas para melhor visualização. A linha mais espessa em vermelho representa a variabilidade dos ensaios com o emprego do *switch back* e a linha de menor espessura em preto representa a variabilidade da soldagem no modo convencional.

Coincidência ou não, observando-se o gráfico da Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 constata-se que os cordões que apresentaram maior variabilidade nos valores de penetração foram aqueles onde incidiu *humping*. Nos ensaios realizados com a amplitude de 4 mm para as frequências de 1,2 e 5 Hz (que apresentaram *humping*) houve uma forte variabilidade da penetração, inclusive indica de acordo com a Figura 5.8 que seria possível obter penetrações maiores com o *switch back* quando comparado ao modo convencional, contrariando as análises já realizadas. O único caso para essa amplitude que também demonstra uma alta variabilidade de penetração é para a frequência de 8 Hz, porém mesmo se considerarmos a variabilidade máxima positiva desse ensaio, ainda estaríamos levemente abaixo do patamar de penetração obtido pelo modo convencional.

Figura 5.8 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica *switch back* para uma amplitude de 4 mm.

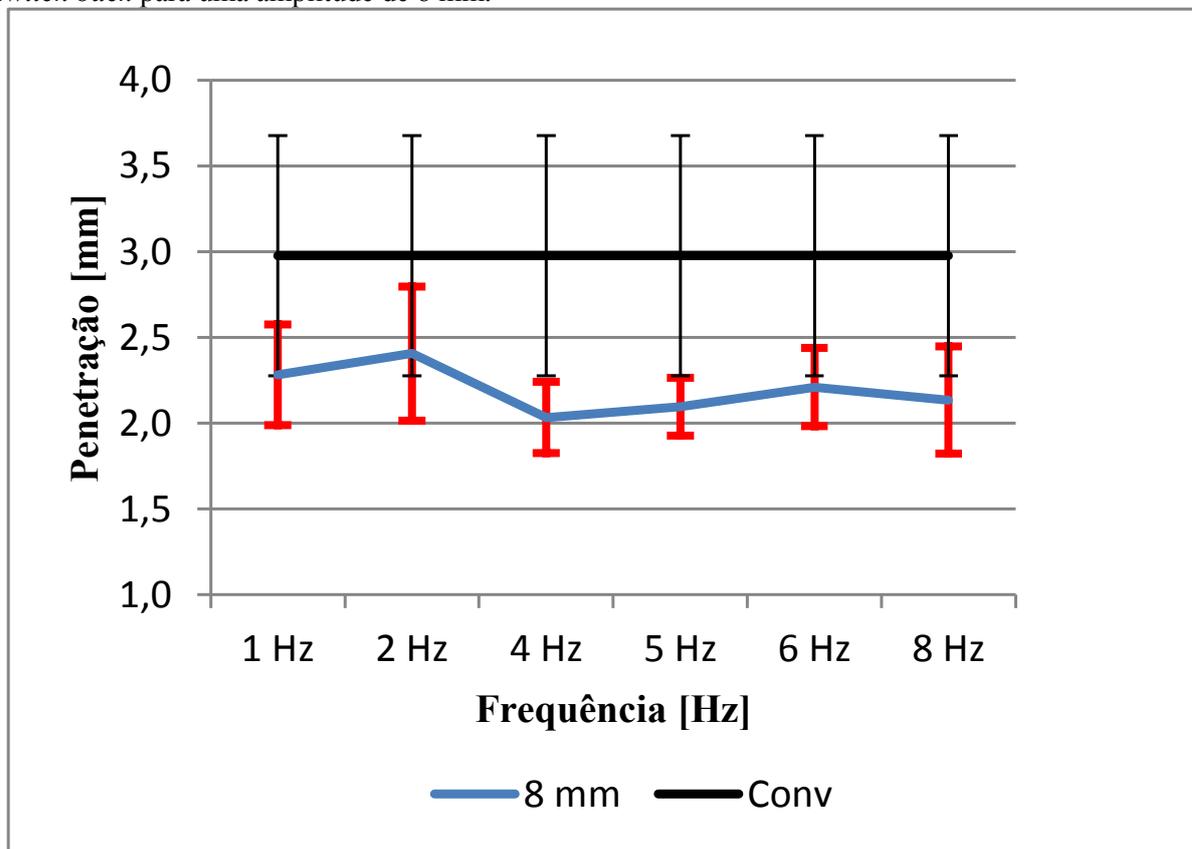


Fonte: o próprio autor.

Efeito semelhante pode ser observado no gráfico da Figura 5.9, onde os cordões que apresentaram *humping* produziram grande variabilidade. No cordão produzido com a frequência de 8 Hz não incidiu *humping*, porém estranhamente sua variabilidade foi ligeiramente superior aos cordões ensaiados com 5 e 6 Hz de frequência, que apresentaram *humping*. A variabilidade também foi maior para a amplitude de 12 mm com as frequências de 4, 5, 6 e 8 Hz do que para as frequências de 1 e 2 Hz. Mesmo com maior variabilidade para dadas frequências as mesmas ficaram bem abaixo na penetração obtida com o modo convencional.

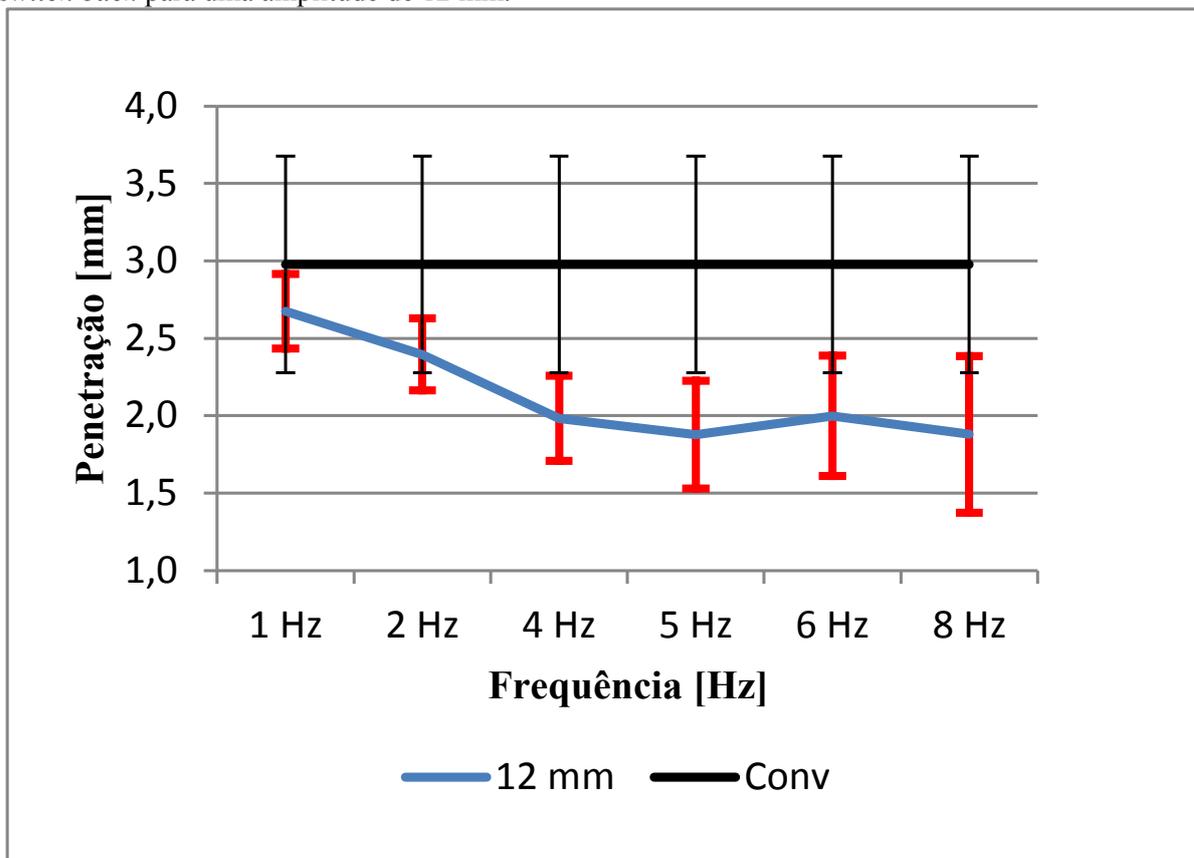
Ao observarmos a Figura 5.8, percebe-se que para a frequência de 1 Hz a variação mínima do modo convencional demonstra ser possível alcançar uma penetração menor que a variação mínima obtida pela técnica *switch back*. Porém, esta interpretação não está correta, porque nesse caso quanto maior a variabilidade de um processo menos confiável e repetitivo o mesmo é. Além disso, a soldagem com o modo convencional apresentou *humping* em todas as amostras, mesmo que de alguma forma ele possa apresentar menor penetração, esse defeito inviabiliza a sua aplicação industrial, sendo reprovável em um controle de qualidade.

Figura 5.9 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica *switch back* para uma amplitude de 8 mm.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.10 - Desvio padrão dos valores de penetração obtidos com a soldagem empregando a técnica *switch back* para uma amplitude de 12 mm.



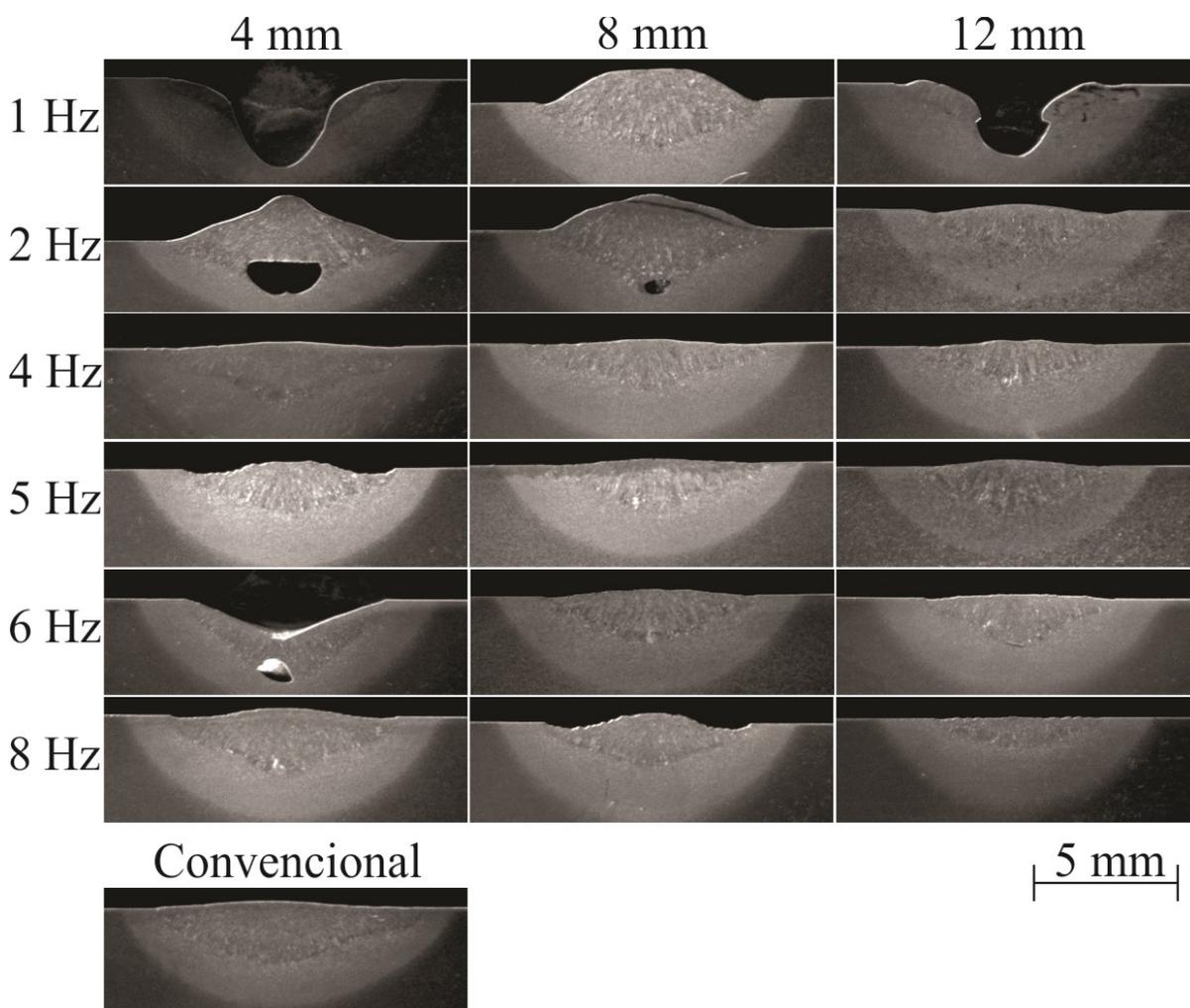
Fonte: o próprio autor.

A Figura 5.11 ilustra as imagens das macrografias que representam os perfis dos cordões de solda para a primeira amostra de ensaios realizada. O corte da seção transversal destes cordões encontram-se na posição 120 mm.

Observa-se pelas imagens que as configurações 2 Hz com 12 mm, 5 Hz com 4mm, 8 Hz com 4mm e 8 Hz com 8 mm apresentaram mordeduras, contrariando a literatura que afirma que a aplicação da técnica *switch back* reduz o surgimento desta descontinuidade. Porém, ressalta-se que este fato possivelmente ocorreu em razão de ter sido realizado de modo autógeno, e por alguma razão a poça de fusão não conseguiu se espalhar para as laterais do cordão antes da solidificação. Mesmo assim, este trabalho não pode afirmar que o emprego da técnica *switch back* reduz ou elimina a presença de mordeduras.

Também é possível verifica que as imagens dos ensaios com 1 Hz com 4 e 12 mm são regiões do cordão de solda localizadas na cratera do *humping*. E, as imagens de 2 Hz e 6 Hz para a amplitude de 4 mm foram as regiões do cordão onde ocorreram *humping* tipo *tunneling*, assim como observa-se na condição 2 Hz e 8 mm.

Figura 5.11 - Imagens das macrografias dos cordões realizados com o processo TIG autógeno no modo *switch back* e convencional. Seção transversal do corte na posição 120 mm.



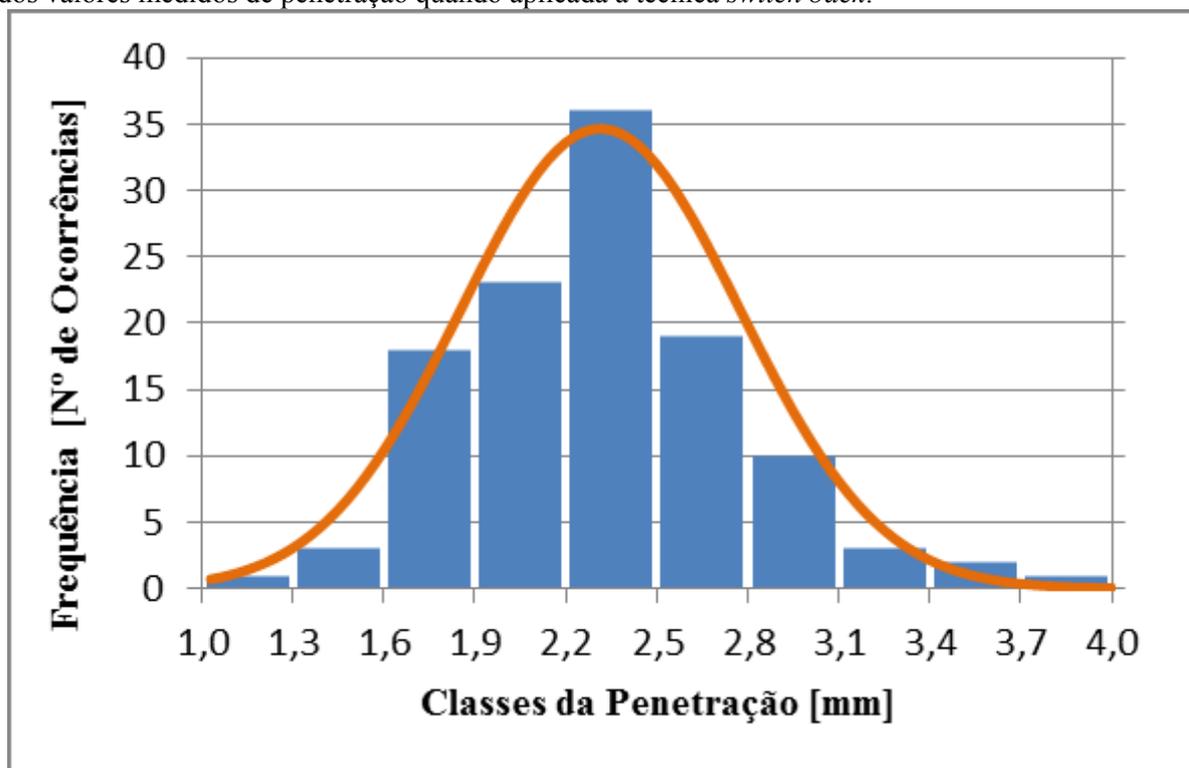
Fonte: o próprio autor.

Dando prosseguimento as análises, intencionou-se determinar qual variável representava maior impacto sobre cada um dos parâmetros geométricos do cordão, a amplitude ou a frequência.

Primeiramente, pretendeu-se calcular diretamente a diferença entre os valores das amplitudes de 4 e 12 mm para cada frequência e, na sequência, calcular a diferença de valores obtidos na variação da frequência e 8 e 1 Hz para cada amplitude e, finalmente mensurar o percentual dessas diferenças. No entanto, percebeu-se que esta metodologia não parecia adequada, isso em vista de que a amplitude de 4 para 12 mm crescia proporcionalmente três vezes, enquanto que a frequência de 1 para 8 Hz aumentava oito vezes, o que por certo produziria conclusões equivocadas.

A maneira encontrada para resolver esta situação foi empregar um recurso estatístico conhecido como análise de variância para experimentos fatoriais. A análise de variância (ANOVA) é um procedimento estatístico utilizado para comparar dois fatores com três ou mais tratamentos, a fim de se quantificar o quanto cada fator afeta a variável resposta do experimento e, se existem alguma interação (dependência) entre esses mesmos fatores. Porém o uso desta ferramenta tem uma restrição. Para se aplicar a análise de variância à mesma necessita atender no mínimo a uma das três hipóteses seguintes (a): as amostras dos ensaios devem ser independentes entre si; (b): as populações dos diferentes tratamentos devem ter a mesma variância ou; (c): as populações devem ter distribuição normal. O modo escolhido para analisar os dados foi pelo histograma com a presença da linha de distribuição normal. A Figura 5.12 ilustra um histograma que relaciona a frequência de distribuição com as classes ou faixas de valores da penetração. Pelo teste de normalidade demonstrado na Figura 5.12 é possível perceber que os valores medidos da penetração comportam-se de acordo com uma distribuição normal de dados e, ainda que, os valores de penetração que mais ocorreram para a matriz ensaiada concentram-se entre 1,6 e 2,8 mm. O mesmo foi realizado para os parâmetros da largura e da área fundida que também apresentaram a mesma resposta, porém os gráficos não foram plotados aqui neste trabalho. Apenas para fornecer uma informação mais completa, a Tabela 5.6 apresenta o valor médio com desvio padrão e a região com maior concentração de dados para os três parâmetros analisados.

Figura 5.12 - Histograma com curva normal que representa a distribuição e frequência da ocorrências dos valores medidos de penetração quando aplicada a técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 5.6: Valores médios com desvio padrão e principal concentração de valores dos parâmetros analisados na matriz de ensaios do *switch back*.

Parâmetro	Média	Desv. Padrão	Faixa de Ocorrência
Penetração [mm]	2,31	0,46	1,6 a 2,8
Área Fundida [mm ²]	13,92	3,62	9,0 a 19,0
Largura [mm]	9,38	1,34	8,0 a 11,00

Dando continuidade, os cálculos para a análise de variância foram efetuados com o auxílio do *software* MS Excel.

Para a execução destes cálculos foram considerados dois fatores (frequência e amplitude), 6 tratamentos para a frequência (1, 2, 4, 5, 6 e 8 Hz) e mais 3 tratamentos para a amplitude (4, 8 e 12 mm). O nível de significância adotado é de 0,05, ou seja, uma probabilidade de 95% dos resultados estarem corretos. A Tabela 5.7 demonstra os resultados obtidos pela análise estatística da variância.

Tabela 5.7: Resultados da análise de variância para determinação da influência da amplitude e frequência sobre os parâmetros geométricos dos ensaios de caracterização do *switch back*.

Resultados para Penetração						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Frequência	4,03	5	0,81	18,20	5,53E-09	2,48
Amplitude	5,64	2	2,82	63,67	1,51E-12	3,26
Interações	1,45	10	0,15	3,28	4,18E-03	2,11
Resultados para Largura						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Frequência	19,23	5	3,85	2,78	0,03	2,48
Amplitude	8,40	2	4,20	3,03	0,06	3,26
Interações	6,80	10	0,68	0,49	0,88	2,11
Resultados para Área Fundida						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Frequência	94,72	5	18,94	1,97	0,11	2,48
Amplitude	132,13	2	66,06	6,88	0,00	3,26
Interações	28,26	10	2,83	0,29	0,98	2,11

Com base na observação da Tabela 5.7 percebe-se que para os resultados da penetração obteve-se o valor $F > F_{\text{crítico}}$ para as variáveis da frequência e amplitude. Já para a largura tem-se que o valor $F > F_{\text{crítico}}$ apenas para a frequência, ocorrendo o inverso para a amplitude. Por outro lado, para a área fundida ocorreu o contrário, o valor $F < F_{\text{crítico}}$ para a frequência e maior para a amplitude. Consta-se também que o valor da interação das duas variáveis $F > F_{\text{crítico}}$ é válido somente quando se trata da penetração, para as outras duas variáveis ocorreu o inverso. A interpretação de dizer que $F > F_{\text{crítico}}$ para as variáveis da frequência e amplitude quando se analisa o parâmetro da penetração é de que as duas variáveis tem forte influência e interferem sobre a variabilidade da penetração nos ensaios realizados. Porém, nesse caso pela análise estatística, verifica-se que a amplitude exerce uma influência maior que a frequência. Por outro lado, quando se faz o mesmo raciocínio coma interação das duas variáveis percebe-se também que o valor de $F > F_{\text{crítico}}$, porém nesse caso, tanto o valor de F quanto a diferença são pequenas. Nos outros casos, referindo-se à largura e área fundida, percebe-se inclusive que $F < F_{\text{crítico}}$ para as duas interações. Isso leva a crer que na aplicação da técnica *switch back* as variáveis da frequência e da amplitude são

independentes. Com isso, significa dizer que quando se muda o patamar de frequência, pouca ou nenhuma influência incide sobre a amplitude e, sendo o contrário isso também é verdadeiro.

Cabe ressaltar, que sucedeu uma grande divergência entre o valor estatístico e a observação visual no que se refere a qual variável (frequência ou amplitude) tem maior impacto sobre a penetração. Visualmente, percebeu-se durante a realização dos ensaios que a mudança no patamar da frequência impactava mais sobre a penetração, principalmente na soldagem de chapas de 2 e 3 mm em junta de topo, enquanto que a análise estatística constata o contrário. A hipótese que se encontrou para explicar o ocorrido foi de que a análise estatística avalia o conjunto de dados como um todo, não separando a análise por faixas de operação. Verifica-se, como dito anteriormente, que as frequências de 2 e 6 Hz quando combinadas com a amplitude de 4 mm produziram *humping*, ocorrendo o mesmo para as frequências de 1 Hz e 2 Hz com as amplitudes de 8 e 12 mm. A ocorrência deste defeito faz com que haja um grande distanciamento entre os valores quando plotados graficamente, dessa forma produzindo interpretações incorretas quando vistos sob um ponto de vista estatístico. Por outro lado, obter conclusões somente com base em meras visualizações, impressões e sensibilidades obtidas através de uma máscara de solda, sem analisar rigorosamente os dados, não parecer ser uma atitude prudente.

Mesmo que não se possa definitiva e categoricamente afirmar que uma variável é mais ou menos impactante sobre o parâmetro da penetração, é possível pelo menos dizer que as duas variáveis influenciam respectivamente e inversamente sobre a mesma, ou seja, quando de incrementa tanto a frequência como a amplitude, ambas fazem decrescer a penetração na junta soldada.

Entretanto, é possível corroborar com os efeitos da amplitude sobre a área fundida serem maiores do que os produzidos pela frequência, uma vez que se teve a mesma observância visual que a resposta da análise de variância.

E para finalizar, com relação à largura também ocorreu o conflito entre a observação visual e o resultado estatístico, porém nesse caso deu-se o contrário do parâmetro da penetração. Aqui, o parâmetro estatístico afirma que a variável da amplitude não influencia a largura, apenas a frequência. Mesmo assim observa-se que a diferença entre os valores de F e $F_{\text{crítico}}$ tanto para a amplitude como para a frequência foram baixos e, o que pode ter produzido esse resultado estatístico é o fato de ter ocorrido um valor de largura com o uso de *switch back* maior que o convencional para os ensaios com as configurações de 4 e 5 Hz para a frequência combinadas à amplitude de 4 mm e, 1 e 2 Hz combinadas as amplitudes de 8 e 12

mm. Este trabalho interpreta que as duas variáveis apresentam proporcional impacto sobre o parâmetro da largura.

5.2 COMPARAÇÃO DA SOLDAGEM REALIZADA COM A MOVIMENTAÇÃO *SWITCH BACK* ENTRE O ROBÔ ANTROPOMÓRFICO REIS RV-15 E O MANIPULADOR SPS TARTÍLOPE V2 COM O SISTEMA DE OSCILAÇÃO

O objetivo principal da realização deste ensaio foi verificar se o *switch back* produzido pelo sistema de oscilação obtinha resultados semelhantes àqueles alcançados por Wizenmann [2] obtidos por meio do uso do robô antropomórfico REIS RV-15. Esta comparação ficou limitada apenas a baixas frequências, (menores de 3 Hz). A razão para isso é de que os robôs antropomórficos são limitados pela dinâmica de seus servomotores e não conseguem realizar os movimentos de avanço e reversão a uma frequência maior do que a supracitada. Já como propósito secundário decidiu-se verificar as vantagens e desvantagens quanto à utilização do sistema de oscilação junto ao robô e comparar quando o mesmo é utilizado acoplado ao Tartílope.

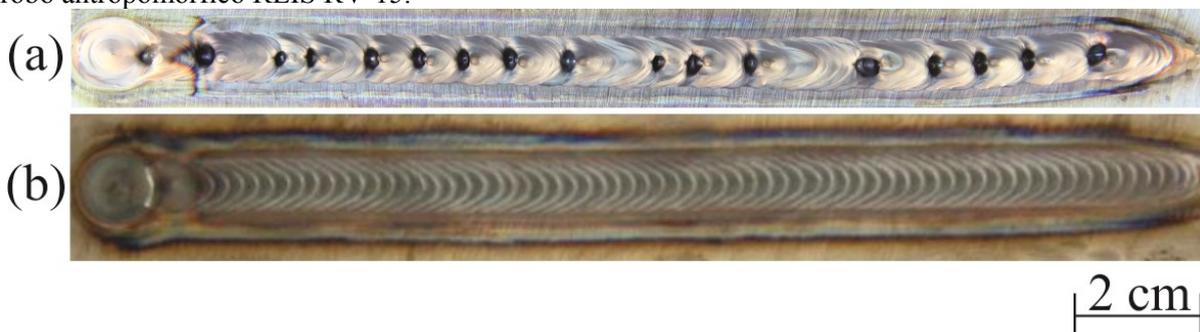
Os resultados obtidos por Weizenmann [2] alcançaram repetibilidade. Buscando-se realizar um ensaio com o sistema de oscilação nas mesmas condições que Weizenmann, preocupou-se em manter os mesmos parâmetros adotados pelo autor, com exceção de apenas dois: a dimensão da espessura do corpo de prova e o ângulo de afiação do eletrodo. A razão de se utilizar uma chapa com espessura diferente foi a disponibilidade de material. Quanto ao ângulo de afiação do eletrodo utilizou-se de 40° porque este é o valor que o afiador elétrico manual tem capacidade para realizar.

Cabe ressaltar ainda que para o robô antropomórfico REIS RV-15 é possível selecionar patamares de deslocamento e tempo tanto para o avanço como para reversão diferentes. No caso do sistema de oscilação pode-se apenas selecionar um único valor de deslocamento, denominado neste caso como amplitude. Os deslocamentos de avanço e reversão serão sempre dependentes da amplitude, velocidade de soldagem e frequência de oscilação.

Porém, mesmo com esta divergência é possível selecionar um valor de amplitude que suceda os mesmos 10 mm de deslocamento de avanço e 7,5 mm de deslocamento de reversão, considerando a frequência de 2 Hz e a velocidade de soldagem de 30 cm/min e corrente média de 300 A. O valor desta amplitude, a qual foi selecionada foi de 8,7 mm. A Figura 5.13 (a)

mostra o resultado do cordão de solda realizado com o sistema de oscilação para fins de comparação com o resultado obtido por Wizenmann, ilustrado na Figura 5.13 (b).

Figura 5.13 - Imagem dos cordões de solda obtidos pela técnica *switch back* com $I_m = 300 \text{ AVs} = 30 \text{ cm/min}$ e $f = 2 \text{ Hz}$. Em (a): cordão realizado com o sistema de oscilação e, em (b): cordão obtido pelo robô antropomórfico REIS RV-15.



Fonte: o próprio autor.

Observando-se as imagens dos cordões da Figura 5.13 verifica-se que o resultado obtido pelo sistema de oscilação apresentou *humping* distribuído do início ao término da solda, enquanto que o resultado produzido pelo robô antropomórfico apresentou um cordão regular e sem defeitos.

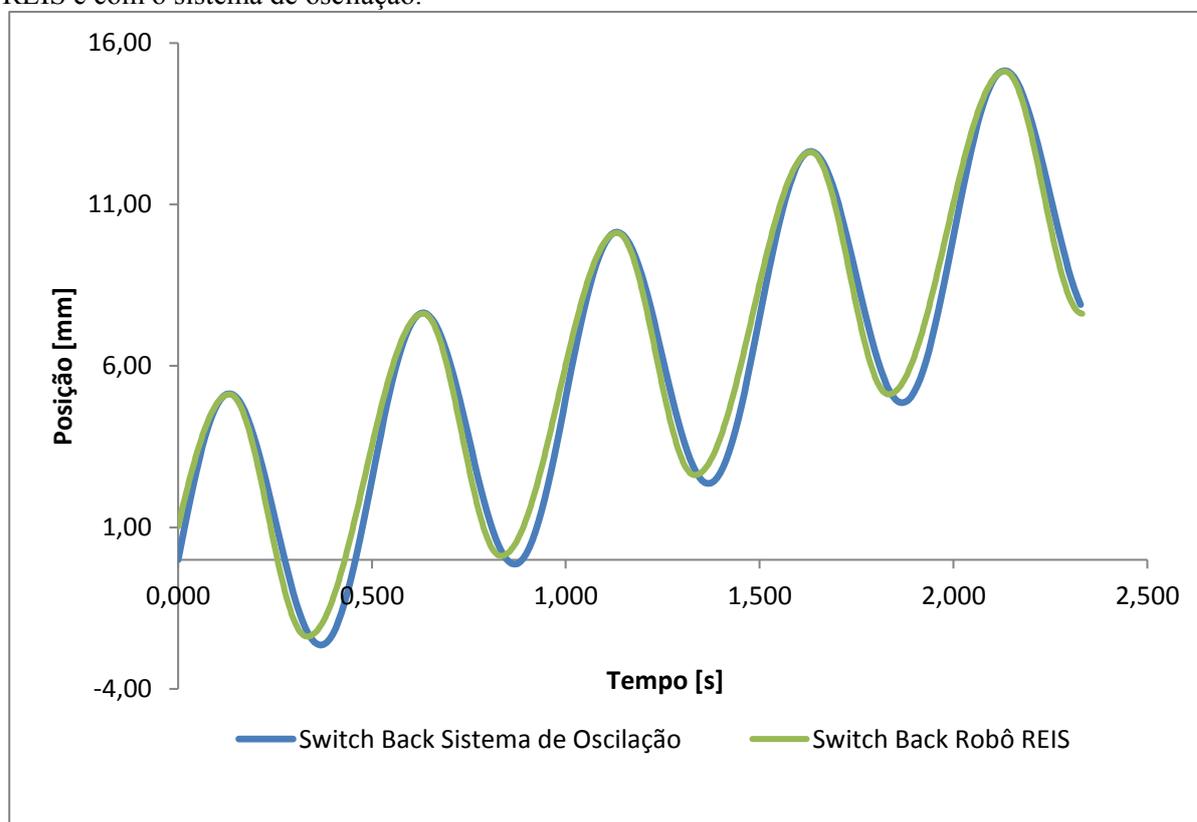
Idealmente, o movimento de oscilação produzido pelo robô REIS RV-15 apresenta uma aceleração instantânea no momento que ocorre a inversão dos movimentos entre avanço e retrocesso. Isso permite com que, ao movimentar-se (independente do sentido de movimentação) a velocidade instantânea da tocha seja sempre constante, ou seja, a velocidade instantânea (em qualquer ponto) é exatamente a mesma que a velocidade média do mesmo percurso. Na prática sabe-se que existe uma rampa de aceleração semelhante a do módulo de oscilação. Por outro lado, a movimentação do sistema de oscilação é bastante diferente. Para este, há uma variação de velocidades que vai de zero nas extremidades (exatamente onde há inversão do sentido da tocha), até um valor máximo que se encontra quando o módulo de oscilação passa pelo seu eixo central. Além do mais, essa mesma variação de velocidades de um valor mínimo até um valor máximo, ocorre quatro vezes por ciclo de oscilação, ou seja, duas vezes no avanço e mais duas vezes durante a reversão. Não obstante, a aceleração do módulo de oscilação não possui um valor constante. Isso implica que a velocidade do oscilador não cresce ou decresce de maneira geometricamente linear.

Em virtude desses fatos previamente analisados, cogitou-se a possibilidade de que é por esta razão que os resultados produzidos pelo sistema de oscilação são tão diferentes daqueles obtidos pelo robô antropomórfico alcançado por Wizenmann [2]. Para analisar

melhor os dois movimentos de *switch back*, e poder compará-los, foi necessário equacionar os dois movimentos e posteriormente plotar um gráfico de posição em função do tempo. Após selecionou-se dois tempos para cada oscilação dos dois movimentos, na mesma posição. Tanto para o sistema de oscilação quanto para o robô REIS, os tempos escolhidos foram, dentro do possível, os mais próximos dentro da inversão do movimento, sendo assim um instante de tempo “t” selecionado antes da reversão e outro instante de tempo “t” selecionado após a reversão do movimento.

A Figura 5.14 mostra um gráfico com as duas trajetórias de *switch back*, a do robô e a do sistema de oscilação. As duas trajetórias estão em fase uma com a outra.

Figura 5.14 - Comparação entre os movimentos de *switch back* produzidos com o robô antropomórfico REIS e com o sistema de oscilação.



Fonte: o próprio autor.

A partir dos tempos selecionados para a mesma posição, fez-se uma subtração dos mesmos, tanto para o oscilador como para o robô antropomórfico. E posteriormente, fez-se novamente uma subtração entre a diferença obtida pelo oscilador com a diferença obtida pelo robô antropomórfico, obtendo assim um instante de tempo resultante (t_r).

Posteriormente, de posse do valor do instante de tempo resultante para cada oscilação, este valor foi multiplicado pelo número de oscilações que, nesta arquitetura das

variáveis de soldagem, representa o número de oscilações para o comprimento total do cordão de solda (250 mm).

No trabalho apresentado por Wizenmann [2], verifica-se que o movimento de *switch back* apresenta velocidades de avanço e reversão diferentes. Para o avanço, a tocha percorre uma distância de 10 mm em 300 ms, o que resulta em uma velocidade de avanço de 33,33 mm/s. Para a reversão, a tocha percorre 7,5 mm em 200 ms, o que resulta em uma velocidade de reversão de 37,50 mm/s.

Também no presente trabalho, onde se utiliza um sistema de oscilação independente do movimento de soldagem, as velocidades resultantes de avanço e reversão obtidas pela combinação do módulo de oscilação com a movimentação do manipulador, são diferentes.

A velocidade média do módulo de oscilação obtida com uma amplitude de 8,7 mm e uma frequência de 2 Hz é de 34,80 mm/s. Já para o manipulador a velocidade média é 5,00 mm/s. Portanto, a velocidade média de avanço para o conjunto é de 39,80 mm/s e de 29,80 mm/s para a velocidade média de reversão.

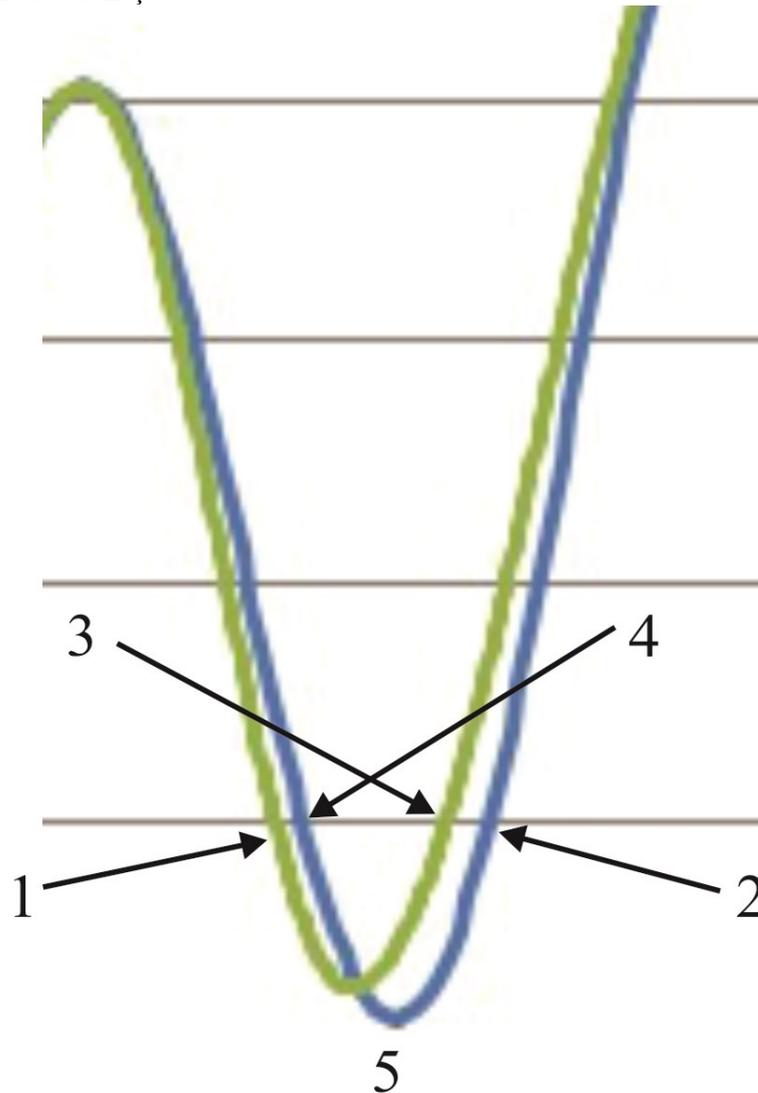
Com base na comparação dos valores obtidos das velocidades resultantes das duas situações verifica-se que a velocidade média de avanço do módulo de oscilação é maior que a do robô antropomórfico ($39,80 \text{ mm/s} > 33,33 \text{ mm/s}$) e, que quando se observa a velocidade média da reversão ocorre o contrário, a velocidade do robô antropomórfico é maior que a do módulo de oscilação ($37,50 \text{ mm/s} > 29,80 \text{ mm/s}$).

Para calcular o número de oscilações é necessário estimar um comprimento de cordão idêntico para os dois casos. Pra facilitar os cálculos escolheu-se um comprimento de 30 cm de cordão, ou 300 mm. Como a velocidade de soldagem é a mesma para os dois casos (30 cm/min ou 5 mm/s), temos 60 oscilações. Porém, como a frequência dessas oscilações ocorrem a cada 2 Hz temos um total de 120 oscilações. Cada oscilação possui dois extremos (um pico e um vale), portanto são consideradas 240 extremidades. Cabe ressaltar que para utilizar a amplitude de 8,7 mm que resulta na mesma sobreposição de 75%, assim utilizada por Wizenmann [2], foi necessário corrigir esse valor real pela da equação do gráfico da Figura 4.13.

Posteriormente, analisando a Figura 5.14, precisasse encontrar os instantes de tempo “t” antes da reversão e depois da reversão para o módulo de oscilação e para o robô antropomórfico (Figura 5.15), considerando a mesma diferença de posições. Nesse caso adotou-se uma posição de 4,0 mm antes da reversão e 4,0 mm depois da reversão. Estes afastamentos foram escolhidos levando-se em consideração um diâmetro do arco de 3 mm, portanto 1,5 é o ponto central do arco e, conseqüentemente do eletrodo. Com essas diferenças

de variação de tempo entre o módulo de oscilação e o robô antropomórfico é possível identificar quanto tempo a mais o módulo de oscilação permanece na extremidade do movimento para um cordão com comprimento total de 300 mm.

Figura 5.15 - Expansão da terceira extremidade do vale da combinação do movimento *switch back* do robô antropomórfico e do sistema de oscilação. A linha em verde representa o robô e a linha em azul representa o sistema de oscilação.



Fonte: o próprio autor.

Os números na Figura 5.15 identificam os instantes de tempo para uma posição de 4,0 mm, onde:

- t_1 = instante de tempo para o robô no período de reversão
- t_2 = instante de tempo para o oscilador no período de avanço
- t_3 = instante de tempo para o robô no período de avanço
- t_4 = instante de tempo para o oscilador no período de reversão
- t_5 = instante de tempo para o ponto de inflexão

Tem-se que:

$$T_{\text{robô}} = t_3 - t_1 = 1,4075 - 1,2750 = 0,1325 \text{ s}$$

$$T_{\text{oscilador}} = t_2 - t_4 = 1,4380 - 1,2750 = 0,1655 \text{ s}$$

$$T_r = T_{\text{oscilador}} - T_{\text{robô}} = 0,1655 - 0,1325 = 0,033 \text{ s}$$

Multiplicando-se a diferença de tempo de 0,033 s pelo número de extremidades de oscilação temos:

$$\text{Tempo total} = 240 * 0,033 = 7,92 \text{ s}$$

Este tempo total (7,92 s) representa a quantidade de tempo que o sistema de oscilação fica a mais que o robô antropomórfico nas distâncias de 4,0 mm de avanço e mais 4,0 mm de reversão a partir da extremidade de cada crista e vale para cada oscilação ao longo de 300 mm de cordão de solda. Isto significa que o movimento de *switch back* realizada pelo sistema de oscilação permanece mais tempo depositando energia nas extremidades e menos tempo na região central do movimento. Esta diferença pode explicar o porquê o oscilador não consegue repetir as soldas feitas por Wizenmann [2] no robô antropomórfico.

Pode-se pensar até que o movimento de oscilação com a técnica *switch back* realizado pelo sistema de oscilação é na verdade um pulsado térmico realizado mecanicamente com uma inversão de sentido no seu movimento.

Dando sequência, ao término das soldas realizou-se uma avaliação dos dois equipamentos, o robô e o Tartilope, a fim de verificar suas vantagens e desvantagens no que tange a capacidade de aplicação do *switch back* com o sistema de oscilação.

A principal vantagem percebida pelo robô antropomórfico em comparação ao Tartilope foi com relação à resolução. Esta característica demonstrou-se crucial quando realizada a soldagem de união das chapas finas em junta de aresta na posição horizontal. Relembrando, nesta situação os corpos de prova apresentavam um comprimento de 30 cm e um desalinhamento máximo de 1 mm ao centro dos mesmos.

Quando as soldas foram realizadas no Tartilope V2 (que apresenta apenas dois eixos, (X) e (Y)), a regulagem da altura do suporte de tocha para alinhar a ponta do eletrodo a junta foi feita manualmente. O sistema de movimentação deste suporte é do tipo engrenagem cremalheira e tem pouca precisão e resolução. Em outras palavras, o alinhamento para que o eletrodo permanecesse paralelo ao centro da junta dependia de uma regulagem manual. Por esta razão fez-se necessário nivelar o suporte dos corpos de prova com a ponta da tocha, conferindo o paralelismo visualmente da DEP com a arruela. Esta conferência era necessária

toda vez que se trocava um corpo de prova por outro, devido à deformação natural de cada um e também ao aperto que se dava nos grampos de fixação de ambas as extremidades.

Em suma, a movimentação do Tartílope V2 para acompanhar o desnível do corpo de prova não consegue executar reta inclinada verticalmente, o que por sua vez, o robô antropomórfico consegue realizar porque maior resolução.

Por outro lado, a principal desvantagem atribuída ao robô antropomórfico foi o excesso de vibração. Quando acionado o módulo de oscilação em alta frequência, a atividade do mesmo produz uma vibração natural de seu funcionamento, porém é agravada ou amplificada pelo braço de alavanca formado ente a junta de um dos eixos do robô antropomórfico com o módulo propriamente dito. Possivelmente, esta constatação poderia modificar os deslocamentos de avanço e reversão produzidos aumentando-os, fazendo nesse caso com que a sobreposição de trajetória fosse maior, podendo levar a conclusões distorcidas do fenômeno estudado. Acrescentando-se outro aspecto negativo da presença desta vibração, é de que as soldas realizadas com o sistema de oscilação fixado ao robô antropomórfico resultam em uma poça de fusão com maior instabilidade, incorrendo em expulsão de material líquido fundido da poça de fusão.

Em comparação ao robô antropomórfico REIS RV-15, o Tartílope V2 apresenta a característica de possuir um braço de alavanca mais curto em relação ao módulo de oscilação. Portanto, a vibração correspondente e, os efeitos da mesma sobre os deslocamentos de avanço e reversão e da poça de fusão são bastante reduzidos.

Além de maior rigidez, outra razão pela qual foi considerada a utilização do Tartílope V2 para a continuação dos ensaios é que o robô REIS modelo RV-15 apresentou constantemente falhas técnicas de comunicação nos drivers que controlam os servomotores, essas ocorrências chegaram ao ponto de causar prejuízo no cronograma de realização dos ensaios. Portanto, o uso do Tartílope V2 por ser de tecnologia mais simplificada se tornou mais viável para a realização dos ensaios.

5.3 ANÁLISE DA TENSÃO DO ARCO NA SOLDAGEM DE JUNTA DE ARESTA E SOBRE A PLACA DE COBRE

Durante a realização dos primeiros ensaios nos corpos de prova com junta de aresta na posição horizontal, percebeu-se que quando o módulo de oscilação encontrava-se em repouso, havia a presença de uma folga que deslocava a tocha no sentido de aproximar ou afastar a ponta do eletrodo da junta. Primeiramente, tentou-se verificar se esta folga atuava

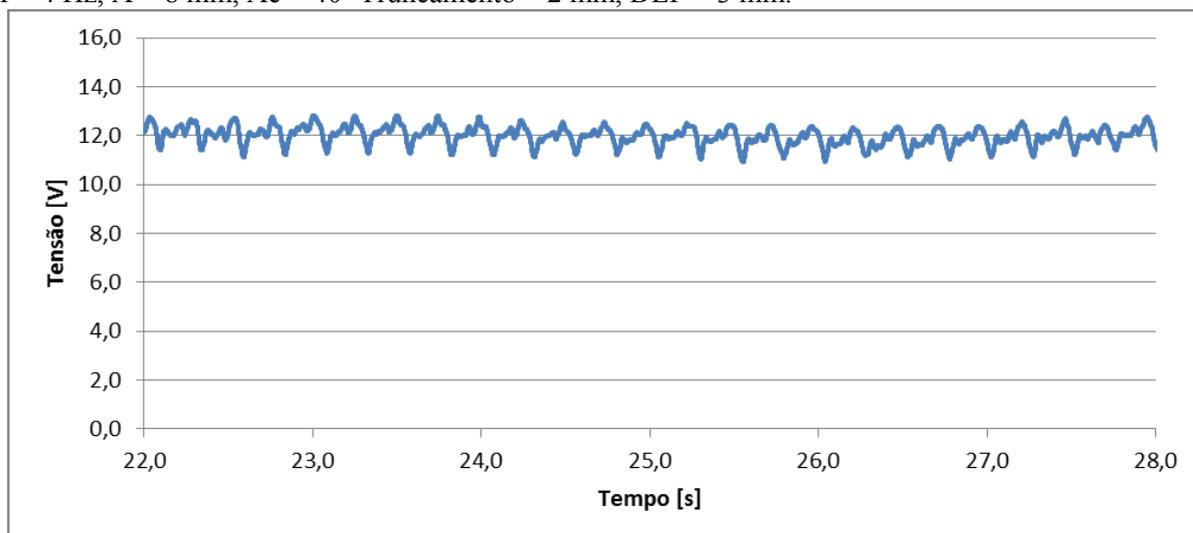
quando o módulo de oscilação estava em movimento, juntamente com o deslocamento real da tocha. Para que esta verificação fosse possível visualmente, foi necessário utilizar uma baixa frequência, que neste caso foi de 1 Hz. Além disso, para ter-se tempo suficiente de observar a ocorrência do fenômeno, a velocidade de soldagem também foi pequena, a saber, 30 cm/min. De acordo com a observação visual teve-se a sensação de que o fenômeno descrito ocorria, porém como a percepção puramente não configura prova, houve a necessidade de comprová-lo e quantificá-lo. Para se realizar esta tarefa optou-se pela medição do sinal de tensão, a fim de se analisar se havia uma variação no sinal da tensão, qual o seu valor e, realmente comprovar se havia ou não uma variação de DEP causada pela folga no oscilador, além disso, buscou-se investigar a existência de um comportamento no sinal de tensão do arco que fosse característica única e exclusiva do *switch back*, sendo estes os principais objetivos para esses ensaios.

Para fins de comparação este ensaio foi realizado em dois osciladores, desta forma podendo constatar se o oscilador com uma guia (de maior folga perceptível) produzia maior variabilidade no sinal da tensão quando comparado ao oscilador de duas guias (com maior rigidez aparente).

Já como segundo propósito, mas não menos relevante, Os resultados gráficos dos ensaios e os valores obtidos do sinal da tensão estão mostrados nas

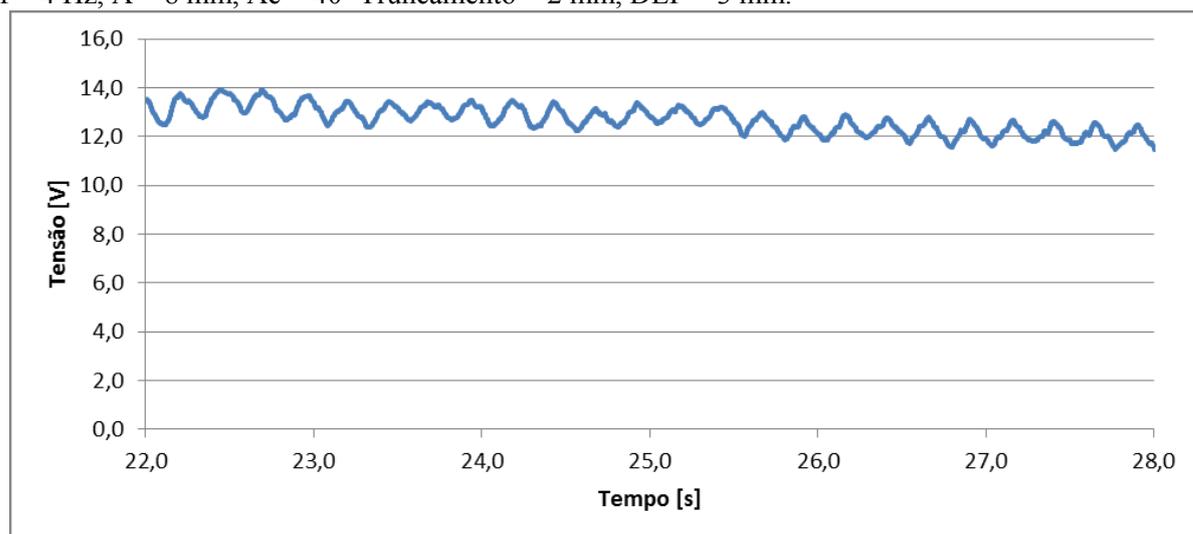
Figura 5.16, Figura 5.18 e Figura 5.20 para o oscilador de uma guia, enquanto que as figuras Figura 5.17, Figura 5.19 e Figura 5.21 sequencialmente apresentam os resultados para o oscilador com duas guias.

Figura 5.16 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 4$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



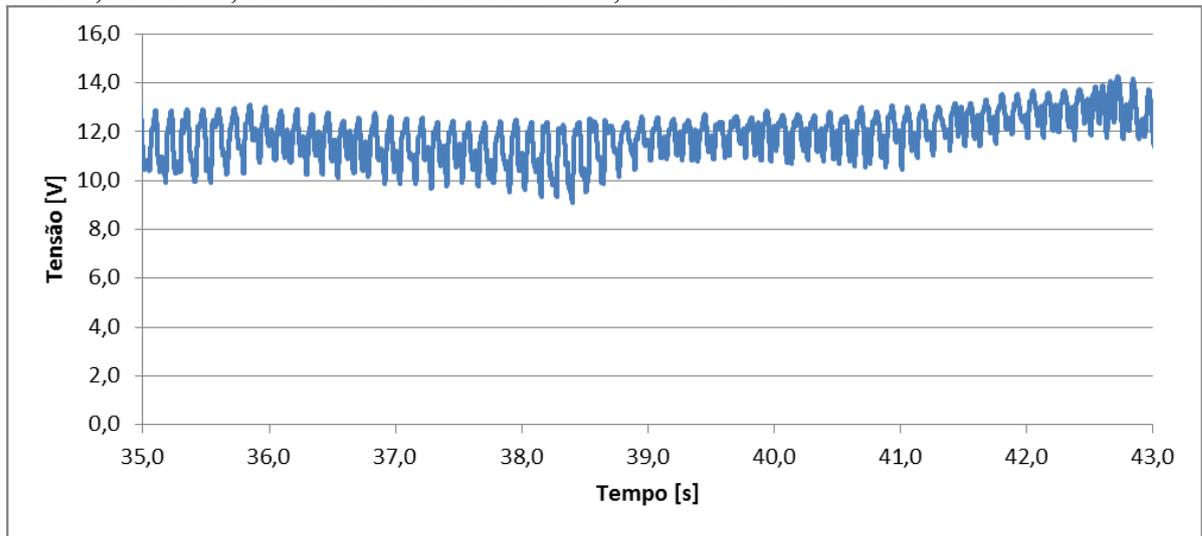
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.17 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 4$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



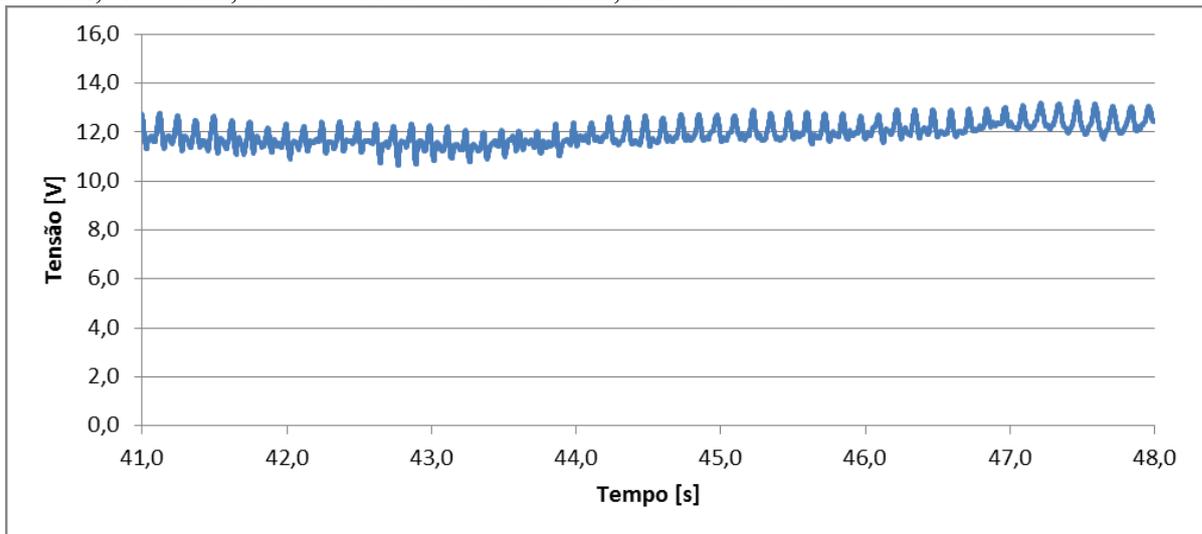
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.18 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 8$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



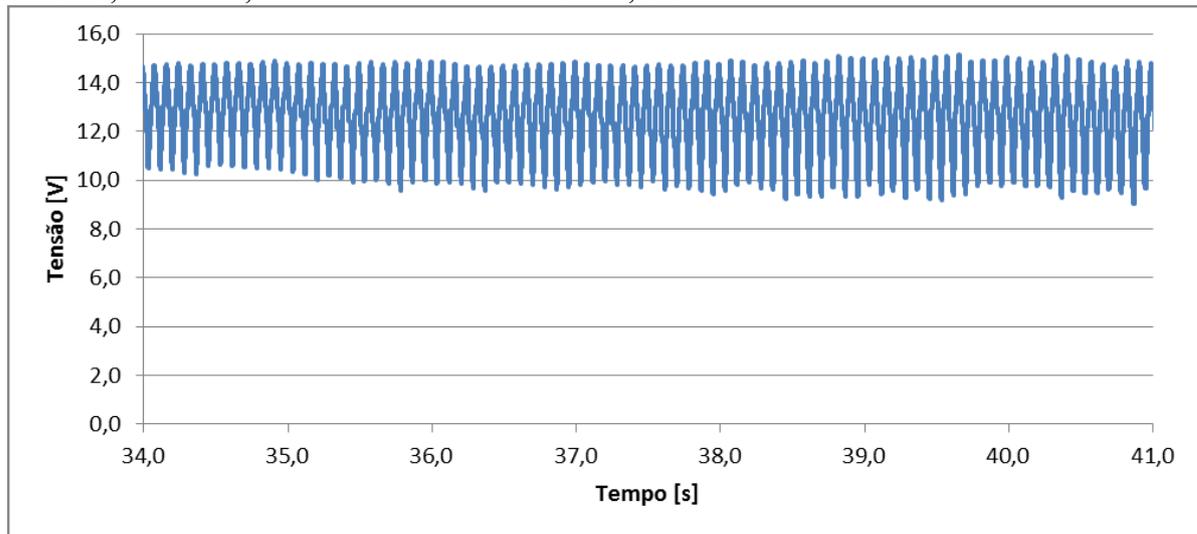
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.19 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 8$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



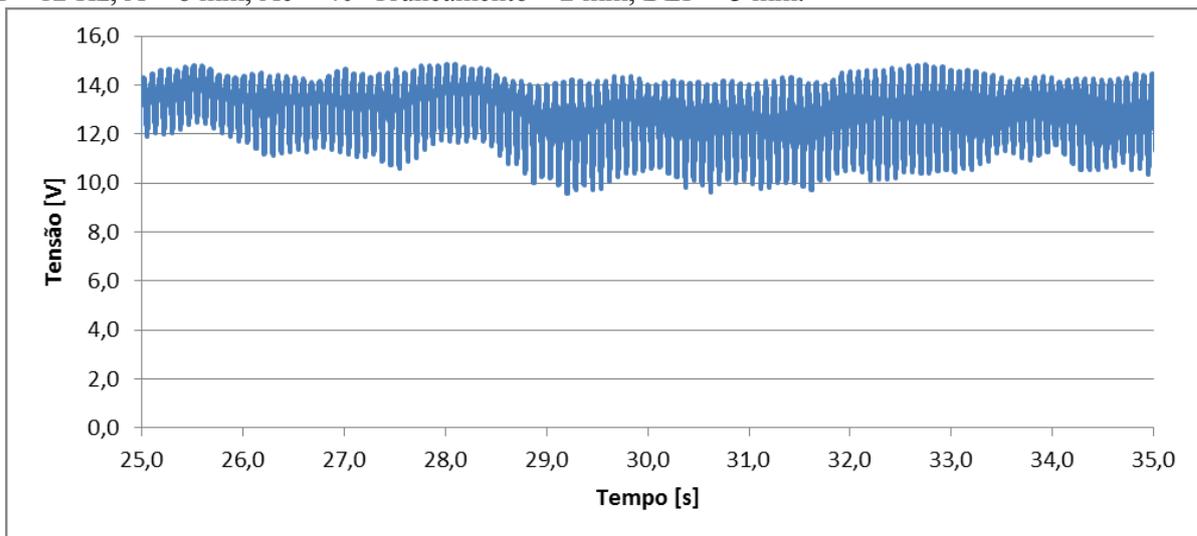
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.20 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com uma guia. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 12$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.21 - Gráfico da tensão obtida para o oscilador com duas guias. $V_s = 150$ cm/min, $I_m = 280$ A, $f = 12$ Hz, $A = 8$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm.



Fonte: o próprio autor.

A Tabela 5.8 apresenta os valores obtidos para a tensão média, das frequências selecionadas e do sinal de tensão medidos pelo SAP, para os osciladores com uma e duas guias.

Tabela 5.8: Comparação entre a frequência selecionada e a frequência do sinal de tensão medido pelo SAP.

Oscilador	Frequência selecionada [Hz]	Frequência do sinal de tensão medido [Hz]	Tensão Média [V]	Desvio padrão [V]
1 guia	4,00	4,24	12,00	1,76
2 guias	4,00	4,21	12,68	1,33
1 guia	8,00	7,99	11,85	2,94
2 guias	8,00	8,07	11,93	1,65
1 guia	12,00	12,00	12,60	4,91
2 guias	12,00	12,24	12,87	3,07

Observa-se pelos dados apresentados na Tabela 5.8 que a tensão média do oscilador com duas guias é maior se comparada ao oscilador com uma guia e, que curiosamente a frequência do sinal da tensão acompanha a frequência imposta ao movimento da tocha pelo módulo de controle.

O fato da tensão média do oscilador com duas guias ser maior que a do oscilador com uma guia é explicada quando se analisa os dados da variação do sinal da tensão. Como esperado, a tensão varia mais para o oscilador com uma guia em comparação ao com duas devido a maior folga presente em seu mecanismo, significando que durante a realização da soldagem há uma diferença na variação da DEP entre os dois osciladores.

Em termos de cordão de solda, o que se conseguiu verificar foi que as escamas características do *switch back*, ficaram mais próximas umas das outras quando utilizado o oscilador com duas guias em comparação às escamas do cordão soldado com o oscilador de uma guia. Os resultados dos dois cordões ficaram bons, não sendo constatados defeitos de um em relação ao outro. Porém o que se constata é que com o incremento da frequência o oscilador com uma guia tem uma maior tendência de expulsar material da poça (gotejamento).

Até aqui, procurou-se verificar se a folga existente nos osciladores produzia uma diferença de DEP. Isso foi realizado por intermédio da medição da variação do sinal da tensão do arco. Os resultados mostraram que além de haver uma grande variação do sinal de tensão entre os dois osciladores, principalmente para as frequências de 4 e 12 Hz, a frequência do sinal de tensão apresentava um valor muito próximo da frequência selecionada no módulo de controle.

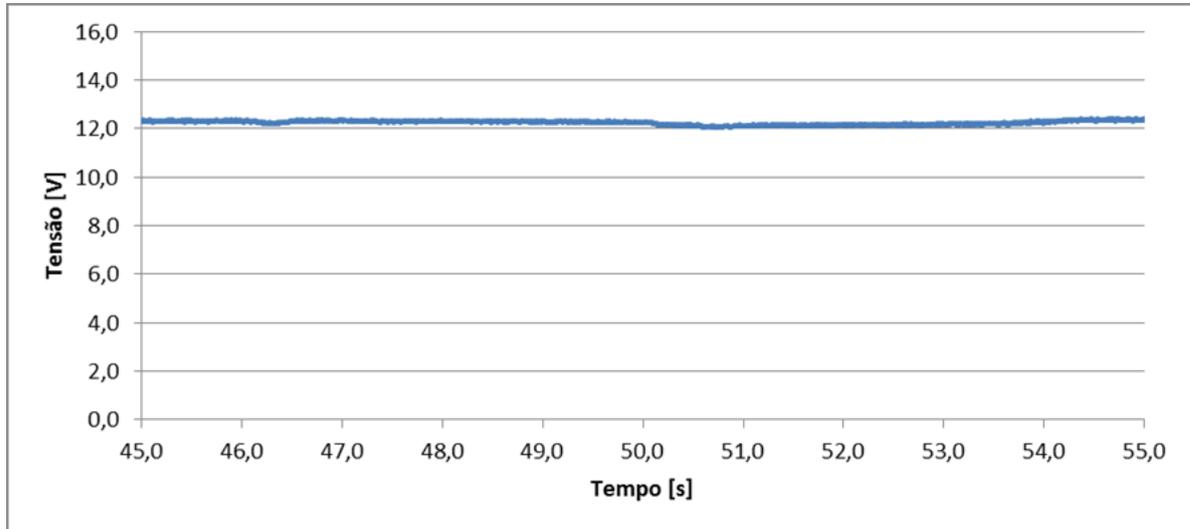
Quando se esta soldando sobre um corpo de prova, é esperado que haja uma variação do sinal de tensão, isso pode ocorrer por duas razões. A primeira são as imperfeições oriundas da falta de planicidade da chapa, ou seja, devido até mesmo ao processo de limpeza com

discos abrasivos a superfície não torna-se um plano perfeito. E a segunda é derivada, no caso do *switch back*, da possível incidência do arco sobre a poça de fusão e, seguidamente, sobre a parte sólida do metal de base, reduzindo a DEP e causando variação no sinal de tensão. Por esta razão os ensaios foram feitos sobre uma chapa de cobre refrigerada, que por sua vez, além de não produzir fusão, também possuía uma planicidade muito melhor que um corpo de prova de aço carbono, permanecendo apenas o efeito produzido pela folga do módulo de oscilação. Nestes ensaios buscou-se analisar a frequência do sinal de tensão do arco voltaico para uma soldagem contínua e também com as frequências selecionadas de 2, 4, 6 e 8 Hz. A amplitude utilizada em todos os ensaios foi de 10 mm. Nos ensaios realizados sobre a chapa de cobre utilizou-se apenas o oscilador de duas guias, dessa forma eliminando influências na folga existente no oscilador de uma guia. A Figura 5.22 ilustra a bancada com seus respectivos equipamentos para realização dos ensaios.

Utilizou-se um manipulador Tartilope V2 para a realização dos ensaios, sendo que escolheu-se o eixo Y de movimentação para deslocamento da tocha. O deslocamento do eixo foi de 50 mm com uma velocidade de soldagem de 4,44 cm/min. Já o corpo de prova constituía-se de uma placa de cobre de dimensões 120 mm x 120 mm x 32 mm. A placa de cobre possui orifícios de entrada e saída para circulação de água. A água que circula a placa é resfriada por uma unidade de refrigeração que é ligada automaticamente toda vez que a temperatura da água ultrapassa 19° C. Os ensaios foram todos iniciados com a temperatura da água em 18,2° C, este valor foi coletado pelo *display* da unidade de refrigeração, não sendo utilizados termômetros para medição da temperatura.

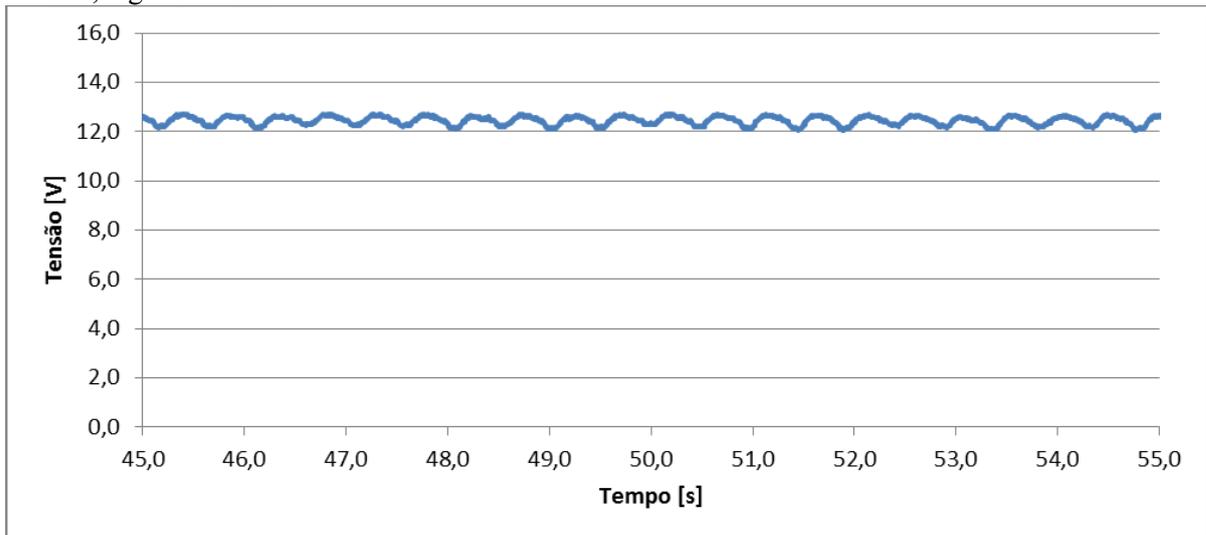
Os gráficos do sinal da tensão para os cinco ensaios encontram-se nas figuras Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26 e, representam respectivamente na ordem em que são apresentados, os ensaios convencional, 2 Hz, 4Hz, 6Hz e 8Hz. Para os gráficos o eixo das abscissas representa o período de tempo expresso em segundos e o eixo das ordenadas a tensão expressa em volts. Todos os gráficos encontram-se na mesma escala. Verifica-se que as variações do sinal da tensão estão presentes somente nas extremidades do movimento e conexão com o arco.

Figura 5.22 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem convencional com $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.



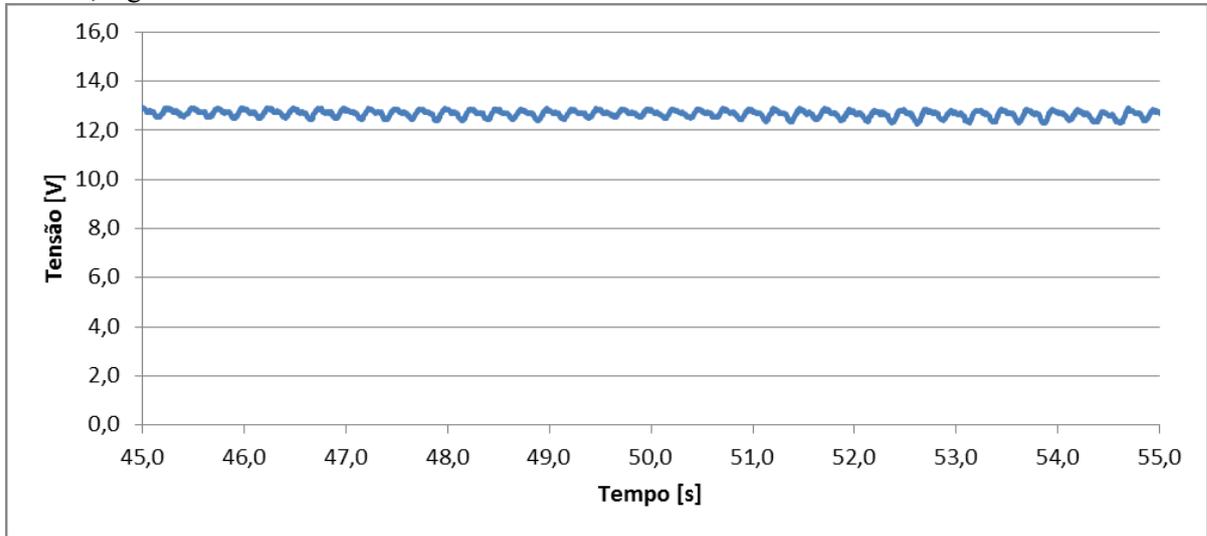
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.23 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 2$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.



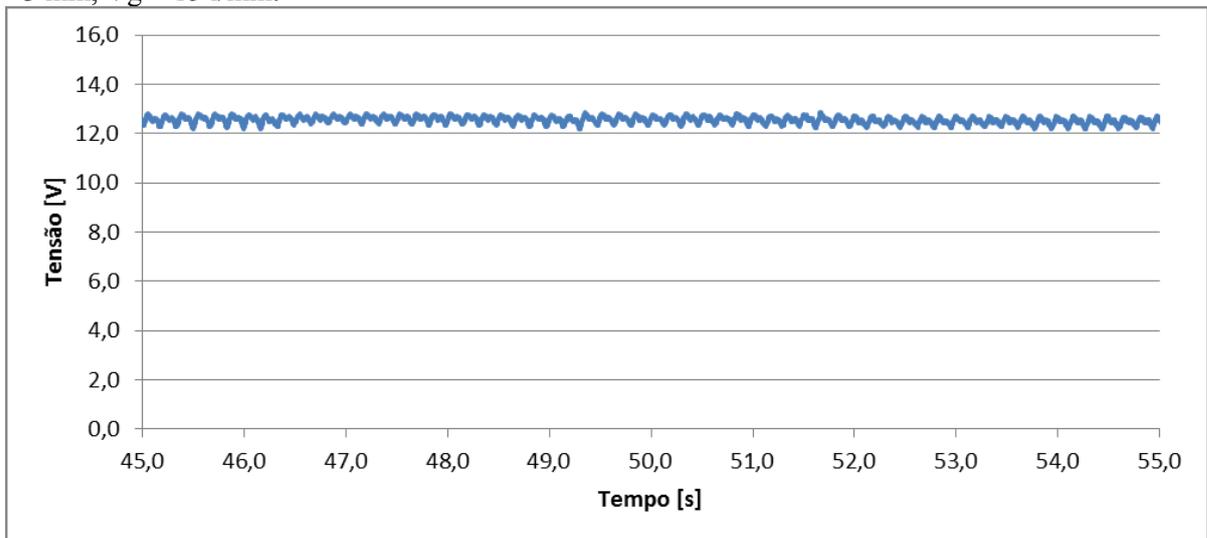
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.24 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 4$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.



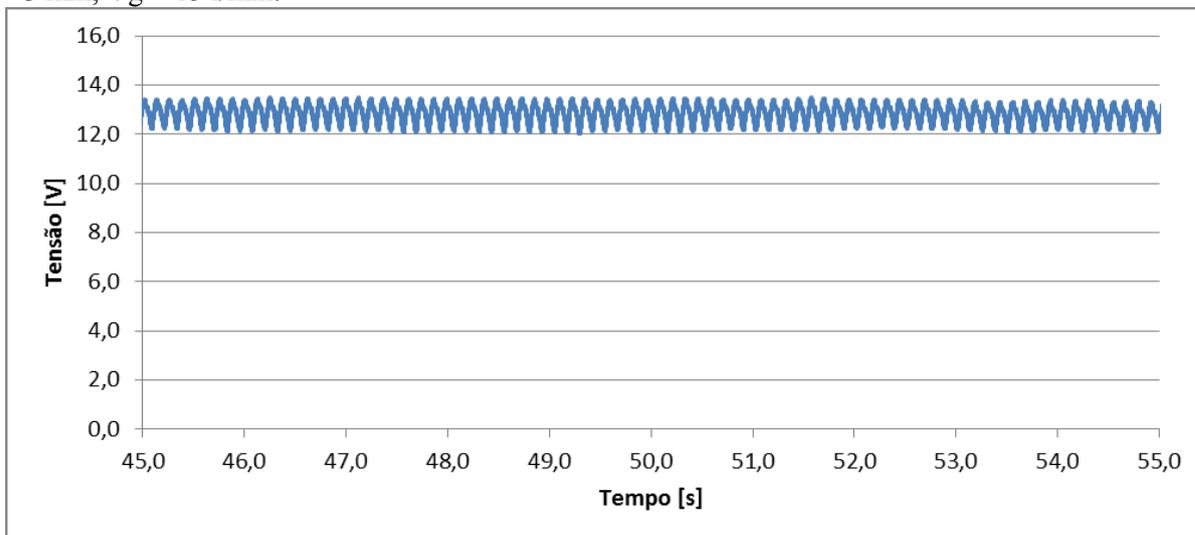
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.25 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 6$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.26 - Gráfico do sinal de tensão obtido para o oscilador com duas guias. Soldagem com tecimento. $V_s = 4,44$ cm/min, $I_m = 250$ A, $f = 8$ Hz, $A = 10$ mm, $A_e = 40^\circ$ Truncamento = 2 mm, DEP = 3 mm, $V_g = 15$ l/min.



Fonte: o próprio autor.

Sequencialmente, a Tabela 5.9 apresenta os valores de frequência, tensão média e desvio padrão do sinal de tensão, obtida com o tratamento dos dados realizados anteriormente.

Tabela 5.9: Valores de Tensão Média e desvio padrão para as frequências utilizadas nos ensaios sobre a placa de cobre.

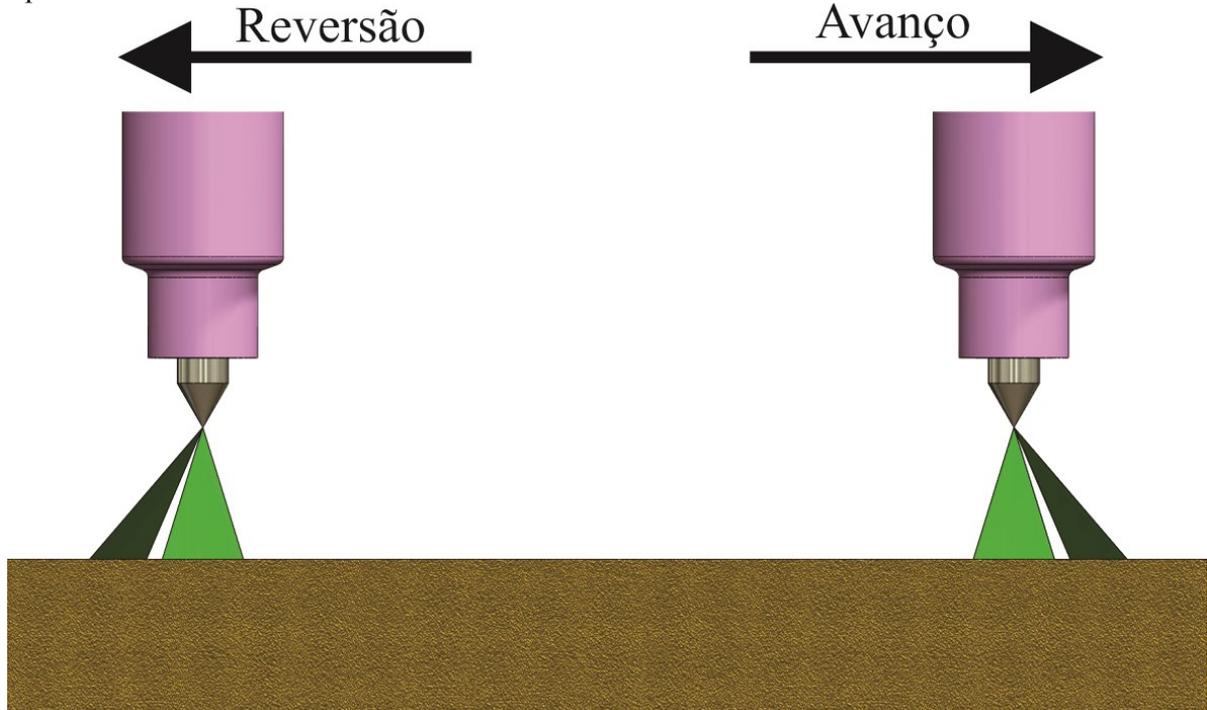
Variáveis	Contínuo	2 Hz	4 Hz	6 Hz	8 Hz
Frequência	0	2,08	4,02	6,09	8,06
Tensão Média	12,2	12,4	12,7	12,5	12,8
Desvio Padrão	0,08	0,17	0,14	0,14	0,38

Observa-se que com o aumento da tensão média, há uma estreita relação entre a frequência selecionada no módulo de controle e a frequência do sinal de tensão do arco, pois os valores são muito próximos. Em segundo lugar percebe-se que o aumento da frequência de oscilação faz aumentar a variação da tensão média do arco para a mesma corrente de 250 A. Também é possível afirmar que não há muita variação em torno da tensão média, pois o desvio padrão encontrado foi baixo e pode ser atribuído a ruídos que não puderam ser removidos no filtro aplicado.

No que diz respeito ao incremento no sinal da tensão, aumentando assim a sua média, ligado proporcional e diretamente ao acréscimo da frequência selecionada para movimentação da tocha, algumas hipóteses foram formuladas para explicar a ocorrência desse fenômeno.

A primeira hipótese é que no instante de tempo em que a tocha realiza a alternância de movimento entre avanço e reversão, e vice versa, o arco por ação da inércia tende a manter seu movimento no mesmo sentido que se encontrava antes da alternância. Ou seja, se o movimento é de avanço do módulo de oscilação, no momento em que ocorre a alternância para reversão, o arco continua a movimentar-se no mesmo sentido do avanço (Figura 5.27).

Figura 5.27 - Imagem representativa dos movimentos de avanço e reversão da tocha enfatizando o suposto movimento de inércia do arco voltaico na alternância de sentido da tocha.



Fonte: o próprio autor.

Supõe-se também que para maiores velocidades do módulo de oscilação (frequências maiores para uma mesma amplitude), ocorra uma maior inclinação do arco nos instantes de alternância de movimento. Portanto, o incremento da frequência produziria uma maior inclinação do arco voltaico, o que sequencialmente produziria um aumento na amplitude do formato de onda do sinal de tensão e, conseqüentemente, valores de tensão média e desvios padrões mais altos. Isso necessariamente, não significa que ocorre um aumento da DEP, pois a distância eletrodo peça é sempre medida verticalmente.

Já a segunda suposição, diz respeito ao aumento da velocidade do módulo de oscilação. Esse aumento da velocidade pode ser obtido pelo incremento da frequência para uma amplitude fixa, como é o caso aqui. O aumento na velocidade do módulo de oscilação pode fazer com que o fluxo de gás de proteção deixe de ser laminar e torne-se turbulento, havendo maior dispersão de gás de proteção pelo bocal da tocha, ou seja, pode ocorrer que o

arco voltaico tenha que ionizar uma parcela de gás de processo mais fria devido a uma maior dispersão gasosa. Por conseguinte, para se ionizar um determinado volume de gás mais frio seria necessário um aumento na tensão para que a fonte mantivesse a mesma corrente elétrica. Ainda nessa hipótese, podem ocorrer que devido a essa suposta defasagem de gás de processo, ocorra a inserção dentro do arco de gases atmosféricos, como o hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Estes gases que compõe a atmosfera podem produzir oxidações e formação de dentritas na superfície do eletrodo dificultando a emissão termiônica [41], necessitando de maior tensão no arco TIG para manter a passagem da corrente pré-selecionada na fonte.

Por outro lado, o terceiro prognóstico é de que quando a tocha avança há uma pequena quantidade de gás que se dispersa, mas no instante que a tocha retorna o arco acaba ionizando essa quantidade de gás que se dispersou inicialmente e que se encontra numa temperatura possivelmente menor. Nesse momento, pode ser que ocorra um pico de tensão nas extremidades do movimento da tocha para poder ionizar esse volume de gás mais frio. Pensando desta maneira, com o incremento da frequência a dispersão de gás é maior, necessitando consequentemente de maior tensão para ionizá-lo.

Ainda tem-se a quarta suposição que está diretamente ligada ao fato de que há, visivelmente, uma vibração do sistema de movimentação da tocha, neste caso do Tartilope V2, que ao se deslocar sobre o trilho rígido produz vibração do eixo onde está fixado o suporte da tocha juntamente com o oscilador. Se esta vibração produzir um movimento vertical que se desloca simultaneamente no sentido para cima e para baixo, isso implica numa variação de DEP que, consequentemente, é diretamente proporcional a tensão requerida para manter o arco aberto para a corrente selecionada.

No quinto prognóstico, questionou-se a possibilidade de haver um desalinhamento no esquadro do eixo (Z) do Tartilope, isso produziria um movimento retilíneo inclinado no módulo de oscilação que faria com que ocorresse a diferença de DEP durante a sua movimentação. O nivelamento do eixo (Z) foi realizado com um nível de base magnética e centralizado visualmente o melhor possível. Além disso, a arruela de 3 mm foi utilizada em ambas as extremidades do movimento do módulo de oscilação para verificar a ocorrência de tal problema, porém, esta é uma hipótese válida e não pode ser descartada.

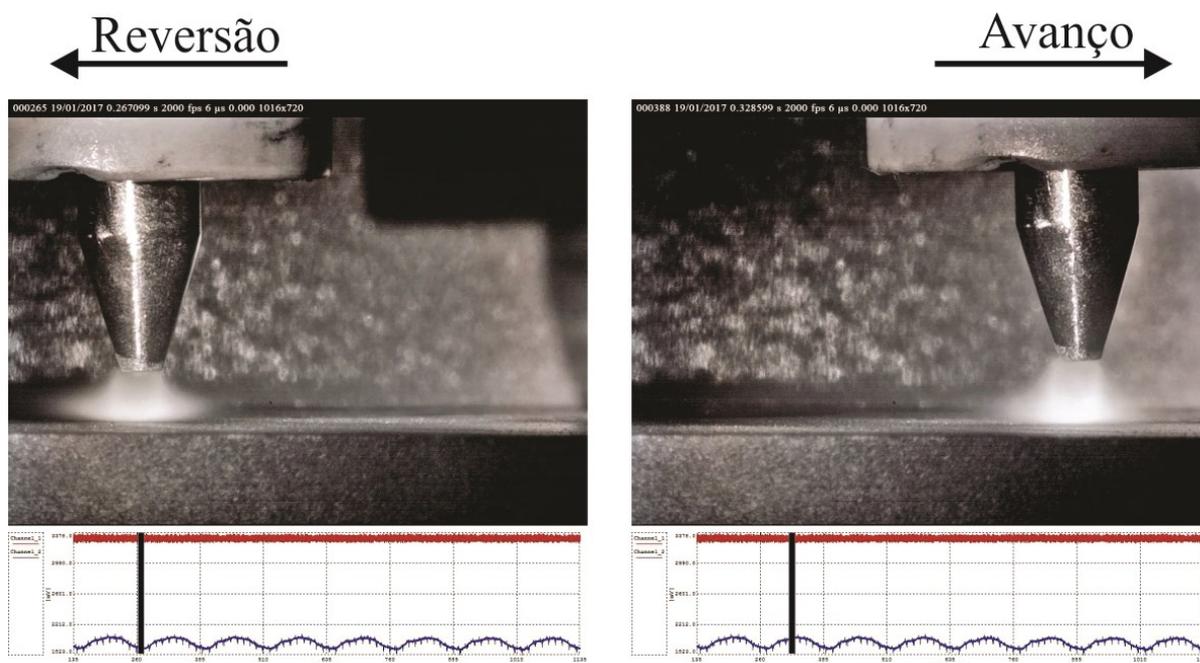
E, por fim, a sexta e última presunção, trata-se do caso onde foi realizado a movimentação *switch back* sobre o corpo de prova em junta sobreposta na posição horizontal. Nesta situação, o arco incide sobre sobre uma região das chapas que ainda está sólida no momento em que a tocha avança, porém quando a tocha realiza o movimento de reversão o

arco passa a agir sobre a poça de fusão, que tem por lógica um determinado volume acima da linha da chapa sólida. Quando isso acontece há uma pequena variação de DEP, que como no caso descrito anteriormente seria capaz de produzir uma variação no sinal de tensão do arco.

Para se poder estudar com mais profundidade e validar ou não as hipóteses mencionadas, a solução foi realizar uma filmagem de alta velocidade. Os dados da filmagem encontram-se na Tabela 3.3.

Com base nas imagens da Figura 5.28 é possível afirmar que em nenhum momento quando a tocha realiza a alternância entre o sentido de avanço e reversão, ocorre a inclinação do arco voltaico em função da presença e atuação da lei da inércia sobre o mesmo. Abaixo das imagens encontra-se o gráfico da tensão pelo tempo sincronizados com o movimento da tocha.

Figura 5.28 - Imagens do arco voltaico obtidas na filmagem de alta velocidade com aplicação da técnica *switch back*. Parâmetros: $f = 8 \text{ Hz}$ e $A = 10 \text{ mm}$.



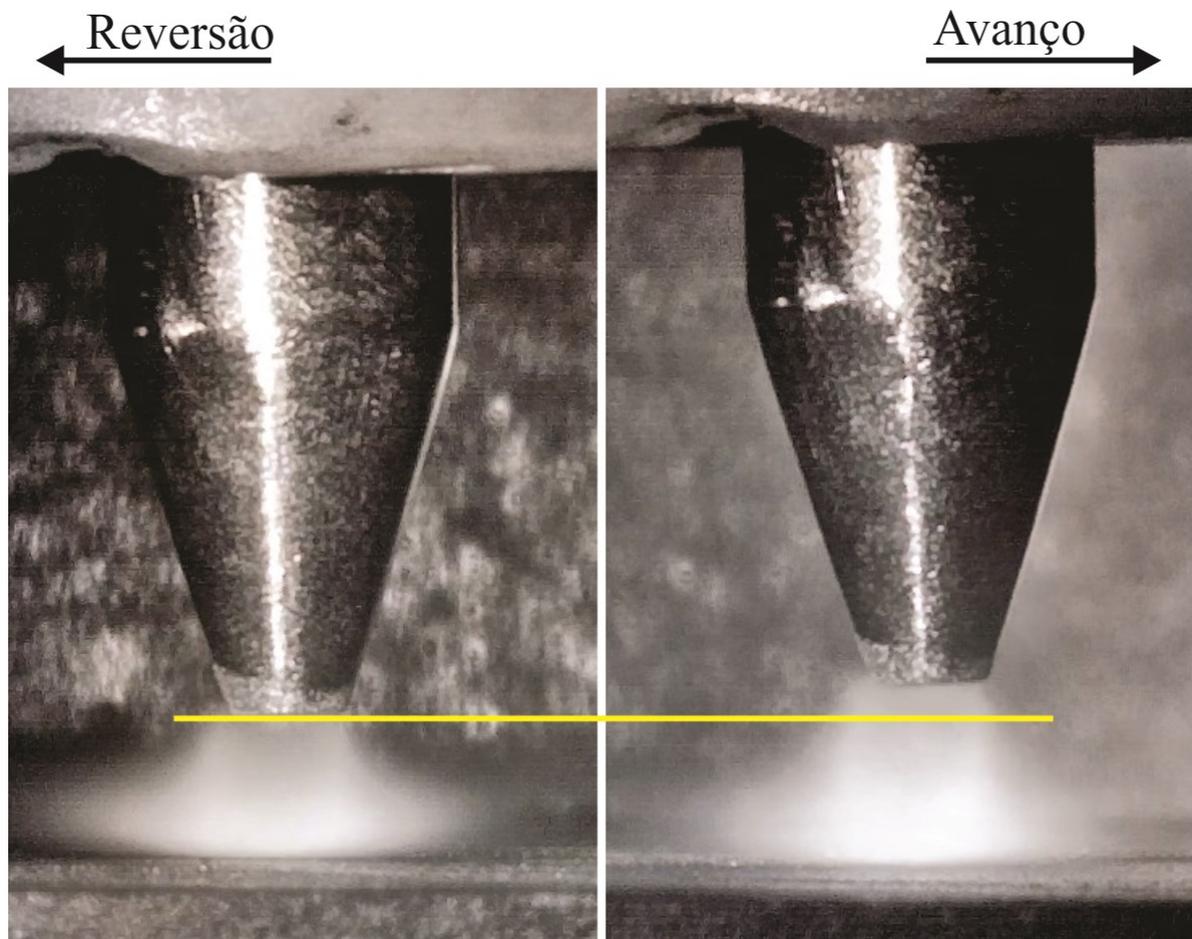
Fonte: o próprio autor.

Por outro lado, de acordo com as imagens da Figura 5.29, percebe-se que há uma oscilação vertical da tocha que é consequência das vibrações da movimentação do manipulador. Esta oscilação vertical da tocha ao longo do eixo (Z) ocorre entre o início e o final de cada oscilação, dessa maneira apresentando uma DEP mínima e máxima a cada ciclo de oscilação. Esse fato explica a razão pela qual a frequência do sinal da tensão do arco acompanha o valor da frequência selecionada no módulo de controle. As imagens da Figura 5.29 são uma ampliação das imagens da Figura 5.28, ambas encontram-se na mesma escala e

a linha amarela horizontal esta encostada na ponta do eletrodo truncado no momento onde encerra-se a reversão e inicia-se o avanço. Verificou-se que a a DEP é sempre maior no momento em que ocorre o término do movimento de avanço e inicia-se a reversão, ou seja, de uma lado a DEP é sempre mínima e de outro sempre máxima.

Com relação a última hipótese, mesmo que haja certa lógica em afirmar que o arco atuando sobre a parte sólida do corpo de prova e seguidamente sobre a poça de fusão pode produzir uma variação no sinal da tensão, não é possível afirmar o quanto de variação do sinal da tensão é por efeito da movimentação *switch back* em si e, o quanto é pela folga existente no mecanismo do módulo propriamente.

Figura 5.29 - Imagens ampliadas da filmagem de alta velocidade que mostram uma variação de DEP entre o movimento de avanço e de reversão do *switch back*.

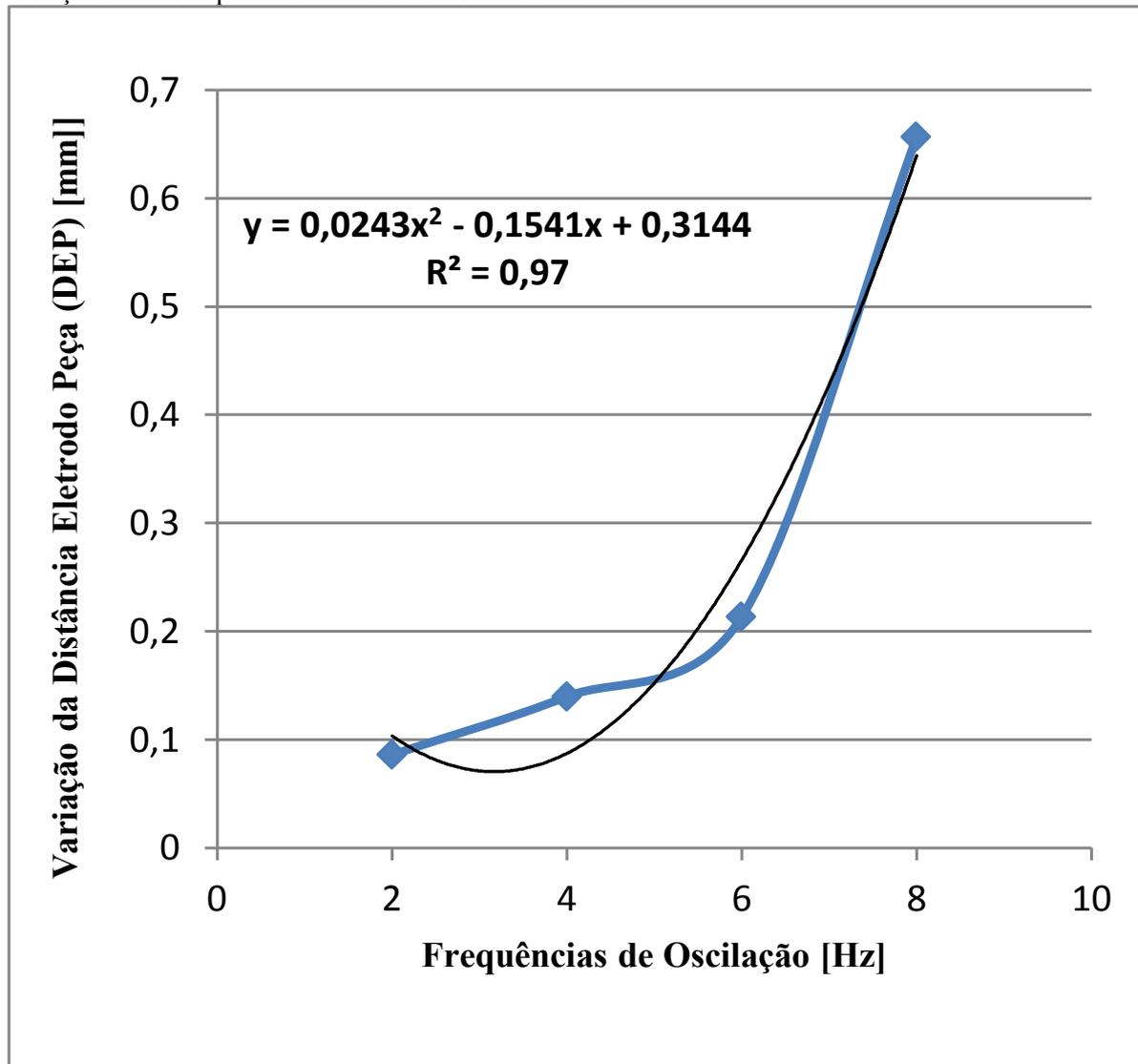


Fonte: o próprio autor.

Com o intuito de quantificar a variação na DEP para saber o quanto a mesma poderia afetar os ensaios de soldagem, plotou-se um gráfico (Figura 5.30) relacionando-se as frequências utilizadas (2, 4, 6, e 8 Hz) com a média da variação da DEP entre os extremos da oscilação *switch back*.

As medições da DEP tiveram como referência o diâmetro do eletrodo. Os valores observados no gráfico da Figura 5.30 foram obtidos sem a movimentação linear do tartilope.

Figura 5.30 - Gráfico demonstrando um aumento na variação da DEP a medida que a frequência de oscilação aumenta quando utiliza-se a técnica *switch back*.



Fonte: o próprio autor.

Para melhor visualizar os valores do gráfico da Figura 5.30, construiu-se um quadro (Tabela 5.10) mostrando para cada frequência o valor médio da variação de DEP e o quanto essa variação representa percentualmente a mais sobre o valor de 3 mm pré fixado em todos os ensaios.

Tabela 5.10: Valores da Variação Média da DEP com relação ao aumento de frequência utilizada na técnica *switch back*.

Frequência [Hz]	Variação Média da DEP [mm]	Variação Percentual da DEP [%]
2	0,086	2,87
4	0,140	4,66
6	0,214	7,12
8	0,657	21,89

Os valores da Tabela 5.10 mostram a variação média da DEP para cada uma das frequências ensaiadas. O que se observa é que para frequências maiores há maior variação média da DEP. Esses valores foram obtidos com auxílio da equação da Figura 5.30. Como os valores apresentados na Tabela 5.10 são apenas do movimento de oscilação da tocha sem a movimentação do manipulador, decidiu-se repetir os ensaios, porém, nesse momento com o Tartilope V2 a uma velocidade de 150 cm/min. Os ensaios foram refeitos para as frequências de 2 e 8 Hz. Como resultados obtiveram-se 6,83% e 21,89% de variação acima da DEP original para as frequências de 2 e 8 Hz, respectivamente. Analisando-se esses valores percebe-se que para a frequência de 8 Hz não houve uma grande mudança nos valores obtidos com o manipulador parado ou em movimento, porém para uma frequência mais baixa essa variabilidade foi mais que o dobro. Portanto, pode-se concluir que as vibrações do Tartilope podem afetar negativamente uma operação de soldagem, uma vez que a variação da DEP resulta em um aumento ou diminuição da pressão do arco sobre a poça de fusão, interferindo significativamente na penetração da solda.

Após as informações obtidas teve-se a curiosidade científica de analisar macrografias de corpos de prova seccionando-se os mesmos no sentido longitudinal. Esse experimento teve como objetivo verificar se ocorre um perfil de penetração ao longo da solda de forma serrilhada. Uma vez que a penetração também depende da pressão do arco e esta também é dependente em parte da DEP, uma vez havendo variabilidade na DEP também ocorrerá o mesmo na penetração.

Espera-se ainda, que haja um perfil serrilhado da penetração em função do movimento de reversão da tocha. Quando do movimento de avanço, o arco incide diretamente sobre o metal de base do corpo de prova produzindo maior penetração, porém quando ocorre a reversão do movimento da tocha o arco passa a agir sobre a poça de fusão, supostamente, produzindo uma penetração menor.

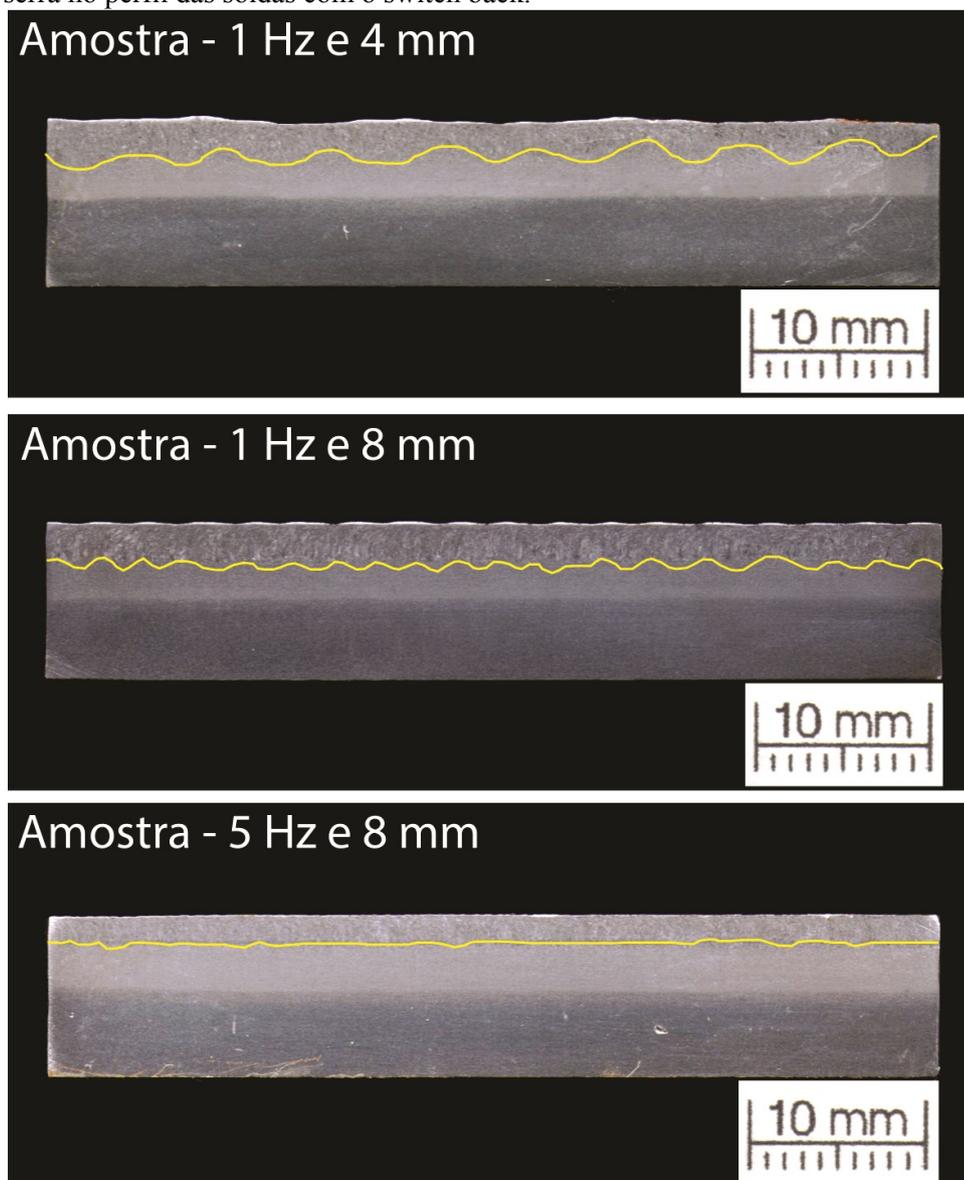
Outro aspecto interessante que foi constatado é de que o experimento com frequência de 1 Hz e 4 mm de amplitude produziu um bolsão na raiz da solda. Atribui-se esse fenômeno

a formação de um bolsão de gás de processo durante o fechamento do canal formado pela pressão do arco. Nesse instante o metal líquido fundido da poça de fusão demora um pouco para fechar esse canal após o avanço da tocha impedindo a saída do gás de processo em tempo adequado, possivelmente formando um bolsão semelhante a um poro. Este poro não está visível na imagem do corpo de prova porque com o processo de lixamento e polimento do mesmo esse detalhe foi removido.

Realizou-se uma medição da distância entre esses poros para verificar se coincidia com o deslocamento entre duas repetições consecutivas da movimentação da tocha no momento em que elas encerram a reversão e iniciam o avanço, porém nenhuma correlação foi possível de ser sustentada.

De acordo com as imagens da Figura 5.31 pode-se observar que como esperado há um efeito dente de serra no perfil dos cordões de solda. Fica claro que o espaçamento entre os dentes de serra depende da frequência e da amplitude empregadas. Observando-se o caso onde ocorreu uma variação de frequência de 1 Hz para 5 Hz para amplitude de 8 mm verifica-se que ocorreu uma aproximação dos dentes de serra. Por outro lado, olhando-se para os ensaios onde variou-se a amplitude de 4 mm para 8 mm na mesma frequência não ocorreu um distanciamento entre mesmos conforme esperado. Acredita-se que isso tenha ocorrido em função de que para uma configuração de 1 Hz e 8 mm a velocidade do oscilador aumentou e dessa forma as oscilações verticais da tocha também sofreram um aumento, produzindo conseqüentemente, maiores variações na DEP, o que alterou a quantidade de penetrações.

Figura 5.31 - Imagens das macrografias realizadas no sentido longitudinal para averiguar a presença de dentes de serra no perfil das soldas com o switch back.



Fonte: o próprio autor.

É possível que a formação do serrilhado no perfil longitudinal da penetração seja produzido pelas vibrações do Tártilope sobre a tocha, causando a variação da DEP. Porém, este trabalho não atribui essa formação serrilhada a este fato, uma vez que com uma frequência de 1 Hz para 10 mm de amplitude a variação percentual foi de apenas 2,87 na DEP. Isso leva a conjectura que como o ensaio foi realizado com uma amplitude de 4 mm, essa variabilidade percentual deva ser ainda menor e, como observado pela imagem da Figura 5.31, o serrilhado é bem acentuado. Nesse caso, a causa mais provável que produz o formato dente de serra é o efeito da ação do arco ora sobre o metal de base, ora sobre a poça de fusão quando realiza a sobreposição na trajetória do movimento. Porém não se descarta a

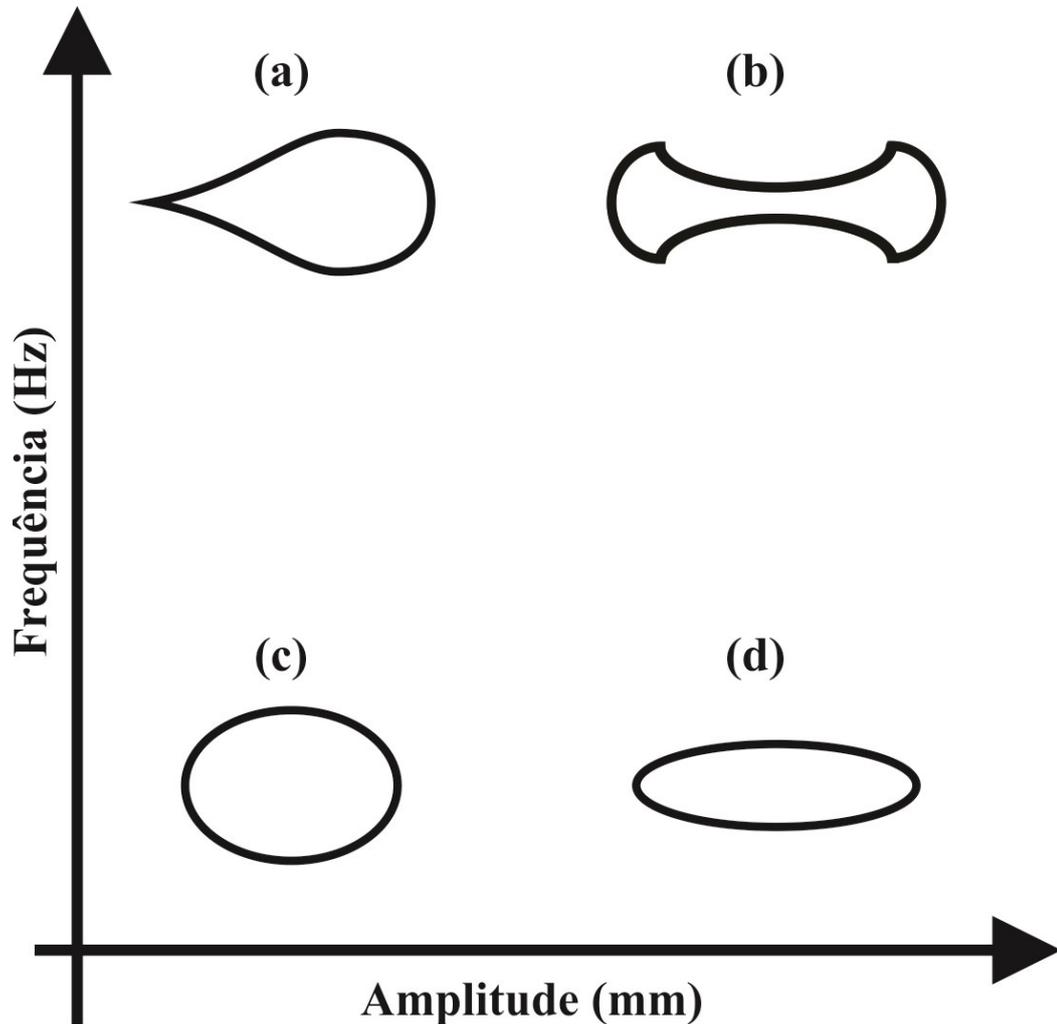
possibilidade de ter uma influência do efeito de ressonância. A penetração encontrada para o ensaio com 1 Hz e 4mm foi de 2,90 mm.

Quando consideradas as imagens das macrografias das seções longitudinais, nota-se que quanto maior a frequência de oscilação da tocha, maior é a uniformidade da penetração da solda, este fato corrobora com o observado por carvalho [24].

5.3.1 Análise do comportamento da poça de fusão com aplicação da técnica *switch back*

Antes de iniciarmos o estudo do comportamento da poça, faz-se necessário acrescentar que o formato geométrico da poça de fusão muda de acordo com as combinações de amplitude e frequência configuradas no *switch back*. A Figura 5.32 apresenta um diagrama genérico da mudança de geometria da poça de acordo a frequência e a amplitude selecionada. Esse diagrama foi produzido pelas observações de soldagem durante os ensaios. A direção das setas indicam o crescimento da variável que representa cada eixo. O objetivo desse diagrama é transmitir uma idéia de como o formato da poça é alterado para baixas e altas frequências e baixas e altas amplitudes.

Figura 5.32 - Modificação da geometria da poça de acordo com o incremento de frequência e amplitude.



Fonte: o próprio autor.

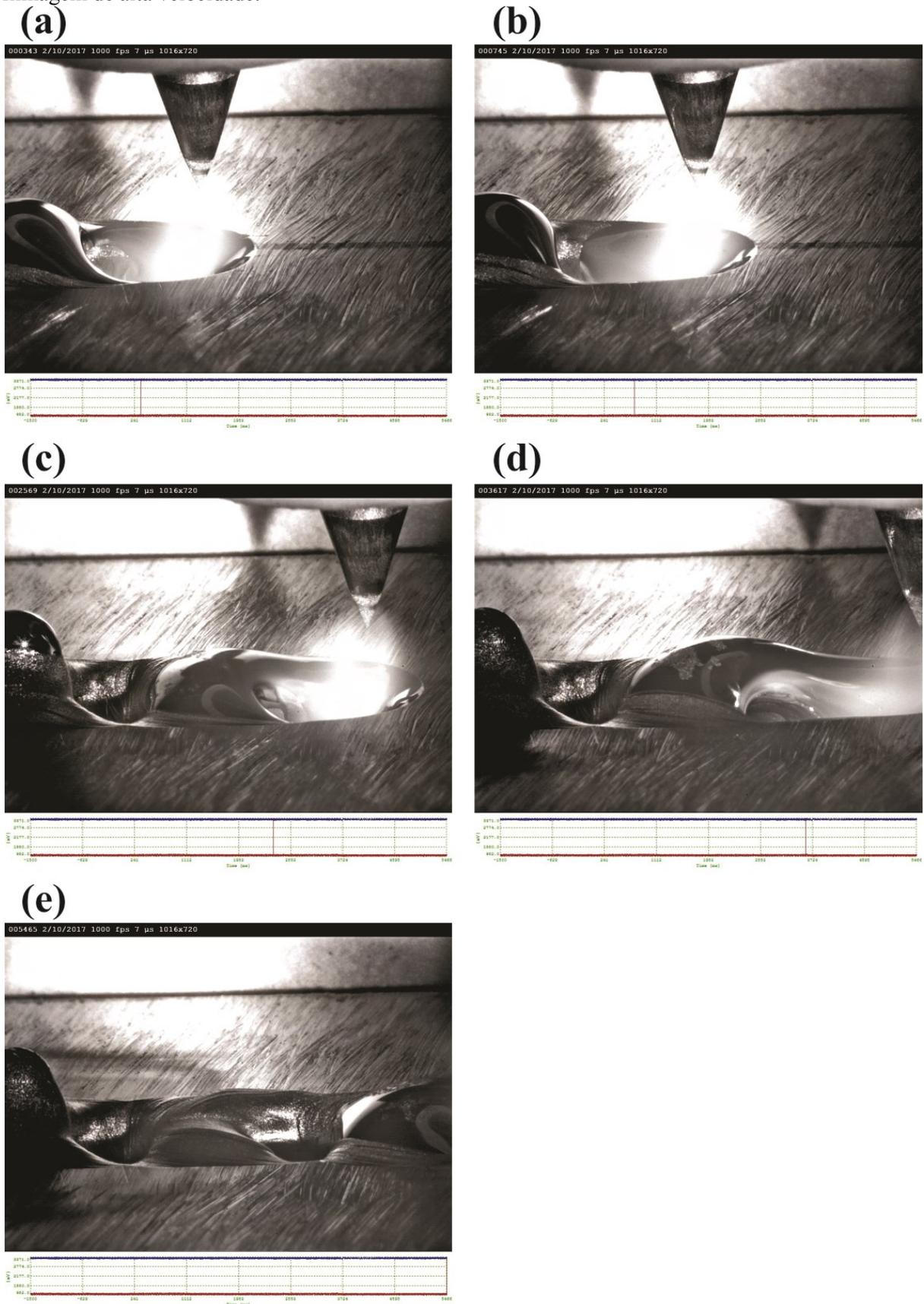
A (Figura 5.32 (c)) mostra a geometria da poça para uma soldagem de 1 Hz de frequência com 4 mm de amplitude, a medida que a frequência é incrementada para 8 Hz ocorre um alongamento da poça, porém sem interferir tanto na largura da mesma (Figura 5.32 (a)). Em contrapartida para uma frequência de 1 Hz com amplitude de 12 mm ocorre nitidamente um alongamento da poça de fusão com significativa redução de largura (Figura 5.32 (d)) e, para a última situação quando a frequência e a amplitude são elevadas, além do alongamento da poça ocorre uma extricção da mesma, porém sem causar rompimento.

A Figura 5.33 mostra uma sequência de imagens da poça de fusão para a soldagem no modo convencional. Primeiramente, o arco incide sobre o metal de base fundindo-o e, ao deslocar-se por efeito da velocidade de soldagem empurra esse material fundido para a extremidade posterior da poça de fusão. A primeira protuberância de *humping* surge com a alimentação da parte posterior da poça por metal líquido fundido que, desloca-se para a

mesma pelos canais laterais, como mostra a Figura 5.33 (a). Já na segunda imagem (Figura 5.33 (b)), pode-se observar a denominada região de transição, onde ocorre a solidificação da fina camada dos canais laterais que alimentavam a parte posterior da poça, dividindo assim a mesma em duas partes, uma que irá se solidificar na forma de protuberância e, a outra que está sendo fundida para formar a segunda protuberância e repetir sucessivamente esse processo (Figura 5.33 (c)). Observa-se nas figuras (Figura 5.33 (b)) e (Figura 5.33 (c)) que, a tensão superficial exerce forte influência sobre a poça de fusão, impedindo que o metal líquido fundido da primeira protuberância flua, já sem efeito da pressão do arco, para dentro da cratera que se formou logo a frente. Igualmente, esse fenômeno ocorre com o metal líquido fundido da segunda protuberância, que nesse caso poderia preencher tanto a cratera a sua frente como a anterior.

Dando continuidade, pela observação da Figura 5.33 (d), constata-se que houve um desequilíbrio da poça de fusão e, nota-se que a alimentação da parte traseira da poça deu-se mais fortemente pelo lado direito do que pelo lado esquerdo da mesma, fazendo com a poça criasse um fluxo de movimentação em rodadoiro no sentido horário, esse rodadoiro por sua vez, foi responsável pelo surgimento de um canal formado por debaixo da segunda protuberância. Na sequência, a Figura 5.33 (e) encerra a formação do *humping* sobre o cordão de solda com a solidificação da terceira protuberância.

Figura 5.33 - Imagens da poça de fusão com processo TIG autógeno convencional obtidas por filmagem de alta velocidade.



Fonte: o próprio autor.

Já com relação ao ensaio realizado com o TIG autógeno, aplicando a técnica *switch back* na configuração de 8 Hz de frequência e 8 mm de amplitude, observou-se um comportamento diferente da poça de fusão com relação ao ensaio produzido pelo TIG autógeno convencional. A Figura 5.33 (a) mostra o momento onde ocorreu o movimento de reversão da tocha e o arco empurrou o metal líquido fundido para a parte posterior da poça, fazendo inclusive uma barreira de contenção sustentando a poça naquela posição por um pequeno instante de tempo. Após esse período a tocha inicia o seu movimento de avanço e, o arco incide sobre uma pequena parcela de material de base ainda no estado sólido, nesse mesmo instante quando a tocha avança a poça de fusão que estava contingenciada pelo arco, também avança e acaba ocupando a região entre o arco e a parte sólida do metal de base já penetrado. (Figura 5.33 (b)). Sendo assim a fina camada da poça recebe ainda mais calor do arco, aumentando a sua fluidez e, conseqüentemente reduzindo a sua tensão superficial. Aqui cabe uma suposição, é bastante provável que quando a poça de fusão retorna juntamente com o avanço da tocha, fazendo com que o arco atue sobre ela novamente a cada ciclo, o fato da poça já estar liquefeita permite a ela criar um isolamento térmico entre o arco e o fundo do metal de base, dessa forma, impedindo que o arco atue diretamente sobre o fundo do referido metal, impedindo que seja fundido mais material e aumente a penetração. Ou seja, o próprio movimento da poça, impulsionado pelo movimento da tocha faz com que a penetração com a aplicação da técnica *switch back*, seja menor que a penetração obtida pelo modo convencional.

O movimento do fluxo da poça foi observado nas imagens da Figura 5.34 (c) e Figura 5.34 (d). Observa-se a presença de um ponto de acúmulo de óxidos que está flutuando sobre a poça de fusão. Este fato nada tem de incomum, uma vez que a densidade de alguns óxidos é menor que a densidade do próprio metal fundido da poça, fazendo com que ocorra flutuação dos mesmos. Porém, o fato que chama a atenção é o movimento do fluxo da poça em relação à posição do arco voltaico.

Por um raciocínio bastante lógico, a região com maior gradiente de temperatura é aquela que se encontra debaixo do arco, conseqüentemente, regiões mais afastadas tendem a ter um gradiente de temperatura menor. Como a tensão superficial da poça é inversamente proporcional à temperatura da mesma, a região da poça com menor tensão superficial é aquela mais próxima do arco, ou debaixo dele. Sendo assim, a poça de fusão deve deslocar o seu fluxo da região de menor para a região de maior tensão superficial. Se a tocha permanecesse estacionária, a poça deveria movimentar-se do seu centro para as bordas. Ou seja, quando a tocha executa seu movimento de avanço do *switch back*, o fluxo da poça ocorre na direção

contrária da tocha e, quando a tocha realiza o movimento de reversão a poça também deveria deslocar-se se afastando do arco.

O que ocorre de anômalo é a ocorrência de um efeito contrário, evidenciado pela movimentação do acúmulo pontual de óxido sobre a poça de fusão. No momento que a tocha avança o ponto de óxido flutua na direção contrária, afastando-se da tocha (Figura 5.34 (e)), o que é o esperado e, quando a tocha realiza o movimento de reversão, o imprevisto ocorre, o ponto de óxido flutuante continua a mover-se na direção contrária da mesma, aproximando-se do arco (Figura 5.34 (f)). O comportamento irregular da poça é identificado apenas na reversão da tocha. Acredita-se que esse fenômeno ocorra porque a técnica *switch back* tem o potencial de produzir alterações no efeito Marangoni, fazendo com que a poça mude seu sentido de movimento, ora de dentro para fora, ora de fora para dentro, afetando a tensão superficial da poça e, conseqüentemente, a penetração da solda.

Outro aspecto observado da filmagem *switch back* em relação à convencional que apresentou *humping*, é que com a aplicação da técnica *switch back* a poça de fusão apresentou maior estabilidade. Fato esse também atribuído a uma menor tensão superficial, que faz com que haja maior movimentação e escoamento da poça, impedindo o surgimento de crateras que antecedem a formação de *humping*. Diferentemente, do modo convencional, na aplicação do *switch back* não se observou uma divisão da parte posterior da poça, onde cada lado divide-se e, ocorre um movimento de rodado no sentido horário. Com a aplicação do *switch back* a poça se movimenta como uma onda do mar, que avança e retrocede guiada pela movimentação da tocha.

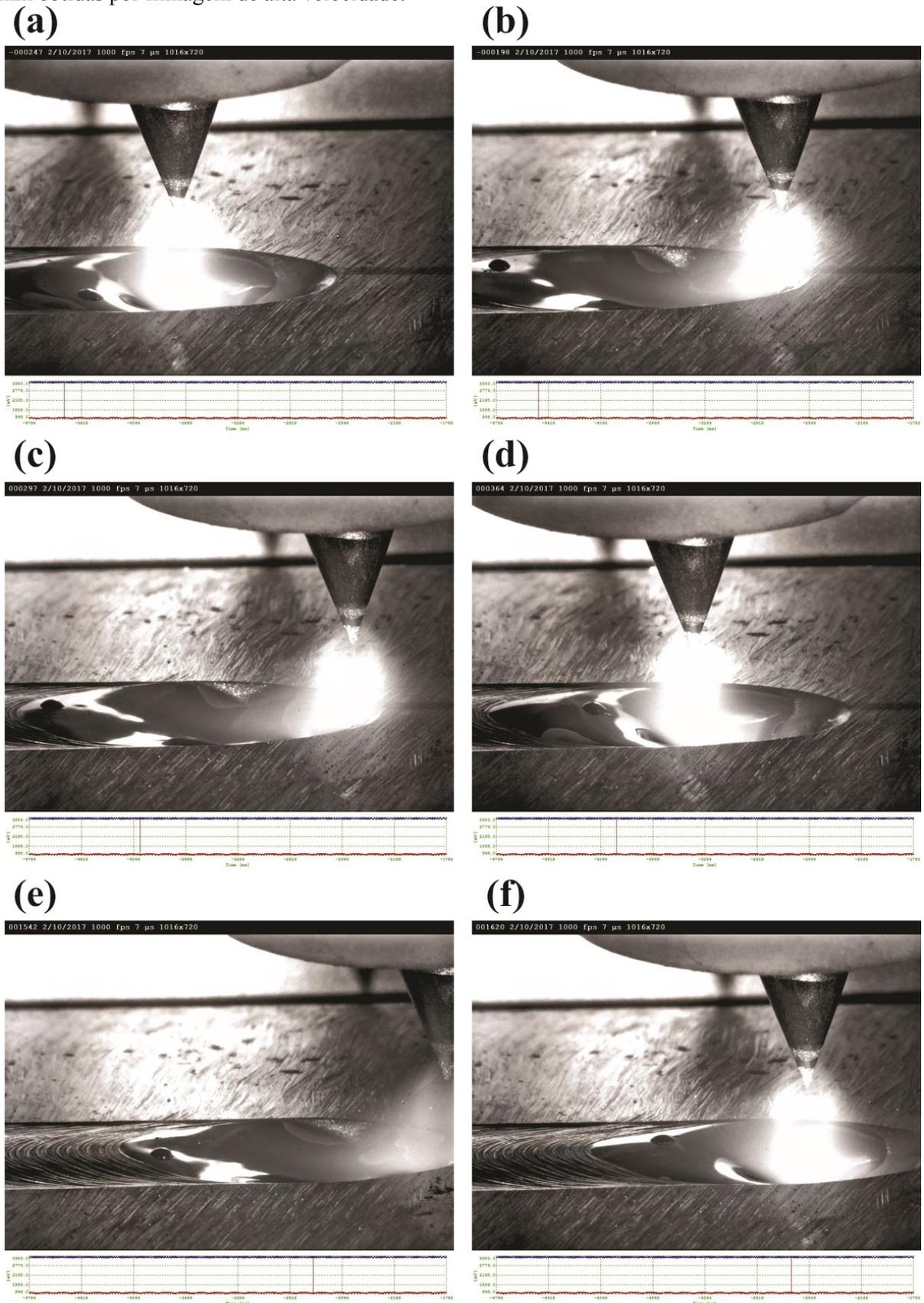
É muito provável que, a maneira como a poça de fusão se movimenta com a aplicação da técnica *switch back*, ajude a explicar o porquê a aplicação desta técnica de oscilação da tocha contribui para uma redução da penetração no cordão de solda, quando comparado a soldagem convencional. Provavelmente, o fluxo da poça de fusão ao mudar de direção a cada movimento de oscilação reduz a influência da convecção de calor dada pelo efeito Marangoni. Isso pode ocorrer em razão de na composição do aço SAE 1020 apresentar enxofre, que sendo um aço de baixa pureza possa apresentar esse elemento em um percentual máximo de 0,050 PPM. Como relatado pela literatura, o enxofre é um elemento tensoativo, que nesse caso, propicia um aumento na penetração, porque faz com que o movimento do fluxo convectivo da poça seja das bordas para o centro. Este trabalho propõe a possibilidade de que quando aplicada a técnica *switch back*, o efeito produzido por esse elemento seja anulado, fazendo com que o movimento do fluxo convectivo da poça ocorra do centro para as bordas, ocasionado em uma menor penetração.

Cabe, no entanto, ressaltar que se esse fenômeno ocorre de fato, ele assim o faça de forma mais evidente para algumas configurações de frequência e amplitude, porque como visto nos ensaios anteriores a combinação do *switch back* de 5 Hz com 4 mm produziu uma penetração maior quando comparado ao modo convencional.

Outra possibilidade para tentar explicar a razão pela qual, com a aplicação de *switch back* produz-se um cordão com menor penetração em comparação ao convencional, é de que a maior movimentação da poça de fusão faz aumentar a troca de calor por condução com o metal de base da peça a ser soldada. Nesse caso, mesmo que a explicação anterior não faça sentido (de que há uma mudança de $Ma > 0$ para $Ma < 0$), ou seja, de que não haja uma inversão do fluxo convectivo, uma distribuição maior de energia faz com que a poça tenha um menor potencial para realizar maiores penetrações, uma vez, que a velocidade do fluxo seja menos intensa, incorrendo também em menores penetrações.

Um detalhe muito importante é de que, certamente a movimentação com o *switch back* não produza uma turbulência tão alta no gás de processo a ponto do mesmo sofrer contaminação com o gás oxigênio. Essa informação está pautada no fato de que, a presença de gás oxigênio na poça de fusão faz aumentar a constrição do arco, fazendo com que a densidade de corrente crescesse, modificando a geometria do arco e incrementando a penetração. Portanto, há um forte indício da ausência de elementos tensoativos (gasosos) na poça oriundos externamente à mesma. Isso também leva a crer que a oscilação da tocha em alta frequência mantém uma boa proteção gasosa sobre a poça de fusão, este pensamento está de acordo com o trabalho [16].

Figura 5.34 - Imagens da poça de fusão com processo TIG autógeno *switch back* com $f = 8 \text{ Hz}$ e $A = 8 \text{ mm}$ obtidas por filmagem de alta velocidade.



Fonte: o próprio autor.

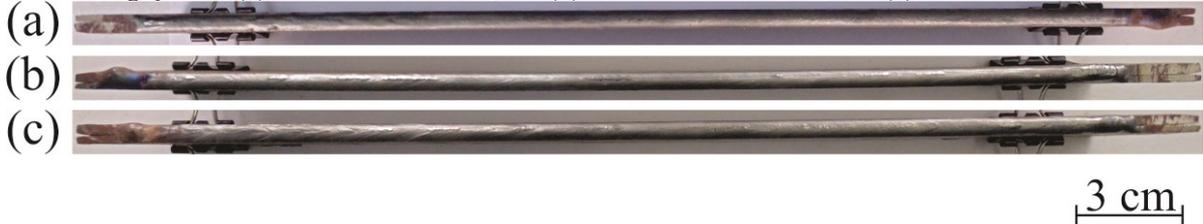
5.4 ENSAIOS EM JUNTA DE ARESTA

A Tabela 5.11 mostra os parâmetros e os seus respectivos valores que foram utilizados para ensaiar os corpos de prova com a soldagem TIG autógena em modo convencional. A referida tabela faz a associação dos ensaios com as imagens da Figura 5.35.

Tabela 5.11: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena em modo convencional nas juntas de aresta sem *gap*.

Vs [cm/min]	Im [A]
150	300
180	330
200	330

Figura 5.35 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno em modo convencional nas juntas de aresta sem *gap*. Em (a): Vs = 150 cm/min, em (b): Vs = 180 cm/min e; em (c): Vs = 200 cm/min.



Fonte: o próprio autor.

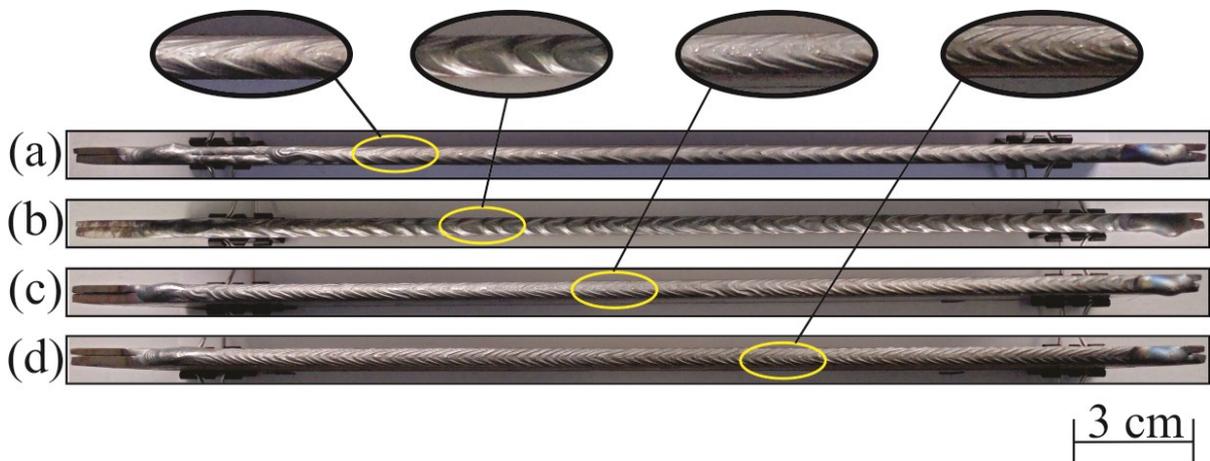
As soldagens nas condições apresentadas pela Tabela 5.11 apresentaram-se de fácil execução e repetição. A poça de fusão apresentou um volume pequeno e sempre estável, sem sofrer quaisquer alterações. Na sequência realizaram-se as soldagens aplicando-se a técnica *switch back*. A Tabela 5.12 apresenta os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios com a técnica *switch back* para uma velocidade de 150 cm/min onde se pode observar que foi variada a frequência. Na sequência a Figura 5.36 apresenta as imagens das soldas obtidas com os parâmetros da Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma Vs de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

Vs [cm/min]	Im [A]	Aa [mm]	Ar [mm]	f [Hz]	S [%]	Vmax [cm/min]	Vmin [cm/min]	Da [mm]	Dr [mm]
150	300	4	4,05	5	27	531,7	-231,7	6,9	1,9
150	300	4	4,32	6	37	638,6	-338,6	6,6	2,4
150	300	4	4,67	7	46	766,2	-466,2	6,6	3,0
150	300	4	5,12	8	54	922,1	-622,1	6,8	3,7

Observando-se a Figura 5.36 (a), onde o ensaio foi realizado com a frequência de 5 Hz, verifica-se que ocorreu uma pequena falta de fusão no início da formação do cordão de solda. Acredita-se, que isso tenha ocorrido em razão de ter se dado o comando para o avanço do Tartilope antes que a poça de fusão tenha sido formada adequadamente. Outra possibilidade é que para esta condição de ensaio onde foi empregado 5 Hz de frequência combinado com a amplitude de 4 mm, não se consegue um alongamento adequado da poça de fusão, fazendo com que haja inicialmente o rompimento da mesma. Por outro lado, as soldas obtidas com as frequências de 6, 7 e 8 Hz apresentaram bons resultados.

Figura 5.36 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 150 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

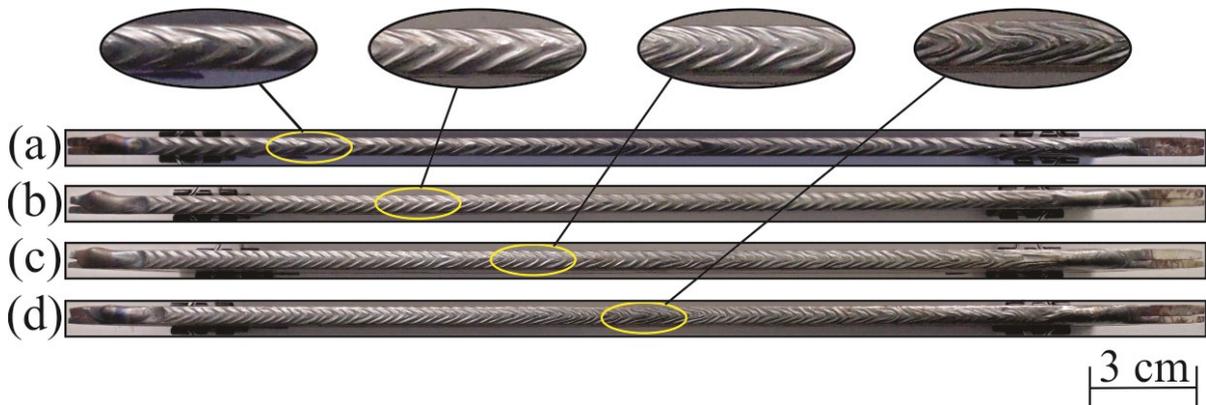
Na sequência, as soldas apresentadas pela Figura 5.37 referem-se aos dados apresentados na Tabela 5.13. Estes ensaios foram realizados mudando-se a amplitude para 8 mm.

Nesta condição onde a amplitude foi dobrada de valor observou-se um ligeiro alongamento da poça de fusão e observando a Figura 5.37 (a), onde o ensaio realizou-se com frequência de 5 Hz, não ocorreu a falta de fusão no início do cordão. Nos demais todos os outros ensaios obtiveram bons resultados.

Tabela 5.13: : Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma V_s de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
150	300	8	7,18	5	49	826,7	-526,7	9,9	4,9
150	300	8	7,70	6	58	102,8	-720,8	9,9	5,7
150	300	8	8,45	7	65	1265,0	-965,0	10,3	6,7
150	300	8	9,44	8	72	1573,5	-1273,5	11,1	7,9

Figura 5.37 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 150 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



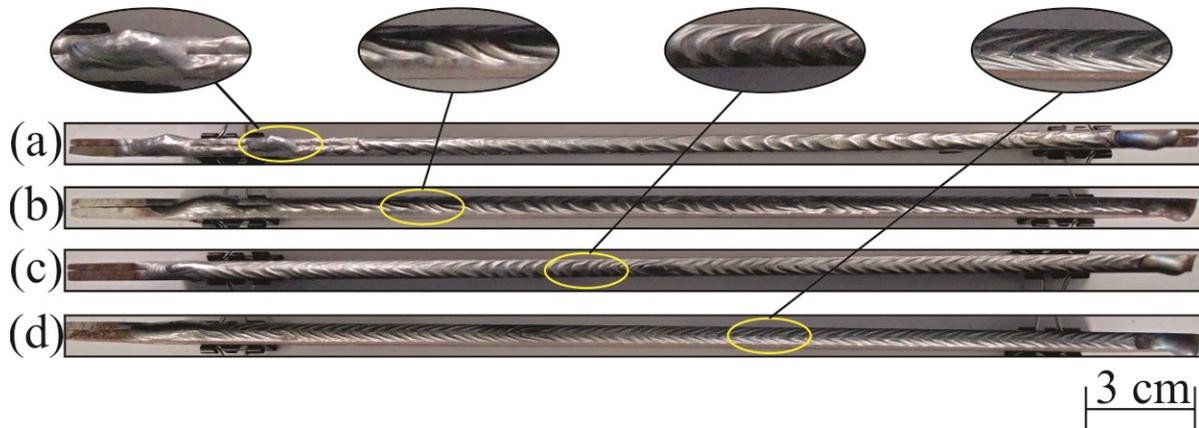
Fonte: o próprio autor.

Uma vez obtidos bons resultados com a aplicação da técnica *switch back* para uma velocidade de 150 cm/min, buscou-se aumentar esse patamar para 180 cm/min, aplicando-se os mesmos parâmetros do *switch back* que no caso anterior, apenas adequando a corrente média que agora passa a ser de 330 A.

Tabela 5.14: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma V_s de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
180	330	4	4,05	5	20	561,7	-201,7	7,5	1,5
180	330	4	4,32	6	30	668,6	-308,6	7,1	2,1
180	330	4	4,67	7	39	796,2	-436,2	7,0	2,7
180	330	4	5,12	8	47	952,1	-592,1	7,1	3,4

Figura 5.38 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 180 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

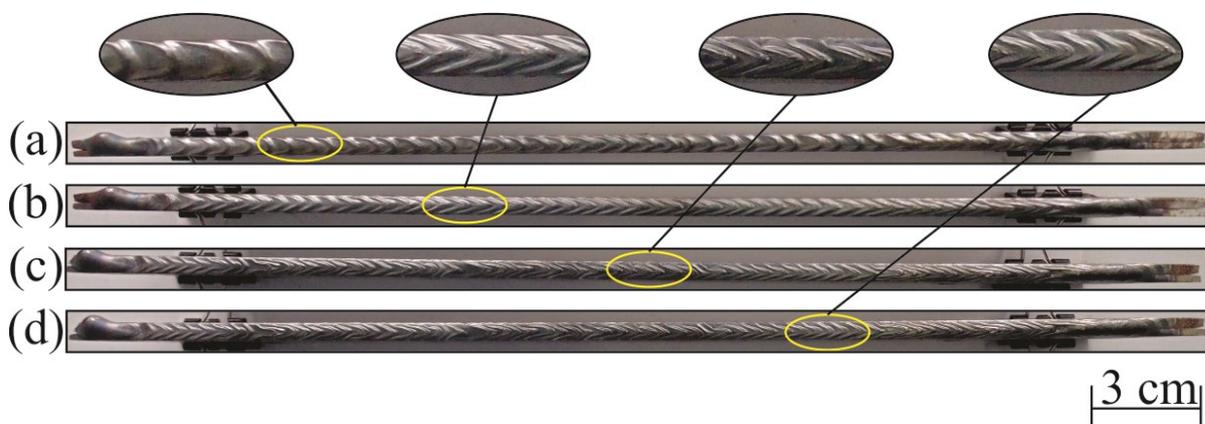
A Figura 5.38 apresenta os resultados obtidos para uma soldagem *switch back* de acordo com os parâmetros demonstrados na Tabela 5.14.

Observa-se que mais uma vez para a amplitude de 4 mm, ocorreu uma ligeira falta de fusão no início do cordão de solda e que novamente essa ocorrência deu-se para a frequência de 5 Hz, as razões para tal já forma mencionadas anteriormente. Para o restante dos cordões se observam bom acabamento superficial sem ocorrência de defeitos.

Tabela 5.15: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma V_s de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
180	330	8	7,18	5	43	856,7	-496,7	10,4	4,4
180	330	8	7,70	6	52	1050,8	-690,8	10,4	5,4
180	330	8	8,45	7	60	1295,0	-935,0	10,7	6,4
180	330	8	9,44	8	67	1603,5	-1243,5	11,4	7,6

Figura 5.39 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 180 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

Novamente, após a realização dos ensaios com 4 mm de amplitude, aumentou-se a mesma para 8 mm e realizou-se os ensaios para verificar os resultados que poderiam ser obtidos. Os parâmetros relacionados às imagens da Figura 5.39 estão descritos na Tabela 5.15.

Observando-se as imagens da Figura 5.39, observa-se que todos os cordões apresentaram bom acabamento superficial, porém, nota-se que os cordões com as frequências de 7 e 8 Hz demonstraram pequenas interrupções nas irregularidades das escamas, ou seja, regiões do cordão onde ocorreu um espaçamento maior entre uma escama e outra, indicando possivelmente que para frequências e amplitudes dessa natureza aplicadas a esse tipo de junta começa-se a reduzir a estabilidade do processo.

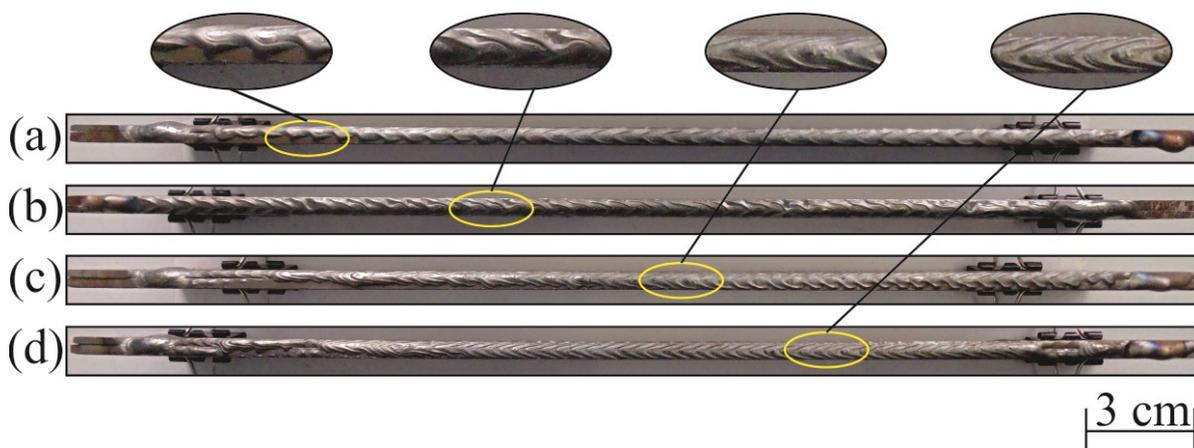
Tabela 5.16: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma V_s de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
200	330	4	4,05	5	16	581,7	-181,7	8,0	1,3
200	330	4	4,32	6	26	688,6	-288,6	7,5	1,9
200	330	4	4,67	7	35	816,2	-416,2	7,3	2,5
200	330	4	5,12	8	44	972,1	-572,1	7,4	3,2

Seguidamente, as soldagens foram realizadas com a velocidade de 200 cm/min, coincidentemente, a corrente elétrica que melhor se adequou a esta velocidade também foi a de 330 A, utilizada para as soldagens com 180 cm/min. Este fato demonstra que a partir da

velocidade de 180 cm/min aplicada a esta junta em específico, a corrente elétrica não cresce mais de maneira proporcional junto com a velocidade de soldagem.

Figura 5.40 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 200 cm/min e $A = 4$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

A Figura 5.40 mostra as imagens dos ensaios realizados para uma amplitude de 4 mm com variação da frequência de 5 a 8 Hz. Os demais dados dos parâmetros empregados nos ensaios encontram-se na Tabela 5.16.

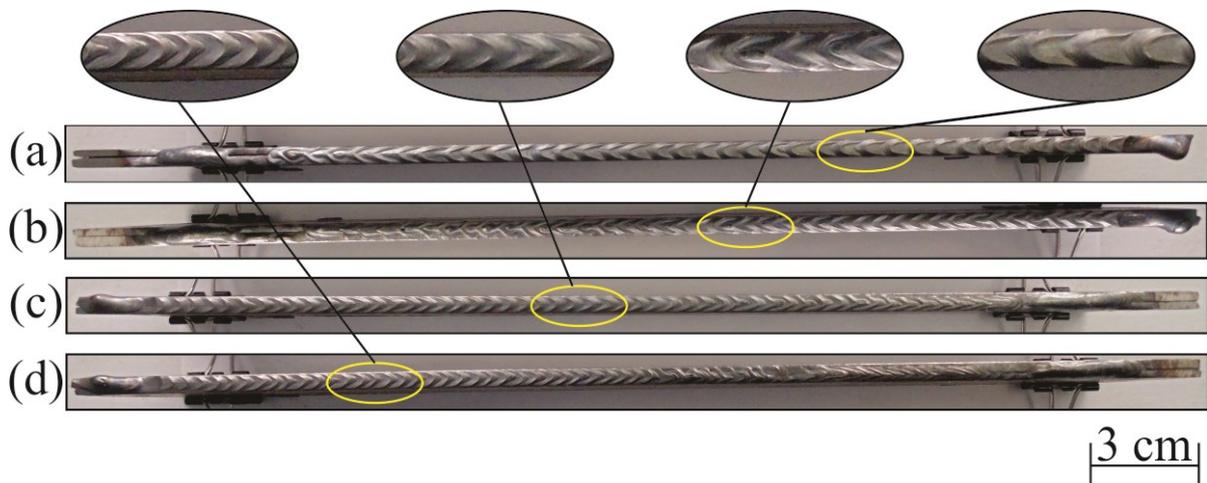
Observando-se as imagens da Figura 5.40 observam-se falta de fusão no início dos cordões com 5 Hz (Figura 5.40 (a)), 7 Hz (Figura 5.40 (c)) e 8 Hz (Figura 5.40 (d)). Acredita-se que ocorreu um desalinhamento entre o centro do eletrodo e o centro da junta o que fez com ocorresse a fusão da chapa de 2 mm em detrimento da chapa de 3 mm. Porém, cerca de 90% do cordão apresentou boa fusão e bom acabamento superficial. No caso do cordão com 5 Hz a imagem ampliada de uma região da Figura 5.40 mostra bem o defeito ocorrido. Para o ensaio com 8 Hz houve uma pequena falta de fusão ao término do cordão em virtude do fechamento do arco.

E por fim, as últimas soldas realizadas sem *gap* foram as com velocidade de 200 cm/min e amplitude de 8 mm. A Tabela 5.17 apresenta os dados para cada parâmetro utilizado nos ensaios. Enquanto que a Figura 5.41 apresenta os resultados das soldas referentes aos dados da Tabela 5.17.

Tabela 5.17: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta sem *gap* para uma V_s de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
200	330	8	7,18	5	38	876,7	-476,7	10,8	4,2
200	330	8	7,70	6	48	1070,8	-670,8	10,7	5,1
200	330	8	8,45	7	57	1315,0	-915,0	11,0	6,2
200	330	8	9,44	8	64	1623,5	-1223,5	11,6	7,4

Figura 5.41 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno com aplicação da técnica *switch back* para uma V_s de 200 cm/min e $A = 8$ mm, em juntas de aresta sem *gap*. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

Com relação aos ensaios ilustrados pela Figura 5.41 fica claro que nos ensaios com as frequências de 5 e 6 Hz ocorreu uma pequena falta de fusão no início dos cordões, no entanto todo o restante do cordão apresentou bom acabamento superficial. Já o ensaio com 8 Hz apresentou uma pequena irregularidade de continuidade nas escamas de solidificação. O único resultado que se manteve estável foi com 7 Hz. Pode-se observar que para os ensaios com a velocidade de 200 cm/min, o incremento na variável da amplitude de 4 para 8 mm produziu substancial melhora nos ensaios com as frequências de 7 e 8 Hz. Não podendo dizer o mesmo do resultado do ensaio com 5 Hz onde o resultado parece não ter mudado e, do cordão com 6 Hz onde o resultado com 4 mm de amplitude não apresentou falta de fusão como observado com o cordão onde utilizou-se 8 mm.

Embora a técnica *switch back*, aplicada à soldagem de juntas em estado de fabricação ideal tenha conseguido bons resultados e apenas um ou outro defeito de falta de fusão no

início dos cordões. Com base nessa observação pode-se admitir que quando utilizada em uma junta ideal (desnível e desalinhamento próximo a zero) a técnica *switch back* não apresenta vantagens relativamente importantes quando comparada a soldagem convencional. Para que as informações não fiquem repetitivas no decorrer do texto, as demais análises serão abordadas em conjunto com as dos ensaios onde foi empregado o *gap* de 1 mm.

5.4.1 Soldagem em junta de aresta com *gap* de 1 mm

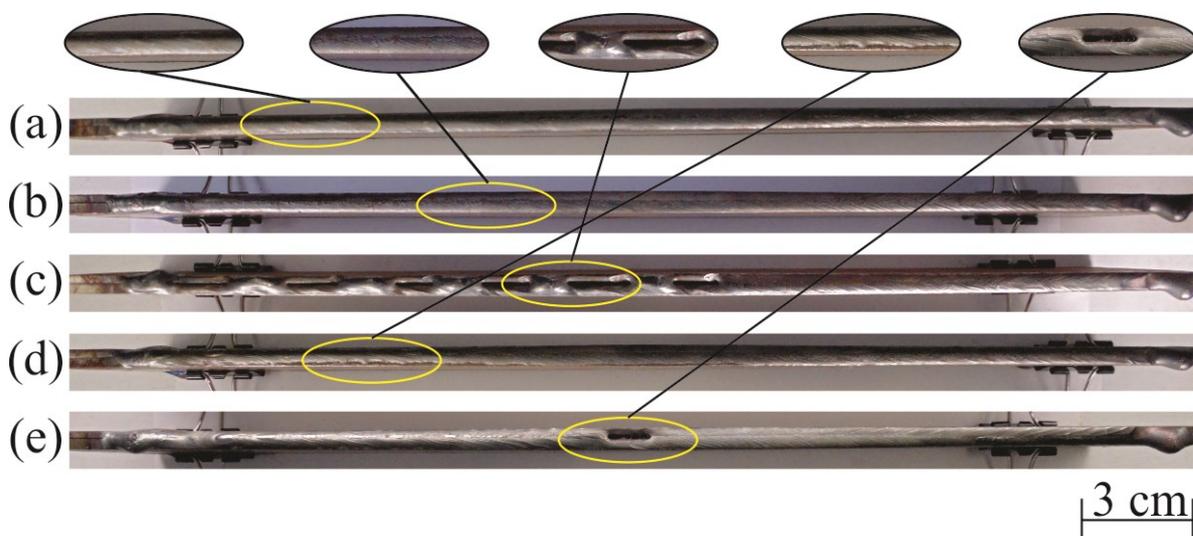
Na realização dos ensaios com a inserção do *gap* de 1 mm ao centro da junta, utilizou-se os mesmos parâmetros dos ensaios sem o *gap*, tanto para a soldagem convencional, quanto para a soldagem com a aplicação da técnica *switch back*. A única variável que realmente sofreu modificação foi a corrente elétrica selecionada na fonte. Uma vez que havia um espaçamento entre as chapas de 2 e 3 mm, fez-se necessário um patamar de corrente maior para fundi-las adequadamente.

A Tabela 5.18 apresenta os parâmetros com os respectivos valores utilizados para a realização das soldagens com o processo TIG autógeno em modo convencional aplicados a junta de aresta com *gap* de 1 mm. As imagens dos resultados referentes aos parâmetros fornecidos pela Tabela 5.18 encontram-se na Figura 5.42.

Tabela 5.18: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena em modo convencional nas juntas de aresta com *gap*.

Vs [cm/min]	Im [A]	Resultado
150	330	Adequado
180	340	Adequado
180	340	Não Adequado
200	360	Não Adequado
200	360	Não Adequado

Figura 5.42 - Resultados da soldagem com o TIG autógeno em modo convencional nas juntas de aresta com *gap*. Em (a): $V_s = 150$ cm/min, em (b): $V_s = 180$ cm/min, em (c): $V_s = 180$ cm/min, em (d): $V_s = 200$ cm/min e; em (e): $V_s = 200$ cm/min.



Fonte: o próprio autor.

Observando-se os ensaios realizados com o processo TIG autógeno convencional na junta de aresta com *gap* de 1 mm verifica-se que, o único bom resultado obtido foi com uma V_s de 150 cm/min. Embora tenha-se conseguido realizar soldas com V_s de 180 e 200 cm/min, estes resultados não repetiram. Com a V_s de 180 cm/min ocorreu falta de fusão em 60% da junta e, quanto a V_s de 200 cm/min não conseguiu-se repetir o ensaio sem que ocorresse diversas vezes a ocorrência de falta de fusão no centro da junta, justamente onde há o maior *gap*. Tentou-se elevar a corrente de soldagem para as duas situações em 10 A, porém ocorreu gotejamento de material da poça de fusão. O ensaio demonstrado na Figura 5.42 (d) aparentemente parece adequado, porém também ocorreu falta de fusão na borda da chapa de 3 mm por 60% da junta. Todos os ensaios foram realizados com alinhamento visual entre o centro do eletrodo e o centro da junta, se colocado o centro do eletrodo com o alinhamento tendendo mais para a chapa de 2 mm, a chapa de 3 mm não fundia na borda. Se, por outro lado, fosse colocado o centro do eletrodo tendendo o alinhamento para a chapa de 3 mm, além de também incorrer em falta de fusão na borda da chapa de 2 mm, ocorria *gotejamento* de material da poça de fusão, ou seja, a poça escorria e pingava sobre a bancada ou o seu escorrimento se solidificava antes na própria junta formando assim um cordão de solda disforme.

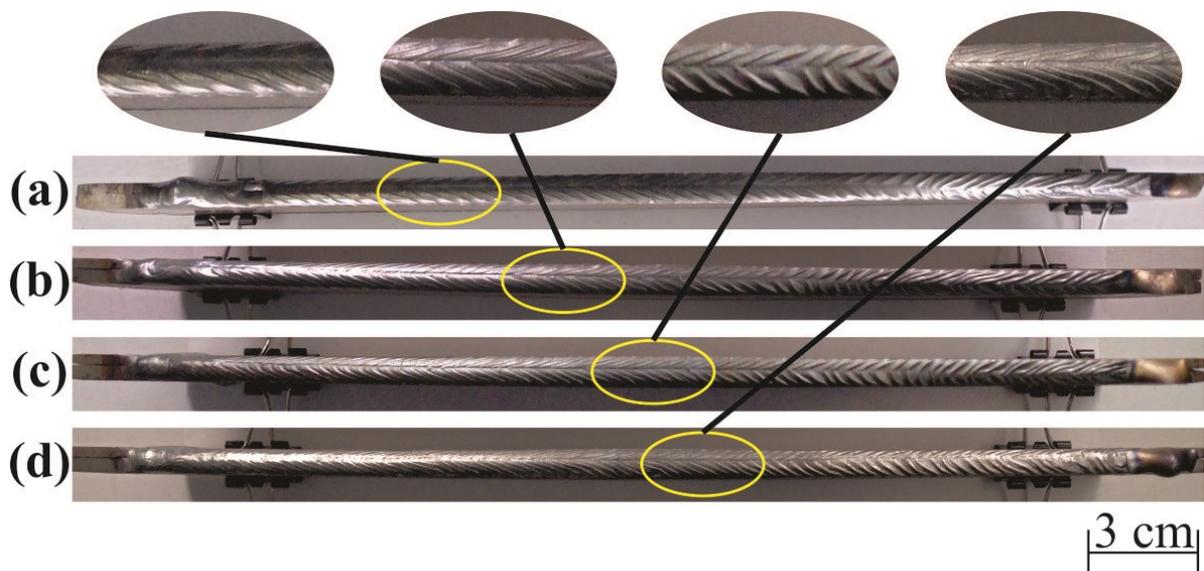
Seguidamente, buscou-se aplicar a técnica *switch back* de modo semelhante ao que foi realizado com as juntas sem *gap*. Decidiu-se utilizar a mesma sequência de ensaios, iniciando pela velocidade de 150 cm/min seguindo-se pelas de 180 e 200 cm/min. Fez-se

primeiro os ensaios com 4 mm e depois com 8 mm de amplitude, sempre variando a frequência de 5 a 8 Hz (Figura 5.43). A Tabela 5.19 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 150 cm/min com amplitude de 4 mm.

Tabela 5.19: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
150	300	4	4,05	5	27	531,7	-231,7	6,9	1,9
150	300	4	4,32	6	37	638,6	-338,6	6,6	2,4
150	300	4	4,67	7	46	766,2	-466,2	6,6	3,0
150	300	4	5,12	8	54	922,1	-622,1	6,8	3,7

Figura 5.43 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com *gap* para uma velocidade de 150 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

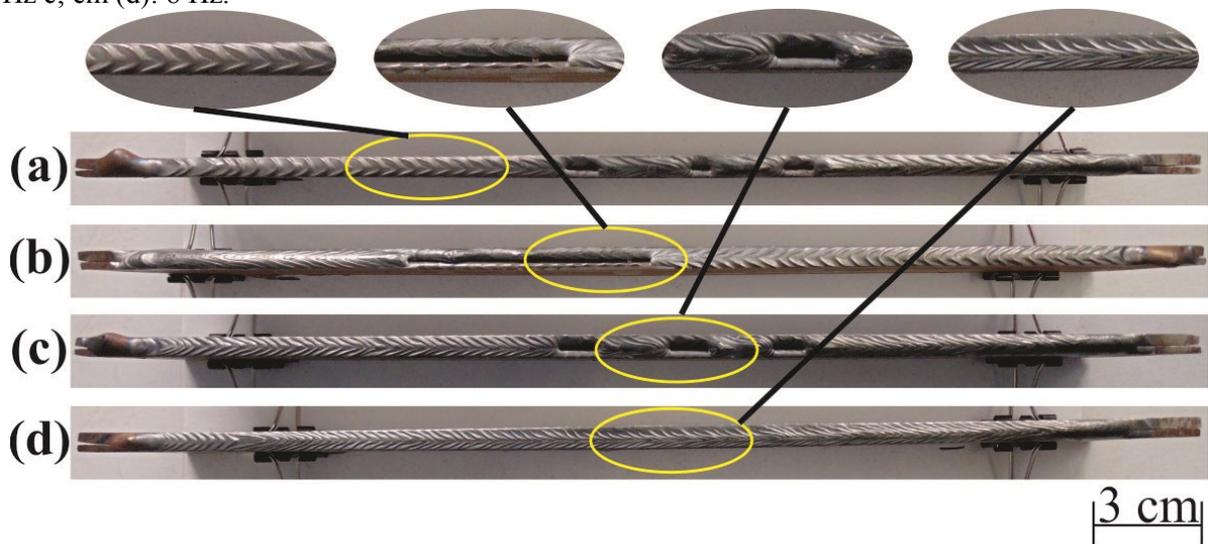
Observa-se pelos resultados da Figura 5.43 que todos os ensaios para a V_s de 150 cm/min apresentaram bons resultados, exceto para o ensaio com 5 Hz que apresentou um pequeno ponto com falta de fusão no início do cordão de solda.

Na sequência foram realizados os ensaios com a amplitude de 8 mm (Figura 5.44). A Tabela 5.20 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 150 cm/min com amplitude de 8 mm.

Tabela 5.20: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 150 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
150	300	8	7,18	5	49	826,7	-526,7	9,9	4,9
150	300	8	7,70	6	58	102,8	-720,8	9,9	5,7
150	300	8	8,45	7	65	1265,0	-965,0	10,3	6,7
150	300	8	9,44	8	72	1573,5	-1273,5	11,1	7,9

Figura 5.44 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com *gap* para uma velocidade de 150 cm/min e amplitude de 8 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

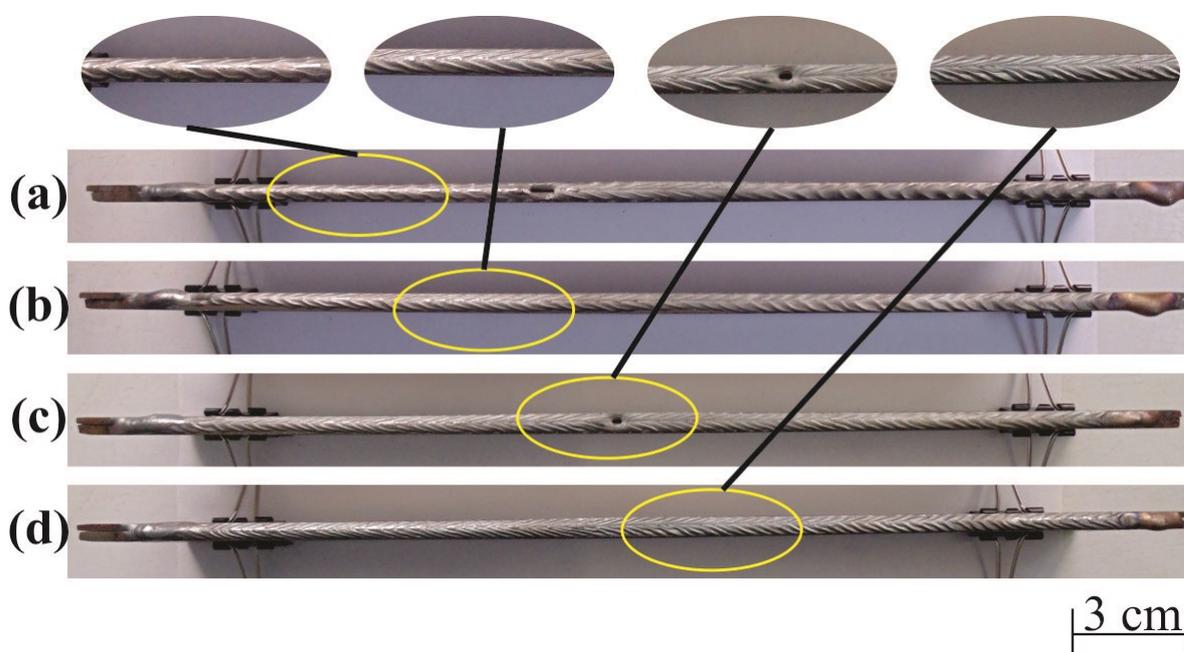
Avaliando-se os resultados da Figura 5.44, constata-se que os ensaios realizados com 5 Hz, 6 Hz e 7 Hz para o dobro da amplitude anterior apresentaram uma falta de fusão que concentra-se na região central, ou seja, onde o *gap* é máximo. Apenas o resultado com 8 Hz de frequência repetiu com estabilidade. Quando comparados estes resultados com os obtidos pela amplitude de 4 mm, percebe-se que para uma frequência maior a película da poça de fusão fica mais fina, porque funde menos material. Nesse caso, pode-se afirmar que o resultado obtido com a combinação de 8 Hz com 8 mm, sendo o único bom resultado para essa amplitude, produziu um ponto fora da curva, não servindo de parâmetro para dizer que para a amplitude de 8 mm os resultados são estáveis. Até porque na comparação com base na sobreposição, se nota que os resultados de 7 Hz e 8 Hz para 4 mm estão próximos da faixa de sobreposição que os resultados para 5 Hz e 6 Hz para 8 mm.

Posteriormente os testes foram realizados para uma velocidade de 180 cm/min com a amplitude de 4 mm (Figura 5.45). A Tabela 5.21 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 180 cm/min com amplitude de 4 mm.

Tabela 5.21: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
180	330	4	4,05	5	20	561,7	-201,7	7,5	1,5
180	330	4	4,32	6	30	668,6	-308,6	7,1	2,1
180	330	4	4,67	7	39	796,2	-436,2	7,0	2,7
180	330	4	5,12	8	47	952,1	-592,1	7,1	3,4

Figura 5.45 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com *gap* para uma velocidade de 180 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

Conforme mostra a Figura 5.45, verifica-se que para as frequências de 5 Hz e 7 Hz ocorreu resultado semelhante ao ocorrido para a velocidade de 150 cm/min com a amplitude de 8 mm. Acredita-se que aqui também ocorreu a formação de uma película mais fina,

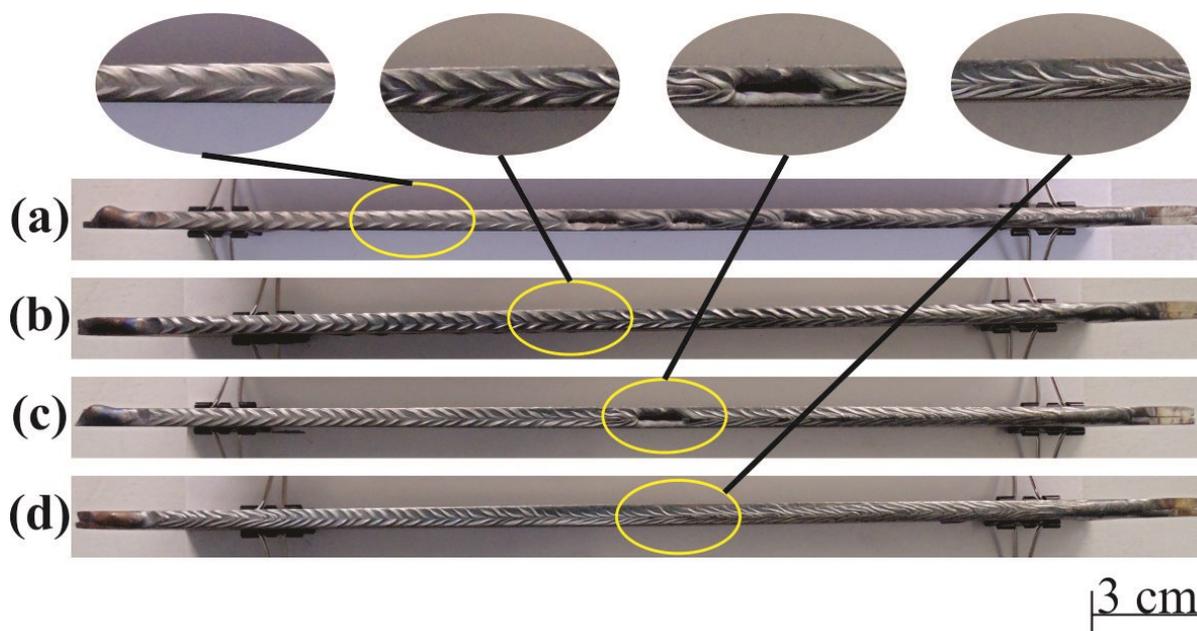
fundindo menos material. Nesse caso a amplitude utilizada foi de 4 mm, porém a velocidade passou de 150 cm/min para 180 cm/min, isso quer dizer que o efeito da falta de fusão não foi provocado por uma amplitude maior, mas por uma velocidade de soldagem mais elevada que produziu o mesmo efeito de falta de fusão. Os ensaios que apresentaram bons resultados (6 Hz e 8 Hz) com sobreposições de 30% e 47%, apresentaram valores de sobreposição muito próximos a aqueles em que foi possível conseguir bons cordões de solda para a V_s de 150 cm/min e amplitude de 4 mm nas frequências de 5 Hz e 7 Hz, (27% e 46%). Estes resultados próximos levam a crer, num primeiro momento, que estes valores específicos de sobreposição apresentam resultados estáveis, porém deixaremos estas análises à posteriori.

Novamente a amplitude foi aumentada para 8 mm (Figura 5.46). A Tabela 5.22 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 180 cm/min com amplitude de 8 mm.

Tabela 5.22: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 180 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
180	330	8	7,18	5	43	856,7	-496,7	10,4	4,4
180	330	8	7,70	6	52	1050,8	-690,8	10,4	5,4
180	330	8	8,45	7	60	1295,0	-935,0	10,7	6,4
180	330	8	9,44	8	67	1603,5	-1243,5	11,4	7,6

Figura 5.46 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com gap para uma velocidade de 180 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

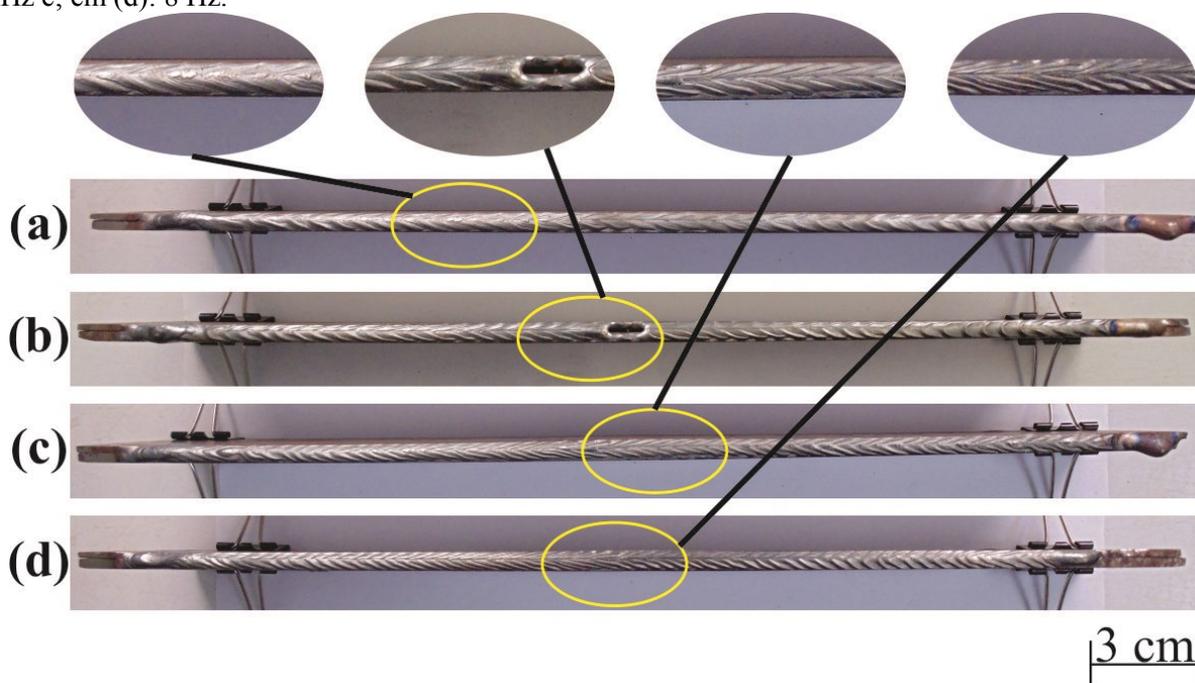
Pelas imagens da Figura 5.46, verifica-se que ocorreu falta de fusão para as mesmas frequências que os ensaios utilizando-se a amplitude de 4 mm. Ressalta-se que para a amplitude de 8 mm a falta de fusão parece ter aumentado. Nota-se que para a frequência de 5 Hz a sobreposição foi de 43% e para a amplitude de 4 mm com 8 Hz a sobreposição foi de 47%, levando a considerar que nessa faixa de sobreposição os resultados tendem a não configurar um boa solda. Percebe-se também que, a faixa de sobreposição de 43% a 49% é instável, pois apresentou resultados ruins para as sobreposições mencionadas e bom resultado para 47%. O mesmo ocorre para as sobreposições de 20% e 27%

Na sequência as soldas foram feitas para a velocidade de 200 cm/min, iniciando-se pela amplitude de 4 mm (Figura 5.47). A Tabela 5.23 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 200 cm/min com amplitude de 4 mm.

Tabela 5.23: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 4 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
200	330	4	4,05	5	16	581,7	-181,7	8,0	1,3
200	330	4	4,32	6	26	688,6	-288,6	7,5	1,9
200	330	4	4,67	7	35	816,2	-416,2	7,3	2,5
200	330	4	5,12	8	44	972,1	-572,1	7,4	3,2

Figura 5.47 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com *gap* para uma velocidade de 200 cm/min e amplitude de 4 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

Todos os ensaios realizados com a amplitude de 4 mm para uma V_s de 200 cm/min apresentaram excelentes resultados, exceto para a frequência de 6 Hz que demonstrou um pequeno ponto com falta de fusão próximo a região central do corpo de prova, região esta próxima do *gap* máximo. Isso mostra que também essa região de sobreposição é bastante instável, uma vez que se conseguiu um bom resultado com a sobreposição de 27% quando se utilizou a V_s de 150 cm/min com 4 mm de amplitude na frequência de 5 Hz.

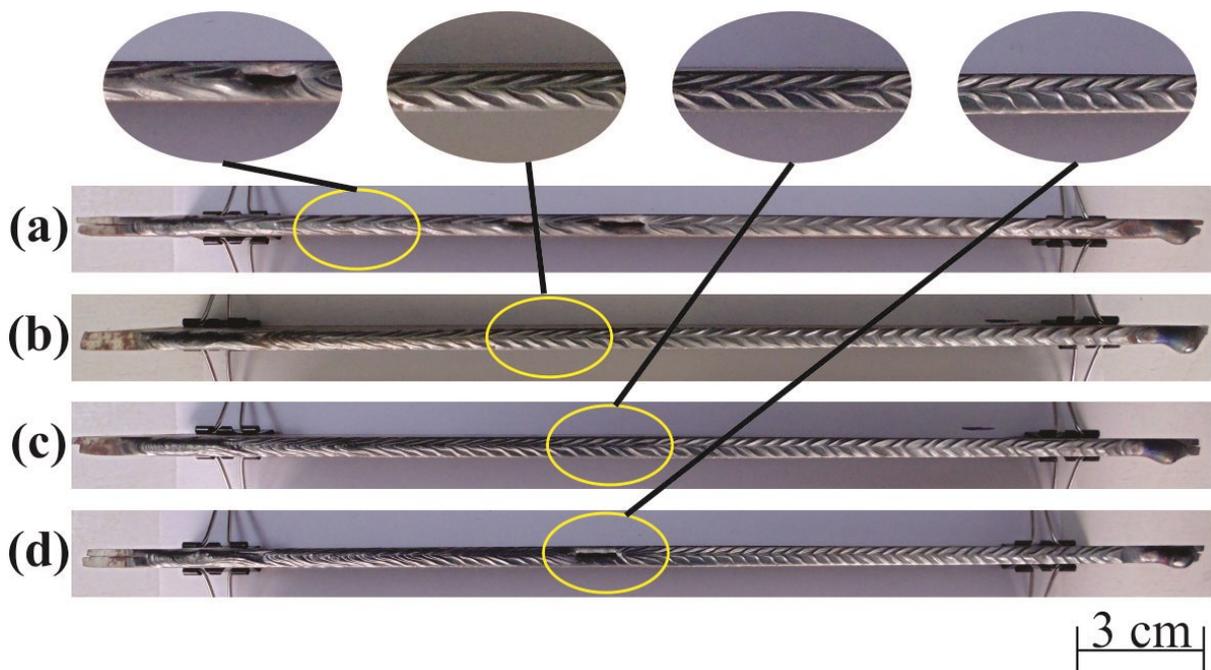
Por fim, completou-se os últimos ensaios para a velocidade de 200 cm/min com a amplitude de 8 mm (Figura 5.48). A Tabela 5.24 apresenta os parâmetros e demais dados

utilizados para a realização dos ensaios para a velocidade de 200 cm/min com amplitude de 8 mm.

Tabela 5.24: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de aresta com *gap* de 1 mm para uma V_s de 200 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
200	330	8	7,18	5	38	876,7	-476,7	10,8	4,2
200	330	8	7,70	6	48	1070,8	-670,8	10,7	5,1
200	330	8	8,45	7	57	1315,0	-915,0	11,0	6,2
200	330	8	9,44	8	64	1623,5	-1223,5	11,6	7,4

Figura 5.48 - Resultados da soldagem com TIG autógeno com aplicação na técnica *switch back* com *gap* para uma velocidade de 200 cm/min e amplitude de 8 mm. Em (a): 5 Hz, em (b): 6 Hz, em (c): 7 Hz e; em (d): 8 Hz.



Fonte: o próprio autor.

Finalmente os ensaios foram realizados com a amplitude de 8 mm. Nessa condição, o ensaio com 5 Hz e 8 Hz apresentaram falta de fusão. Nota-se que próximo da sobreposição de 38% os resultados de soldagem também são instáveis uma vez que com 39% de sobreposição para a V_s de 180 cm/min, 4 mm de amplitude e frequência de 5 Hz, o cordão de solda apresentou defeito semelhante. Porém, percebe-se que a partir de 64%, ou seja, 67% e 72%, os resultados de soldagem tornam-se mais repetitivos.

Um aspecto importante que foi observado é de que a técnica *switch back* tem a propriedade de unir uma junta com desalinhamento, porém é necessário esclarecer que a referida técnica não compensa o desalinhamento entre o centro do eletrodo com o centro da junta. Ou seja, a trajetória da tocha precisa estar muito bem alinhada com a linha central do *gap*. É possível que se empregássemos a técnica *switch back* aliada a um processo com alimentação de material isso não fosse necessário, pois a adição de material compensaria essa diferença, porém aqui como se trata de um processo autógeno a técnica não alcançou tal capacidade.

Outro aspecto que foi observado durante a execução dos ensaios, é de que quando aumentados os patamares de frequência, ocorre um alargamento da poça de fusão, ou seja, essa adquire a capacidade de fundir de modo mais adequado às bordas das chapas. Porém essa impressão não é verdadeira, acontece que durante a execução da soldagem com a técnica *switch back* ocorre a vibração do sistema (Tartilope + módulo de oscilação) produzindo um movimento ao longo do eixo (Z) de subida e descida. Porém, como essa movimentação é bem pequena e depende do incremento da frequência, acaba tornando-se um micro tecimento. Vale esclarecer que na soldagem dos corpos de prova em junta de aresta na posição horizontal, a tocha está posicionada na horizontal e não na vertical como mostrado na (Figura 5.30), portanto não cabe aqui falar em variabilidade da DEP.

Não é possível concluir qual é a verdadeira influência deste micro tecimento, ou seja, não se pode dizer se o mesmo foi benéfico ou não para a obtenção dos resultados. Se por um lado o micro tecimento, possivelmente, confere a capacidade de fundir melhor as bordas das chapas do corpo de prova, por outro lado, é salutar pensar que essa pequena movimentação poderia produzir uma agitação na poça de fusão a fim de desbalancear a mesma, ocasionado uma provável expulsão de material da poça de fusão.

Nessa linha, observou-se que a condição mais comum de ocorrer expulsão de material da poça acontece quando se tem uma corrente desconexa com a velocidade de soldagem, aliada a uma alta frequência e baixa amplitude. Se a velocidade de soldagem for baixa e a corrente um pouco acima da ideal, para uma frequência de 6 Hz e uma amplitude de 4 mm por exemplo, ocorre que a poça de fusão vai aumentando seu volume ao longo da trajetória de soldagem. Esse volume maior de poça de fusão vai sendo sustentado na junta pela pressão que o arco exerce sobre a mesma, porém, se esse volume de poça chegar ao limite de sua sustentação antes de encontrar o centro da junta, onde está situado o *gap*, ocorre o gotejamento da mesma. E, se por outro lado, essa mesma poça conseguir chegar à fenda máxima do *gap* antes de despencar, a pressão do arco consegue empurrá-la para dentro da

junta, diminuindo consideravelmente seu volume. Quando isso acontece, a poça começa a aumentar seu volume novamente a partir do centro, no entanto, antes de chegar ao seu volume limite, a tocha já alcançou o fim da junta e a soldagem foi encerrada, impedindo a ocorrência de gotejamento.

Ainda, também não se pode dizer se com o incremento da amplitude o microtecimento também não é amplificado, a exemplo do que corre com a frequência. Não se pode fazer essa afirmação porque em todos os ensaios onde se buscou estudar esse fenômeno pela variabilidade da DEP, utilizou-se sempre a mesma amplitude selecionada de 10 mm.

Quanto ao ganho de produtividade é necessário relatar que a mesma pode ser realizada sob aspectos diferentes. Num primeiro momento, a comparação está sendo feita entre o processo TIG autógeno convencional e o mesmo com a aplicação da técnica *switch back*. Nesse sentido, este trabalho pode afirmar que houve um ganho de produtividade de 33% na soldagem de juntas de aresta na posição horizontal com a aplicação da técnica *switch back* quando comparada ao modo convencional. Para essa afirmação está sendo considerado o incremento da velocidade de soldagem, ou seja, as outras variáveis e custos envolvidos são exatamente os mesmos, inclusive desgaste do eletrodo. Já numa segunda análise, ainda não é possível afirmar que a produtividade do processo TIG autógeno com o *switch back* seja maior quando comparado ao processo MIG/MAG na soldagem de selamento de tampa e casco de compressores herméticos de refrigeração. Algumas particularidades precisam ser explicadas para que fique mais claro o raciocínio.

Segundo Ietka [3], há um percentual de retrabalho de 0,5% na soldagem dos compressores quando utilizado o processo MIG/MAG. Esse retrabalho demanda maior tempo para concluir, definitivamente, a soldagem dos compressores, o que reduz a produtividade da operação. Nesse caso, poderíamos dizer que o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica *switch back* aumentaria a produtividade do processo, uma vez que consegue soldar juntas com 200 cm/min quando comparado ao MIG/MAG que realiza a referida operação em 150 cm/min. Porém a ressalva que se faz é de que o *switch back* foi empregado num junta similar a do compressor e não no compressor. A junta soldada era em chapa plana com 300 mm de comprimento e aço SAE 1020 sem inspeção de qualidade e toda a soldagem realizada linearmente, já o compressor possui 570 mm de comprimento da sua circunferência com quatro raios distintos em sua curvatura, aço SAE 1020 de alta qualidade e também maior quantidade de massa para distribuição do calor gerado pelo arco. Em outras palavras, a condição de soldagem é muito distinta. Outro detalhe é que atualmente o compressor é soldado com junta sobreposta.

Outro aspecto que merece destaque é o fato de que embora haja retrabalho de 0,5% na soldagem dos compressores com o processo MIG/MAG, a operação de soldagem com o processo TIG necessita de constantes afiações dos eletrodos. Nesse trabalho foi necessária uma nova afiação a cada 12 juntas aproximadamente. Infelizmente, o eletrodo devido a sua utilização tende a perder a forma geométrica, modificando a forma também do arco, necessitando, portanto ser reafiado constantemente. Levando-se isso a um processo industrial seria necessário verificar se o tempo de retrabalho na soldagem dos compressores é maior ou menor que o tempo de afiação dos eletrodos e, ainda assim, seria necessária a utilização de um equipamento automático para realizar tal tarefa.

Para avaliar a importância da sobreposição de trajetória para o *switch back*, elaborou-se uma tabela com as combinações dos parâmetros utilizados na aplicação das juntas de aresta (Tabela 5.25). Nessa tabela atribuiu-se qualitativamente o termo bom para as soldas que não apresentaram defeitos e, ruim para as que apresentaram falta de fusão em qualquer grau.

Observando-se a Tabela 5.25 verifica-se que, as sobreposições de trajetória, em linhas gerais, entre 26 a 35%, 46 a 57% e, 67 a 72%, são faixas de sobreposição onde se apresentam bons resultados. Porém, de acordo com esse trabalho, verificou-se que combinações de frequência e amplitude para uma mesma V_s apresentam o mesmo percentual de trajetória, mas resultados muito diferentes, principalmente no que tange aos parâmetros geométricos do cordão de solda. Dessa forma, não se pode dizer que o parâmetro da sobreposição de trajetória não fornece uma informação confiável quanto ao valor específico ou faixa de operação para obter bons resultados de soldagem, e que não traz um valor útil para a aplicação do *switch back*. Essa afirmação não pode ser feita porque há a possibilidade da presença de ressonância no sistema.

Tabela 5.25: Resultados adequados e não adequados da aplicação *switch back* em juntas de aresta para avaliar os valores de sobreposição de trajetória.

Velocidade	Frequência	Amplitude	Resultado	Sobreposição
150 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	27%
150 cm/min	6 Hz	4 mm	Não Adequado	37%
150 cm/min	7 Hz	4 mm	Adequado	46%
150 cm/min	8 Hz	4 mm	Adequado	54%
180 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	20%
180 cm/min	6 Hz	4 mm	Adequado	30%
180 cm/min	7 Hz	4 mm	Não Adequado	39%
180 cm/min	8 Hz	4 mm	Não Adequado	47%
200 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	16%
200 cm/min	6 Hz	4 mm	Adequado	26%
200 cm/min	7 Hz	4 mm	Adequado	35%
200 cm/min	8 Hz	4 mm	Não Adequado	44%
150 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	49%
150 cm/min	6 Hz	8 mm	Não Adequado	58%
150 cm/min	7 Hz	8 mm	Não Adequado	65%
150 cm/min	8 Hz	8 mm	Adequado	72%
			Adequado	
180 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	43%
180 cm/min	6 Hz	8 mm	Não Adequado	52%
180 cm/min	7 Hz	8 mm	Não Adequado	60%
180 cm/min	8 Hz	8 mm	Adequado	67%
200 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	38%
200 cm/min	6 Hz	8 mm	Adequado	48%
200 cm/min	7 Hz	8 mm	Adequado	57%
200 cm/min	8 Hz	8 mm	Não Adequado	64%

Dando continuidade as avaliações, a Tabela 5.26 apresenta os resultados adequados e não adequados de cada ensaio com a equivalente relação matemática entre as velocidades máxima e mínima da tocha de soldagem.

Tabela 5.26: Resultados adequados e não adequados da aplicação *switch back* em juntas de aresta para avaliar a relação entre velocidade máxima de avanço e velocidade máxima de reversão.

Velocidade	Frequência	Amplitude	Resultado	Va [cm/min]	Vr [cm/min]	Va/Vr
150 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	531,70	213,70	2,49
150 cm/min	6 Hz	4 mm	Não Adequado	638,60	338,60	1,89
150 cm/min	7 Hz	4 mm	Adequado	766,20	446,20	1,72
150 cm/min	8 Hz	4 mm	Adequado	922,10	622,10	1,48
180 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	561,70	201,70	2,78
180 cm/min	6 Hz	4 mm	Adequado	668,60	308,60	2,17
180 cm/min	7 Hz	4 mm	Não Adequado	796,20	436,20	1,83
180 cm/min	8 Hz	4 mm	Não Adequado	952,10	592,10	1,61
200 cm/min	5 Hz	4 mm	Não Adequado	581,70	181,70	3,20
200 cm/min	6 Hz	4 mm	Adequado	688,60	288,60	2,39
200 cm/min	7 Hz	4 mm	Adequado	816,20	416,20	1,96
200 cm/min	8 Hz	4 mm	Não Adequado	972,10	572,10	1,70
150 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	826,70	526,70	1,57
150 cm/min	6 Hz	8 mm	Não Adequado	1020,80	720,80	1,42
150 cm/min	7 Hz	8 mm	Não Adequado	1265,00	965,00	1,31
150 cm/min	8 Hz	8 mm	Adequado	1573,50	1273,50	1,24
180 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	856,70	496,70	1,72
180 cm/min	6 Hz	8 mm	Não Adequado	1050,80	690,80	1,52
180 cm/min	7 Hz	8 mm	Não Adequado	1245,00	935,00	1,33
180 cm/min	8 Hz	8 mm	Adequado	1603,50	1243,50	1,29
200 cm/min	5 Hz	8 mm	Não Adequado	876,70	476,70	1,84
200 cm/min	6 Hz	8 mm	Adequado	1070,80	670,80	1,60
200 cm/min	7 Hz	8 mm	Adequado	1315,00	915,00	1,44
200 cm/min	8 Hz	8 mm	Não Adequado	1623,50	1223,50	1,33

Quanto à relação entre as velocidades máxima (Va) e mínima (Vr), se apresentarmos os valores que estão relacionados a bons cordões de solda em ordem crescente têm-se as seguintes relações: 1,24; 1,29; 1,44; 1,48; 1,60; 1,64; 1,96; 2,17; 2,39. Ao analisarmos esses valores percebe-se que não existe nenhum número na matriz de ensaio que contemple um valor menor que 1,24 e, apenas um valor é maior que 2,39 que é 3,20. Isso significa que os bons resultados dos cordões de solda estão distribuídos ao longo de toda a faixa da matriz de ensaios e não existe uma faixa ou um valor específico que possa fundamentar que naquela condição específica ocorrerá uma solda sem defeitos. Portanto, esse trabalho não conseguiu encontrar nenhuma correlação matemática entre as velocidades máxima e mínima da tocha de

soldagem com o propósito de encontrar valores que identificassem que quais situações seriam possíveis obter soldas com alto padrão de qualidade.

Já para às macrografias, realizou-se apenas em juntas de aresta com *gap* de 1 mm. As macrografias não foram realizadas em juntas de topo, pois nesse caso, o objetivo era conseguir uma penetração total da junta e esse quesito fica bastante visível quando da sua ocorrência, não se fazendo necessárias análises desse aspecto. Já para as juntas de aresta sem *gap*, este tipo de junta foi considerada idealizada, ou seja, afastada de uma aplicação industrial de soldagem e, portanto também não se realizou tal ensaio.

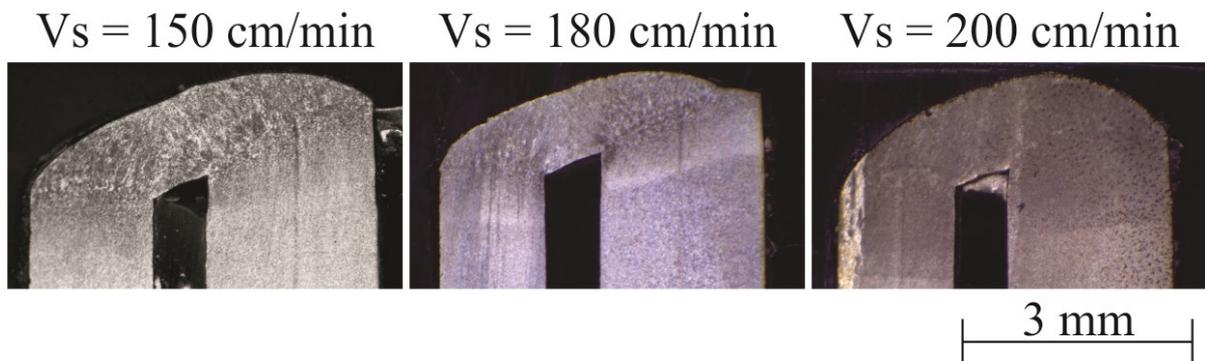
Retomando-se o raciocínio, no que diz respeito às juntas de aresta com *gap* de 1 mm ao centro, os cortes foram realizados na posição 160 mm. Escolheu-se essa posição para o corte, em virtude do posicionamento do arame de 1 mm de diâmetro que está situado no centro do corpo de prova, ou seja na posição 150 mm, uma vez que o comprimento do corpo de prova é de 300 mm. Realizou-se apenas uma medição para cada corpo de prova selecionado. Os corpos de prova selecionados para os ensaios correspondem aos parâmetros descritos na Tabela 5.27. Decidiram-se por escolher estes corpos de prova em função da mínima e máxima frequências e amplitudes utilizadas nos ensaios aplicadas as três velocidades de soldagem. O objetivo das análises das macrografias foi obter a medição do valor da área fundida, uma vez que se entende que esse parâmetro determina a resistência mecânica da junta soldada. A Tabela 5.27 apresenta as variáveis e seus respectivos patamares para os ensaios realizados com o modo convencional em comparação com os executados com a técnica *switch back*, enfatizando o resultado da área fundida.

As figuras Figura 5.49, Figura 5.50, Figura 5.51 e Figura 5.52 representam, respectivamente, as imagens das macrografias obtidas com a soldagem convencional para as três velocidades ensaiadas, as macrografias para a soldagem com a técnica *switch back* para uma V_s de 150 cm/min, 180 cm/min e 200 cm/min. A discussão desses resultados será abordado de maneira conjunta, ao invés de separadamente para cada figura.

Tabela 5.27: Valores medidos das áreas fundidas para a soldagem TIG autógena em modo convencional e para a aplicação da técnica *switch back*.

Convencional				
Velocidade de Soldagem [cm/min]	Corrente Elétrica [A]	Área Fundida [mm ²]		
150	330	6,783		
180	340	6,481		
200	360	6,478		
Switch Back				
Velocidade de Soldagem [cm/min]	Corrente Elétrica [A]	Frequência [Hz]	Amplitude [mm]	Área Fundida [mm ²]
150	330	5	4	6,893
150	330	5	8	6,978
150	330	8	4	5,734
150	330	8	8	6,687
180	340	5	4	5,143
180	340	5	8	6,019
180	340	8	4	4,125
180	340	8	8	4,341
200	360	5	4	5,41
200	360	5	8	5,791
200	360	8	4	4,369
200	360	8	8	5,149

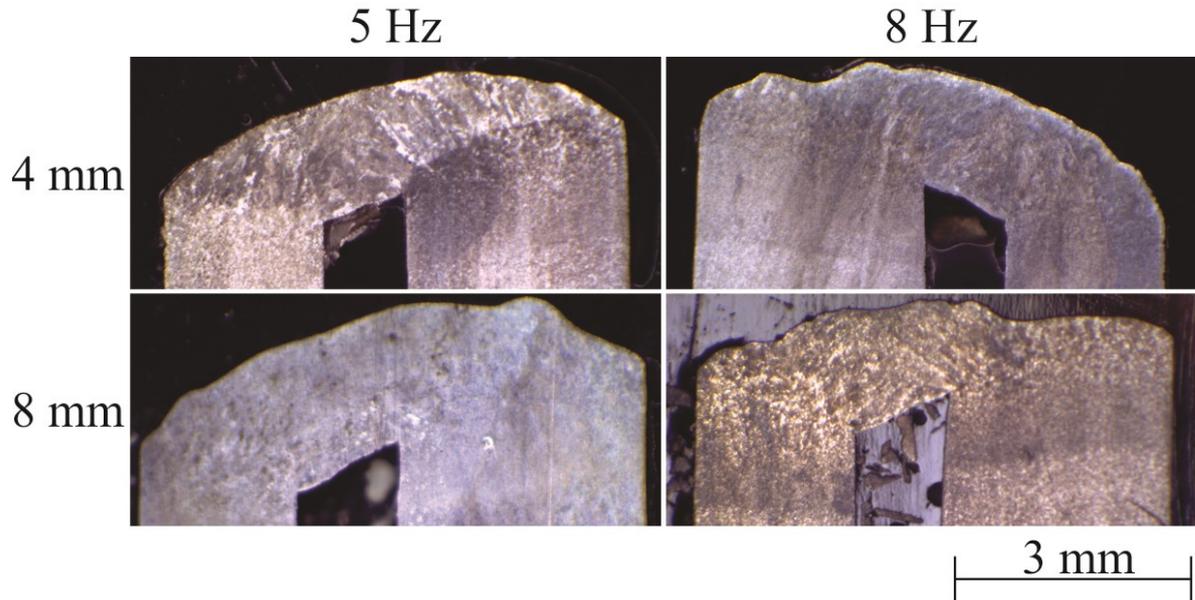
Figura 5.49 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena em modo convencional para as velocidades de 150, 180 e 200 cm/min em junta de aresta com gap de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.50 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back*, para a velocidade de 150 cm/min em junta de aresta com gap de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.

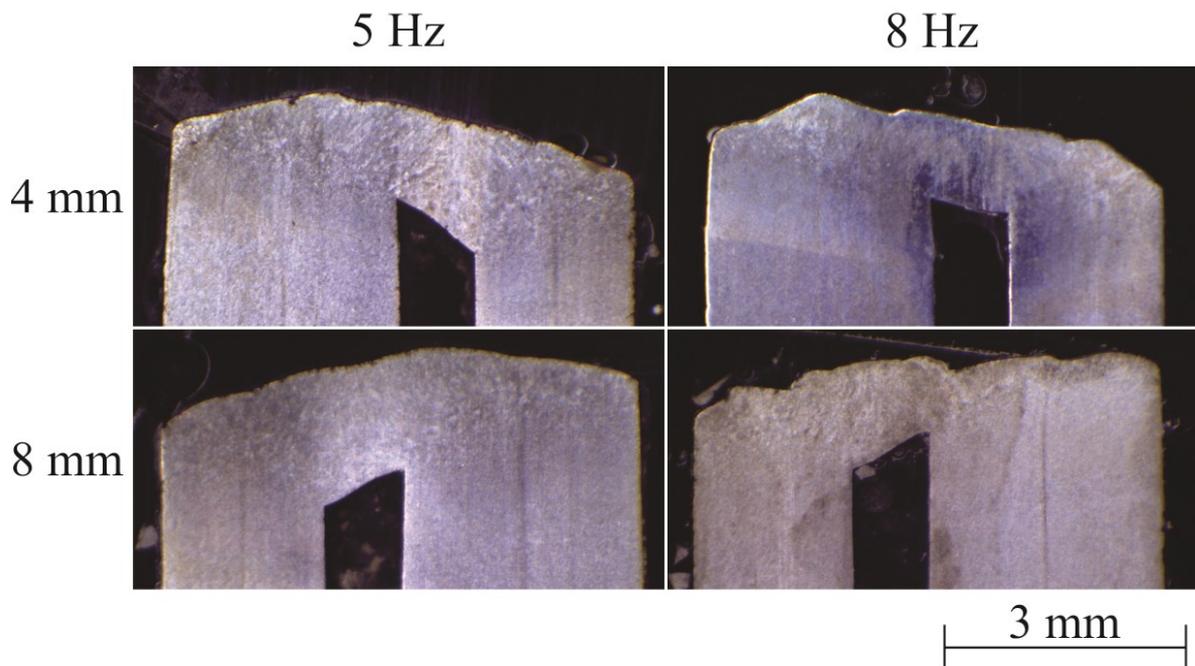
$$V_s = 150 \text{ cm/min}$$



Fonte: o próprio autor.

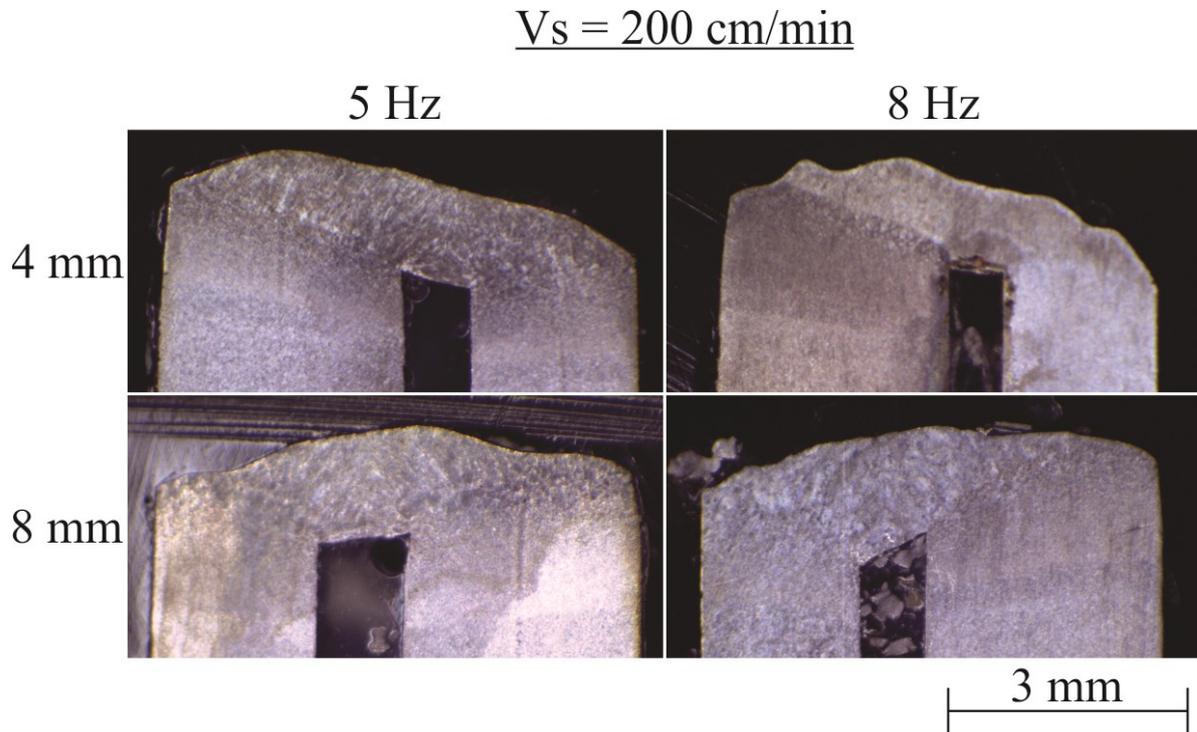
Figura 5.51 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back*, para a velocidade de 180 cm/min em junta de aresta com gap de 1 mm. A soldagem foi realizada na posição horizontal.

$$V_s = 180 \text{ cm/min}$$



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.52 - Imagem das macrografias obtidas na soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back*, para a velocidade de 200 cm/min em junta de aresta com gap de 1 mm.



Fonte: o próprio autor.

Esperava-se que para a velocidade de 150 cm/min com a aplicação da técnica *switch back*, todos os patamares de área fundida resultassem em um valor menor do que o obtido pelo modo convencional. Pela medição realizada das áreas fundidas para a referida velocidade, somente os resultados com a frequência de 8 Hz apresentaram valores menores que o modo convencional. Atribui-se o sucedido da área fundida do ensaio com 5 Hz e 4 mm ser maior que o valor do modo convencional ao fato de que se observarmos o gráfico da largura (Figura 5.6) nos ensaios de caracterização do *switch back*, pode-se notar que para esta condição a largura resultou em um valor maior que a soldagem em modo convencional, acredita-se que como para esta condição a largura é maior isso faz com que haja maior área fundida e que talvez o efeito da redução da penetração para esta frequência não seja tão significativa. Além do mais a largura do cordão pode ter sido aumentada ainda mais pela presença do micro tecimento já descrito anteriormente.

O mesmo aumento de área fundida com aplicação do *switch back* em relação ao modo convencional, para a V_s de 150 cm/min, foi notado com a configuração de 5 Hz e 8 mm. Inclusive este, produziu área fundida maior quando comparado ao ensaio com a configuração de 5 Hz e 4 mm. É possível que com o alongamento da poça de fusão, fruto do aumento da amplitude, tenha-se conseguido uma área fundida maior. Este resultado valoriza o

procedimento estatístico que demonstra que a amplitude tem um efeito forte sobre a área fundida enquanto que a frequência apresenta pouca influência. Mesmo assim a área fundida diminui consideravelmente com o incremento da frequência, isso possivelmente ocorre porque a redução da penetração é bastante significativa o que resulta em uma área fundida menor.

Já com relação aos resultados dos ensaios obtidos com a velocidade de 180 cm/min, verifica-se que de 150 cm/min para 180 cm/min ocorre um incremento de 20% na velocidade de soldagem, enquanto que de 330 A para 340 A ocorreu um incremento de apenas 3% na corrente elétrica. Essa informação ajuda a esclarecer porque os valores das áreas fundidas para uma V_s de 180 cm/min apresentaram patamares ligeiramente menores do que os obtidos com 150 cm/min. Em outras palavras, a energia de soldagem é bem menor. Este fenômeno também explica o porquê os resultados da área fundida obtidos com a V_s de 200 cm/min estão próximos dos valores das áreas fundidas conseguidos com a V_s de 180 cm/min. Quando aumenta-se a V_s de 180 cm/min para 200 cm/min, tem-se um incremento de 11%, enquanto que o incremento de 340 A para 360 A é de 6%.

Nota-se que também para as velocidades de 180 e 200 cm/min quando incrementada o valor da amplitude para uma mesma frequência, ocorreu aumento da área fundida pelas razões já abordadas.

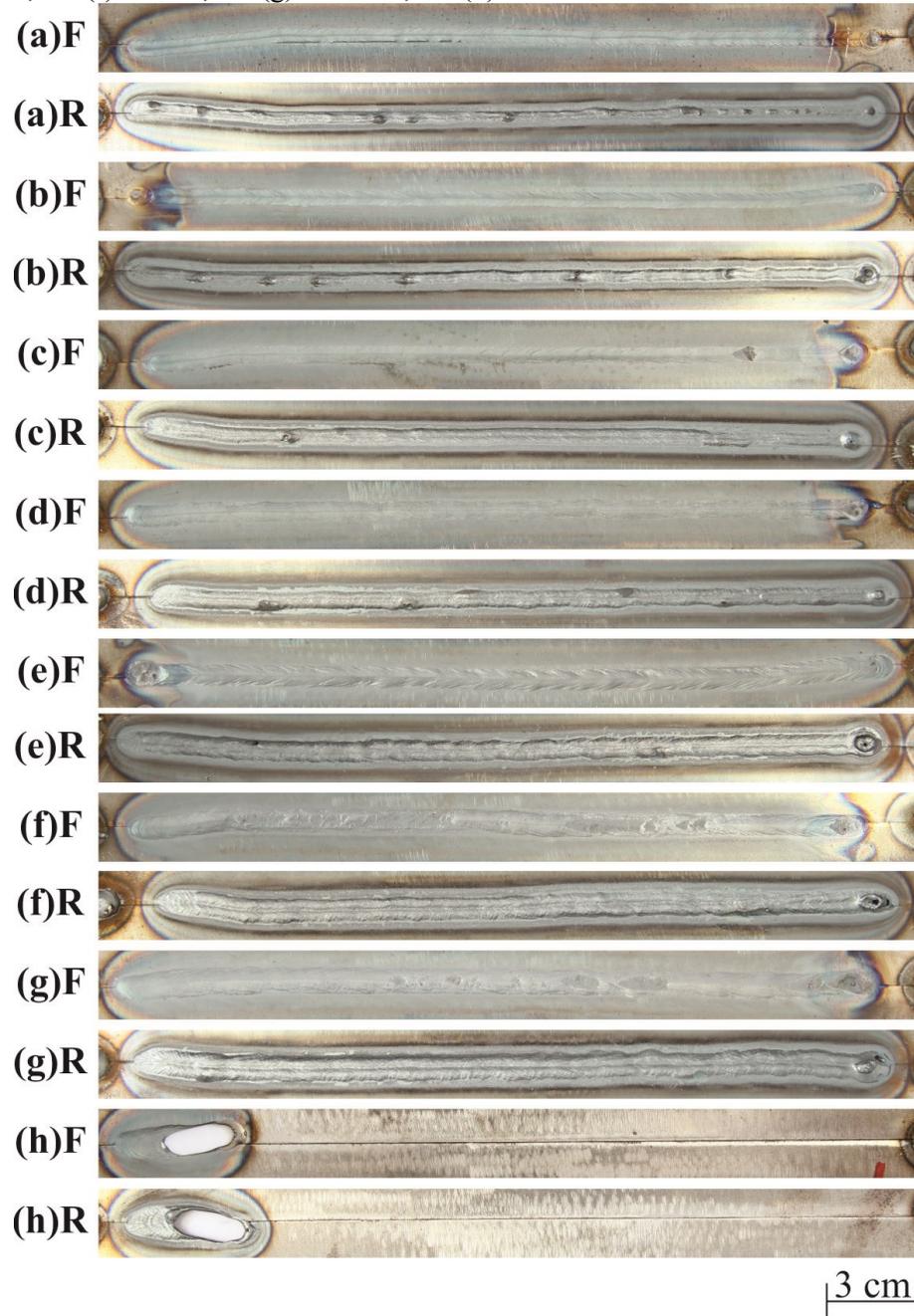
5.5 ENSAIOS EM JUNTA DE TOPO

5.5.1 Soldagem em chapa de espessura 2 mm

Realizaram-se os ensaios com o modo autógeno convencional, buscando-se encontrar um valor compatível de corrente para uma V_s de 20 cm/min. Nesta velocidade a corrente foi variada de 90 a 160 A. Com o primeiro valor de corrente de 90 A não houve penetração total e a raiz fundiu parcialmente, além, apresentou desvio na trajetória do arco não realizando uma soldagem regular do cordão (Figura 5.53 (a)). Para a corrente de 100 A ocorreu uma solda com bom aspecto superficial e, embora se obtivesse uma penetração total com boa fusão da raiz a mesma não se mostrou regular na largura (Figura 5.53 (b)). Já para a corrente de 110 A, ocorreu um ponto de solidificação de impurezas ao final do cordão e quanto à raiz houve penetração total com boa regularidade na largura, porém os 40 mm iniciais apresentou altura de reforço menor que o restante da solda (Figura 5.53 (c)). Os melhores resultados na velocidade de 20 cm/min foram alcançados com as correntes de 120 e

130 A, onde se obteve um cordão de bom acabamento superficial, penetração total e fusão bastante regular, sendo que como esperado, a altura do reforço da raiz para a corrente de 130 A (Figura 5.53 (e)) foi maior do que com 120 A (Figura 5.53 (d)). Quando se aumentou a corrente para 140 A (Figura 5.53 (f)) e 150 A (Figura 5.53 (g)) os cordões apresentaram um acabamento superficial com solidificação de impurezas na superfície. Embora ambos alcançaram penetração total sem *burn through*, no cordão com 140 A não houve linearidade na trajetória e a raiz do cordão de 150 A apresentou mordeduras bastante acentuadas. Por fim, com 160 A (Figura 5.53 (h)) o corpo de prova furou a partir dos 20 mm iniciais da chapa, sendo este o limite de corrente para esta velocidade.

Figura 5.53 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 20$ cm/min. Em (a): 90 A, em (b): 100 A, em (c): 110 A, em (d): 120 A, em (e): 130 A, em (f): 140 A, em (g): 150 A e; em (h): 160 A.



Fonte: o próprio autor.

Seguindo-se os testes para a velocidade de 30 cm/min com a corrente de 160 A (Figura 5.54 (a)), a mesma que perfurou o corpo de prova a 20 cm/min, foi possível obter um cordão com bom aspecto superficial apesar da solidificação de dois pequenos pontos de impureza na face. Quanto à raiz obteve-se penetração total com fusão regular, porém apresentou solidificação de pontos de cratera na raiz. Para as correntes de 170 A (Figura 5.54 (b)) e 180 A (Figura 5.54 (c)) ocorreram cordões com solidificação de impurezas na face,

sendo mais acentuado com a corrente de 180 A. Em contrapartida apresentaram boa penetração e uma fusão da raiz bastante homogênea e sem defeitos, também a altura do reforço ficou regular. Com 190 A de corrente o ensaio alcançou seu limite (Figura 5.54 (d)), furando a chapa. Considera-se o teste realizado com a corrente em 170 A o melhor resultado para esta velocidade.

Figura 5.54 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 30$ cm/min. Em (a): 160 A, em (b): 170 A, em (c): 180 A e; em (d): 190 A.



Fonte: o próprio autor.

Na sequência, a velocidade de soldagem foi aumentada para 40 cm/min, onde novamente empregou-se a corrente que furou a chapa no ensaio da velocidade anterior. Para os 190 A (Figura 5.55 (a)) ocorreu solidificação de impurezas na face do cordão, embora conseguiu-se penetração total com fusão da raiz e altura do reforço bastante regulares, aparentemente apresentou falta de fusão numa pequena região na lateral do passe de raiz. Para a corrente de 200 A (Figura 5.55 (b)), a solda apresentou boa fusão da raiz com bastante regularidade da altura do reforço, sendo este o melhor resultado encontrado, embora também

tenha ocorrido uma pequena cratera ao final da solda. Já para a corrente de 210 A (Figura 5.55 (c)) ocorreu perfuração da chapa da metade para o fim da solda. Mesmo apresentando defeitos o melhor resultado para esta velocidade foi com o patamar de corrente em 200 A.

Figura 5.55 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 40$ cm/min. Em (a): 190 A, em (b): 200 A e; em (c): 210 A.



Fonte: o próprio autor.

Dando continuidade aos ensaios, aplicou-se a corrente de 210 A para velocidade de 50 cm/min. Nesta situação, (Figura 5.56 (a)) o acabamento superficial também solidificou com pequena quantidade de óxidos, a penetração e a fusão foram bastante regulares, no entanto, apresentou um ponto de falta de fusão com cratera na raiz e ao final do cordão a chapa foi perfurada. Não foi possível obter resultados bons resultados para velocidades maiores de soldagem, tentou-se ainda realizar ensaios com V_s de 60 cm/min e 70 cm/min, porém em ambos os casos ocorreram falta de fusão ou perfurações.

Figura 5.56 - Imagem da Face e Raiz do cordão de solda realizado com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 50$ cm/min. Em (a): 210 A.



Fonte: o próprio autor.

Aos ensaios seguintes, aplicou-se a técnica *switch back* para verificar a viabilidade de alcançar cordões de melhor qualidade e com velocidades mais altas.

Os ensaios iniciaram-se com a V_s de 20 cm/min e corrente de 150 A (Figura 5.56). As frequências empregadas, como dito anteriormente, foram de 5 a 8 Hz, todas para uma amplitude de 8 mm.

Observando-se a Figura 5.57, verifica-se que para todas as frequências utilizadas foi possível obter bons resultados dos cordões de solda, sem presença de *burn through*. Também se observa em comparação com a soldagem no modo convencional que, desapareceram os pontos de cratera na raiz da do cordão. Pontos esses de falta de fusão, onde são solidificados acúmulos de óxidos. Outro aspecto que melhorou foi a quase inexistência de mordeduras na raiz dos cordões. Apenas o ensaio com 7 Hz produziu mordeduras nos primeiros 60 mm do cordão (Figura 5.57 (c)). A raiz de todos os cordões apresentou uma largura uniforme e uma fusão bem distribuída do início ao fim das soldas. E por último, mas não menos importante, o acabamento superficial dos cordões apresentou melhora considerável, não apresentando solidificação de óxidos em suas superfícies.

Outro aspecto que se faz necessário mencionar é que, como não há adição de material na soldagem e, para que se consiga uma raiz com penetração total e boa espessura o material da superfície tende a ser empurrado pelo arco para baixo. Isso implica que as mordeduras ocorram na superfície, porém, observou-se que elas diminuem com a aplicação da técnica *switch back* em comparação ao modo convencional.

A Tabela 5.28 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 20 cm/min.

Tabela 5.28: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma V_s de 20 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
20	150	8	7,18	5	91	696,7	-656,7	7,5	6,8
20	150	8	7,70	6	93	890,8	-850,8	8,0	7,4
20	150	8	8,45	7	95	1135,0	-1095,0	8,7	8,2
20	150	8	9,44	8	96	1443,5	-1403,5	9,6	9,2

Figura 5.57 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do *switch back* para uma $V_s = 20$ cm/min e $I_m = 150$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Após os ensaios realizados com a V_s de 20 cm/min, seguiram-se os testes para uma V_s de 30 cm/min com corrente média de 180 A (Figura 5.58). Observando-se as imagens, verifica-se que o ensaio realizado com 5 Hz (Figura 5.58 (a)) apresentou bom aspecto quanto ao acabamento superficial, possuindo apenas um pequeno ponto de solidificação de óxidos a 250 mm do início do cordão. Porém, quanto a raiz, cerca de 60 mm da região central apresentou um pouco de mordeduras e o cordão destoou um pouco quanto a largura da raiz quando comparado as regiões iniciais e finais da solda. Na sequência, o cordão obtido com 6

Hz de frequência foi o que apresentou melhor resultado (Figura 5.58 (b)), possuindo um acabamento superficial sem solidificação de óxidos e uma penetração e largura bastante regulares do início ao fim da solda. Percebe-se com clareza que, o cordão realizado com 7 Hz (Figura 5.58 (c)) vinha demonstrando a mesma regularidade do seu antecessor, porém com 60 mm de soldagem ocorreu perfuração do mesmo. Atribui-se o fato do cordão com 7 Hz ter perfurado a questão do movimento vertical de vibração do conjunto sistema de oscilação mais o manipulador. A 7 Hz de frequência a variação da DEP é de 0,37 mm, representando 12,57% da DEP de 3 mm regulada. Os cálculos foram obtidos pela equação da Figura 5.57. Em consequência da perfuração ocorrida com 7 Hz, não deu-se seguimento realizando o ensaio para frequência de 8 Hz. Considera-se, portanto, o ensaio realizado com a frequência de 6 Hz o melhor resultado obtido para a velocidade de 30 cm/min.

A Tabela 5.29 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma Vs de 30 cm/min.

Tabela 5.29: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma Vs de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

Vs [cm/min]	Im [A]	Aa [mm]	Ar [mm]	f [Hz]	S [%]	Vmax [cm/min]	Vmin [cm/min]	Da [mm]	Dr [mm]
30	180	8	7,18	5	87	706,7	-646,7	7,7	6,7
30	180	8	7,70	6	90	900,8	-840,8	8,1	7,3
30	180	8	8,45	7	92	1145,0	-1085,0	8,8	8,1
30	180	8	9,44	8	94	1453,5	-1393,5	9,8	9,1

Figura 5.58 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do *switch back* para uma $V_s = 30$ cm/min e $I_m = 180$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz e; em (c): $f = 7$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Posteriormente, para uma V_s de 40 cm/min, nessa condição a corrente elétrica utilizada foi de 200 A (Figura 5.59). Para o ensaio com 5 Hz (Figura 5.59 (a)) o cordão apresentou bom aspecto superficial e a raiz demonstrou bastante regularidade na largura e penetração em todo comprimento. Já para a frequência de 6 Hz (Figura 5.59 (b)), ocorreu solidificação de impurezas na posição 50 mm e 250 mm a contar do início da solda. Quanto a raiz o cordão apresentou uma leve redução de largura nos últimos 30 mm, porém, analisando o corpo de prova constatou-se se tratar de uma descontinuidade e não de um defeito. Os cordões obtidos com 7 Hz (Figura 5.59 (c)) e 8 Hz (Figura 5.59 (d)) demonstraram bons acabamentos superficiais, diferenciando-se apenas na formação da raiz. Enquanto que para a frequência de 7 Hz a raiz apresentou regularidade quanto a penetração e largura, a raiz conseguida com o cordão de 8 Hz demonstrou pequenos pontos de solidificação de óxidos que, conseqüentemente, geram falta de fusão nas bordas das chapas. Esses pontos de solidificação de óxidos encontram-se nas posições 35 mm, 70 mm, 80 mm e 250 mm a contar do início da solda. Além dos aspectos mencionados o cordão de 8 Hz perfurou a chapa no desligamento do arco. Considera-se para fins de qualidade os melhores resultados àqueles obtidos com as frequências de 5 Hz e 7 Hz.

Outro ponto a destacar, é que se constatou que com o aumento na velocidade de soldagem a largura da raiz diminuiu circunstancialmente. A Tabela 5.30 apresenta os

parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 40 cm/min.

Tabela 5.30: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma V_s de 40 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
40	200	8	7,18	5	83	716,7	-636,7	7,9	6,5
40	200	8	7,70	6	87	910,8	-830,8	8,3	7,2
40	200	8	8,45	7	89	1155,0	-1705,0	8,9	8,0
40	200	8	9,44	8	92	1463,5	-1383,5	9,9	9,0

Figura 5.59 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do *switch back* para uma $V_s = 40$ cm/min e $I_m = 200$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Após os ensaios realizados com a V_s de 40 cm/min, fez-se os testes com a V_s de 50 cm/min para a corrente de 210 A (Figura 5.60). Nestes ensaios as soldas realizadas com 5 Hz (Figura 5.60 (a)), 6 Hz (Figura 5.60 (b)) e 7 Hz (Figura 5.60 (c)), apresentaram bom acabamento superficial, somente aparecendo poucas solidificações de óxidos ao final dos cordões com 6 Hz e 7 Hz. Quanto ao aspecto da raiz, todos apresentaram solidificação de

óxidos distribuídos ao longo do cordão. Quanto a penetração e largura os cordões apresentaram boa regularidade. A presença de óxidos é atribuída ao próprio material (aço SAE 1020), que por ser de utilização laboratorial não possui alto controle de qualidade com relação aos aspectos quantitativos dos elementos químicos que compõem o aço e também quanto ao grau de pureza. Já o ensaio com a frequência de 8 Hz (Figura 5.60 (d)), produziu fusão da raiz somente a partir dos 220 mm a contar do início da chapa. O cordão analisado na superfície também apresentou redução na largura, mostrando extremamente fino. Possivelmente como as chapas já estavam muito quentes, ao final do cordão de solda no desligamento do arco ocorreu a perfuração das mesmas.

A Tabela 5.31 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 50 cm/min.

Tabela 5.31: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma V_s de 50 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
50	210	8	7,18	5	79	726,7	-626,7	8,0	6,4
50	210	8	7,70	6	83	920,8	-820,8	8,4	7,0
50	210	8	8,45	7	87	1165,0	-1065,0	9,1	7,9
50	210	8	9,44	8	90	1473,5	-1373,5	10,0	8,9

Figura 5.60 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do *switch back* para uma $V_s = 50$ cm/min e $I_m = 210$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

E por fim, tentou-se realizar os ensaios para uma V_s de 60 cm/min com uma corrente de 240 A (Figura 5.61). Nessa condição as soldas foram realizadas apenas para as frequências de 5 Hz (Figura 5.61 (a)) e 6 Hz (Figura 5.61 (b)). Isso porque, nessas mesmas condições já houve perfurações nas chapas e o resultado obtido com a frequência de 6 Hz não repetiu. Na condição com 5 Hz ocorreu solidificação de óxidos na superfície do cordão e na condição com 6 Hz nos últimos 60 mm do cordão ocorreu mordedura na face do cordão, não apresentando uma fusão adequada das bordas. As raízes, em ambos os casos apresentaram solidificação de impurezas. A Tabela 5.32 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 60 cm/min.

Tabela 5.32: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 2 mm de espessura, uma V_s de 60 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
60	240	8	7,18	5	76	736,7	-616,7	8,2	6,2
60	240	8	7,70	6	81	930,8	-810,8	8,6	6,9
60	240	8	8,45	7	84	1175,0	-1055,0	9,2	7,7
60	240	8	9,44	8	88	1483,5	-1363,5	10,1	8,8

Figura 5.61 - Imagens das superfícies e raízes dos cordões de solda obtidos pelo processo TIG autógeno com aplicação do *switch back* para uma $V_s = 60$ cm/min e $I_m = 240$ A em chapa de 2 mm de espessura. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (b1): repetição do ensaio com $f = 6$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

O ganho de produtividade na soldagem dos corpos de prova de junta de topo com espessura de 2mm, dado pelo acréscimo da velocidade de soldagem, foi de 25% a mais para os ensaios com o *switch back* em relação aos mesmos ensaios realizados com o modo convencional. Para o *switch back* a velocidade máxima alcançada foi de 50 cm/min, enquanto que para o modo convencional foi de 40 cm/min.

5.5.2 Soldagem em chapa de espessura 3 mm

A soldagem das juntas de topo com espessura de 3 mm iniciaram com a versão convencional do processo TIG. Foi arbitrada uma V_s de 20 cm/min e uma corrente 170 A (Figura 5.62 (a)), nessa condição, a solda apresentou aparente penetração total nos primeiros 50% de seu comprimento e, um acabamento superficial regular com solidificação de óxidos

em apenas um ponto. Com 180 A (Figura 5.62 (b)) o cordão apresentou penetração e fusão em todo o comprimento da raiz, mas em dois pontos a fusão não ocorreu de modo regular como em todo o restante. Com 190 A (Figura 5.62 (c)) ocorreu penetração total e a fusão da raiz mostrou-se bastante regular, mas o cordão apresentou mordedura nas laterais da sua face. A incidência de mordeduras aumentou conforme a corrente foi elevada para 200 A (Figura 5.62 (d)) e 210 A (Figura 5.62 (e)). Os resultados obtidos com estas últimas duas correntes foram semelhantes a aquela com a corrente de 190 A, porém com o diferencial da face do cordão ser mais côncava. Quando a corrente foi elevada para 220 A (Figura 5.62 (f)) ocorreu o *burn through*.

Figura 5.62 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 20$ cm/min. Em (a): 170 A, em (b): 180 A, em (c): 190 A, em (d): 200 A, em (e): 210 A e; em (f): 220 A.



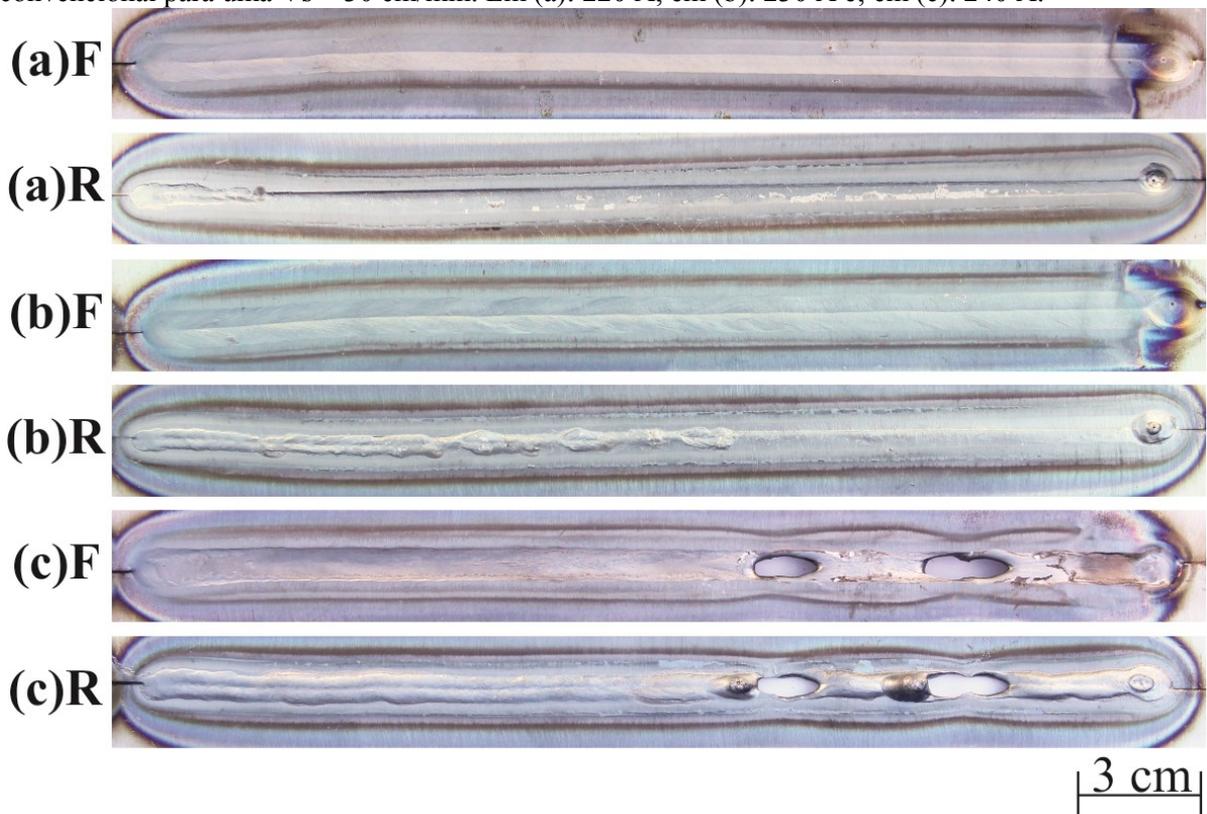
Fonte: o próprio autor.

Até este ponto, os melhores resultados obtidos no processo convencional com uma V_s de 20 cm/min tinham sido com correntes de 180 e 190 A. Com a corrente de 180 A no

começo observando-se pela face inferior, não apresentou fusão suficiente da raiz nos primeiros 20 mm. Já com 190 A de corrente ocorreu fusão completa da raiz com excelente penetração, porém o cordão na face superior apresentou mordeduras e concavidade acentuadas.

A partir desse momento, decidiu-se aumentar a velocidade de soldagem para 30 cm/min e a corrente de 220 A foi utilizada, sendo este o valor limite para a V_s de 20 cm/min onde ocorreu *burn through*. Para esta nova condição conseguiu-se obter um cordão com bom aspecto superficial, porém não ocorreu penetração total e fusão completa e regular da raiz (Figura 5.63 (a)). Com 230 A o aspecto superficial ficou muito bom, mas ocorreu fusão em somente 60 % do cordão e, ainda assim, não apresentando regularidade na largura (Figura 5.63 (b)). Já quando utilizada uma corrente de 240 A a fusão ficou muito boa e regular, porém nos últimos 40% do comprimento do cordão ocorreu *burn through* (Figura 5.63 (c)). Portanto, considera-se que o melhor resultado obtido com a soldagem TIG no modo convencional foi com V_s de 20 cm/min e 190 A de corrente elétrica.

Figura 5.63 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 30$ cm/min. Em (a): 220 A, em (b): 230 A e; em (c): 240 A.

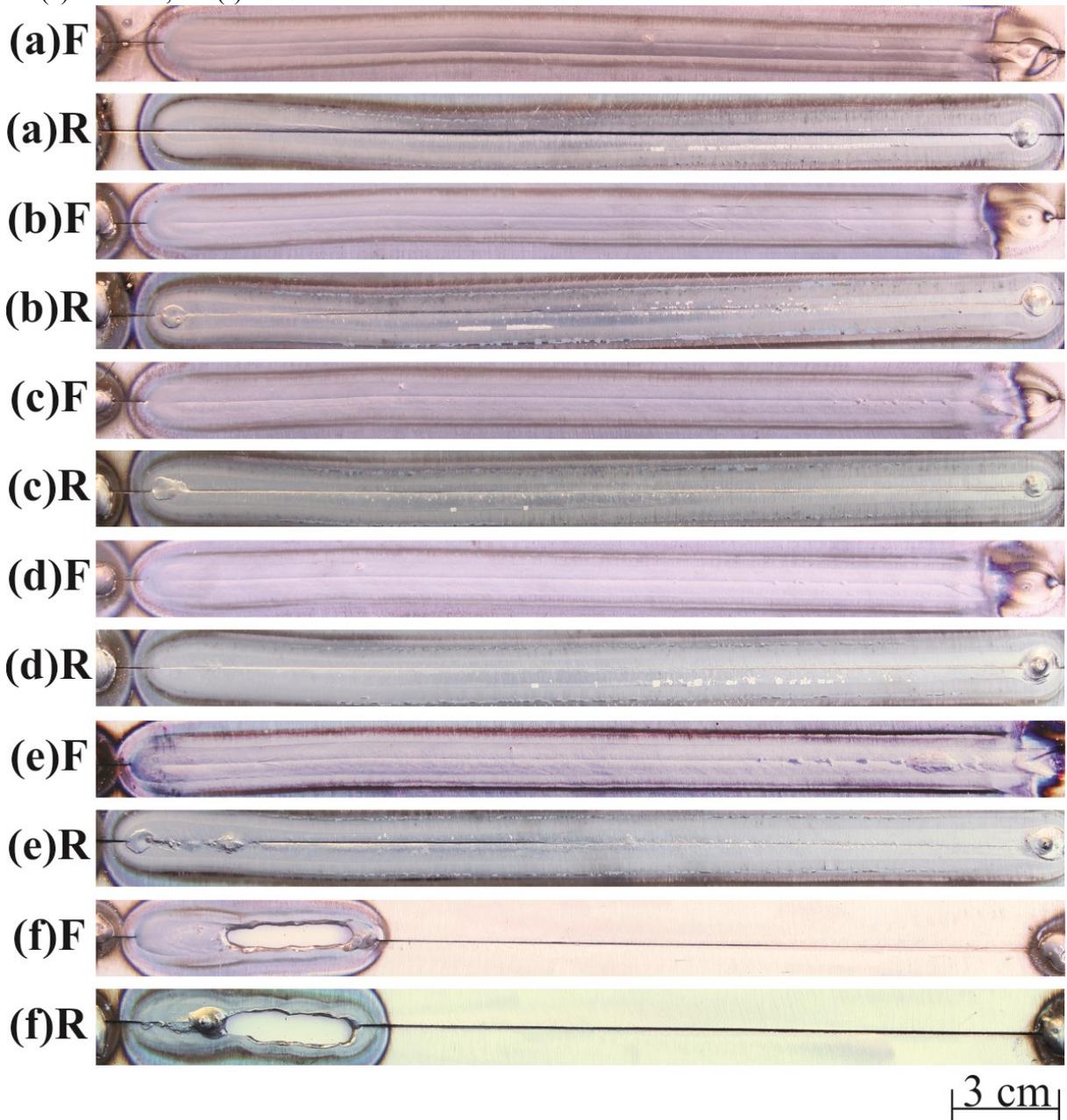


Fonte: o próprio autor.

Buscou-se realizar ensaios com uma V_s de 40 cm/min com a corrente de 240 A, pois acreditava-se que aumentando a V_s de 30 cm/min para 40 cm/min não ocorreria perfuração das chapas e seria possível obter uma boa solda.

Os resultados obtidos com a V_s de 40 cm/min (Figura 5.64), mostraram melhora significativa com relação a solidificação de impurezas na superfície do cordão. Embora isso tenha ocorrido, em nenhuma das correntes utilizadas, que foram variadas de 240 a 290 A, conseguiu-se penetração total e fusão da raiz.

Figura 5.64 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno convencional para uma $V_s = 40$ cm/min. Em (a): 240 A, em (b): 250 A, em (c): 260 A, em (d): 270 A, em (e): 280 A e; em (f): 290 A.



Fonte: o próprio autor.

Após realizarem-se as soldas com o modo convencional fez-se as mesmas com a aplicação da técnica *switch back*. Os ensaios com a técnica *switch back* foram aplicados para as mesmas velocidades e com os valores de corrente elétrica que apresentaram melhores resultados para as suas respectivas velocidades, quando se fez os ensaios com o modo convencional. A Tabela 5.33 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 20 cm/min.

Embora, os ensaios realizados com as correntes de 190 e 200 A tenham apresentado bons resultados para o modo convencional, decidiu-se utilizar a corrente de 190 A para o modo *switch* porque nesse patamar, a mesma produziu mordeduras menos acentuadas.

Tabela 5.33: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma V_s de 20 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
20	190	8	7,18	5	91	696,7	-656,7	7,5	6,8
20	190	8	7,70	6	93	890,8	-850,8	8,0	7,4
20	190	8	8,45	7	95	1135,0	-1095,0	8,7	8,2
20	190	8	9,44	8	96	1443,5	-1403,5	9,6	9,2

O cordão que se aplicou a frequência de 5 Hz (Figura 5.65 (a)), apresentou um bom acabamento superficial e uma boa penetração com regularidade na largura. O cordão com 6 Hz (Figura 5.65 (b)), por outro lado, demonstrou uma solidificação de óxidos na superfície mais bem distribuída, ou seja, não pontual. Quanto a raiz a penetração foi bastante regular, porém a largura do cordão alterou-se na região de 30 a 90 mm onde foi maior que no restante do cordão e, partir dos 120 mm a raiz apresentou pontos de mordeduras. E, no que se refere aos cordões com 7 Hz (Figura 5.65 (c)) e 8 Hz (Figura 5.65 (d)), os mesmos apresentaram solidificação de impurezas na superfície, porém as raízes demonstram uma penetração total com bastante regularidade e com ausência de mordeduras, especialmente a produzida com 8 Hz.

Figura 5.65 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica *switch back* para uma $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 190$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Na sequência, os ensaios foram realizados com a V_s de 30 cm/min para uma corrente de 230 A (Figura 5.66). Utilizou-se esta corrente porque foi possível conseguir uma penetração parcial do cordão sem perfurar o corpo de prova. A Tabela 5.34 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 30 cm/min.

Tabela 5.34: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma V_s de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
30	230	8	7,18	5	87	706,7	-646,7	7,7	6,7
30	230	8	7,70	6	90	900,8	-840,8	8,1	7,3
30	230	8	8,45	7	92	1145,0	-1085,0	8,8	8,1
30	230	8	9,44	8	94	1453,5	-1393,5	9,8	9,1

Figura 5.66 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica *switch back* para uma $V_s = 30$ cm/min, $I_m = 230$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (c): $f = 7$ Hz e; em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Observando-se a superfície das soldas para as frequências de 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz e 8 Hz, verifica-se que ocorreu bom acabamento superficial em todos os casos, com ausência de solidificação de óxidos. Porém, também se percebe que a solda com 7 Hz (Figura 5.66 (c)) ocorreu mordedura nos 50% finais do cordão de solda.

Já com relação a raízes é possível destacar a uniformidade das mesmas. No ensaio com 5 Hz (Figura 5.66 (a)) houve regularidade na largura, exceto nos primeiros 30 mm onde ocorreu uma redução na largura em relação ao restante do cordão. Nos cordões com 6 Hz (Figura 5.66 (b)) e 7 Hz (Figura 5.66 (c)) ocorreram boas penetração com bastante uniformidade da largura em todo o cordão. Porém com no cordão com 7 Hz incidiu 2 pontos de solidificação de óxidos nas posições de 60 mm e 75 mm, enquanto que no cordão com 6 Hz, formou-se apenas um ponto na lateral da raiz a 120 mm. O cordão com 8 Hz (Figura 5.66 (d)) não apresentou mordedura em sua superfície e quanto a raiz a largura mostrou-se muito uniforme e estreita.

E por fim, as tentativas de alcançar maiores produtividades foram feita para uma V_s de 40 cm/min com uma corrente de 280 A. Essa corrente foi escolhida por ter sido o limite antes da perfuração do corpo de prova, que ocorreu para 290 A.

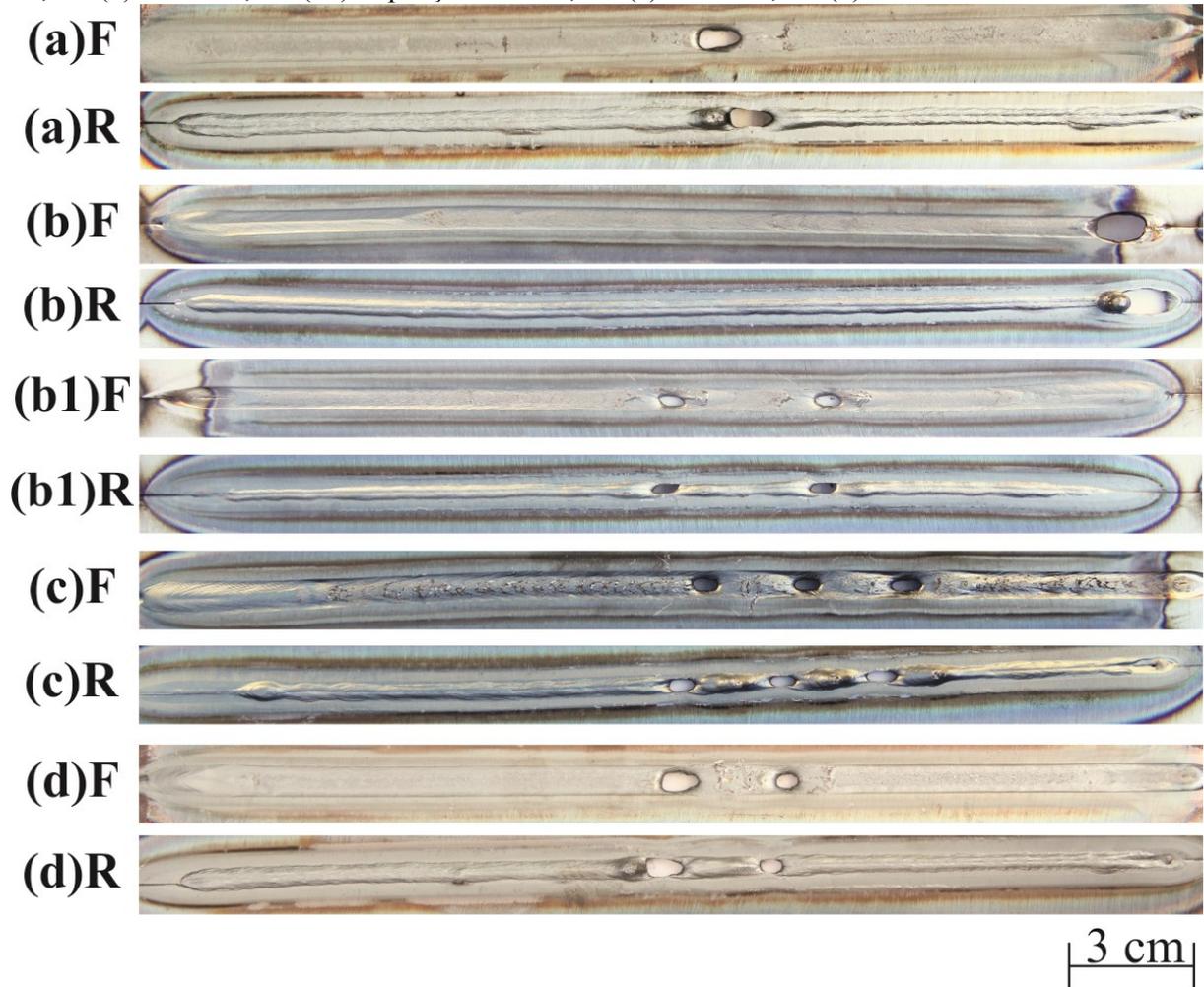
A Tabela 5.35 apresenta os parâmetros e demais dados utilizados para a realização dos ensaios, com aplicação da técnica *switch back*, para uma V_s de 40 cm/min.

Tabela 5.35: Parâmetros utilizados para realização da soldagem TIG autógena com aplicação da técnica *switch back* nas juntas de topo para um corpo de prova de 3 mm de espessura, uma V_s de 30 cm/min e variação de frequência de 5 Hz a 8 Hz com amplitude de 8 mm.

V_s [cm/min]	I_m [A]	A_a [mm]	A_r [mm]	f [Hz]	S [%]	V_{max} [cm/min]	V_{min} [cm/min]	D_a [mm]	D_r [mm]
40	280	8	7,18	5	83	716,7	-636,7	7,9	6,5
40	280	8	7,70	6	87	910,8	-830,8	8,3	7,2
40	280	8	8,45	7	89	1155,0	-1705,0	8,9	8,0
40	280	8	9,44	8	92	1463,5	-1383,5	9,9	9,0

Para a realização do primeiro ensaio, com 5 Hz (Figura 5.67 (a)), observa-se que apesar do cordão ter apresentado bom acabamento superficial, o arco perfurou o mesmo na região central. Quanto a raiz, após a perfuração a largura alterou-se profundamente, produzindo um cordão mais estreito do que antes da perfuração, no entanto ocorreu penetração total da mesma. Já para o cordão realizado com 6 Hz (Figura 5.67 (b)), observou-se um cordão com bom aspecto superficial e, com uma raiz com penetração e largura adequadas, porém ao final do cordão ocorreu uma perfuração pelo arco. Como se acreditava que essa perfuração poderia ter ocorrido por uma demora no desligamento do arco, resolveu-se tentar repetir o ensaio (Figura 5.67 (b1)), porém, o resultado foi o mesmo, apresentando duas perfurações na solda. Na sequência, esperava-se que a solda com a frequência de 7 Hz (Figura 5.67 (c)) pudesse evitar o *burn through*, no entanto, não foi possível, apresentando um cordão com solidificação de óxidos na superfície, mordedura acentuada e ter perfurações. Acreditasse que as perfurações ocorram na maior parte dos casos a partir do centro do corpo de prova em função do aquecimento das chapas. Quanto a raiz, a mesma apresentou uma penetração total com regularidade na largura do cordão. E, por fim, o ensaio com a frequência de 8 Hz (Figura 5.67 (d)), apesar de ter produzido um cordão com bom aspecto superficial produziu duas perfurações, além disso, a raiz apresentou efeito semelhante ao cordão produzido com 5 Hz, redução significativa da largura após as perfurações.

Figura 5.67 - Imagens da Face e Raiz dos cordões de solda realizados com o processo TIG autógeno com a aplicação da técnica *switch back* para uma $V_s = 40$ cm/min, $I_m = 280$ e $A = 8$ mm. Em (a): $f = 5$ Hz, em (b): $f = 6$ Hz, em (b1): repetição de 6 Hz, em (c): $f = 7$ Hz, em (d): $f = 8$ Hz.



Fonte: o próprio autor.

Não se pode afirmar que a frequência tenha diminuído a região fundida, pois o incremento da frequência faz aumentar a variação da DEP e, portanto a penetração pode ter aumentado em função do incremento da pressão do arco sobre a poça de fusão disso.

Aparentemente estranhasse que para a corrente de 280 A não produziu fusão na raiz no convencional e isso ocorreu para o *switch back*, isso levaria a crer erroneamente que o *switch back* não reduz a penetração, porém o movimento de oscilação vertical da tocha pode ter produzido esse efeito.

5.6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO ÀS JUNTAS DE ARESTA E DE TOPO.

Analisando a soldagem das chapas finas de 2 e 3 mm de espessura, em juntas de topo realizadas na posição plana, verificou-se preliminarmente que, a aplicação da técnica *switch*

back propiciou um incremento na velocidade de soldagem em relação ao modo convencional. Esse ganho representou para o corpo de prova com 2 mm de espessura um acréscimo de produtividade de 25% na velocidade de soldagem, enquanto que para o corpo de prova de 3 mm de espessura o ganho obtido representou 50% de acréscimo na velocidade de soldagem.

Quanto aos parâmetros geométricos da penetração, largura e área fundida, a avaliação é a mesma para os corpos de prova com espessura de 2 e 3 mm. Para a penetração fica bastante evidente que nas mesmas condições de velocidade de soldagem e corrente elétrica é possível obter menores penetrações para a soldagem com a aplicação da técnica *switch back* do que com o modo convencional, ou seja, observando-se as imagens dos corpos de prova soldados, verifica-se uma raiz com menor altura de reforço e com larguras mais estreitas quando comparados ao modo convencional.

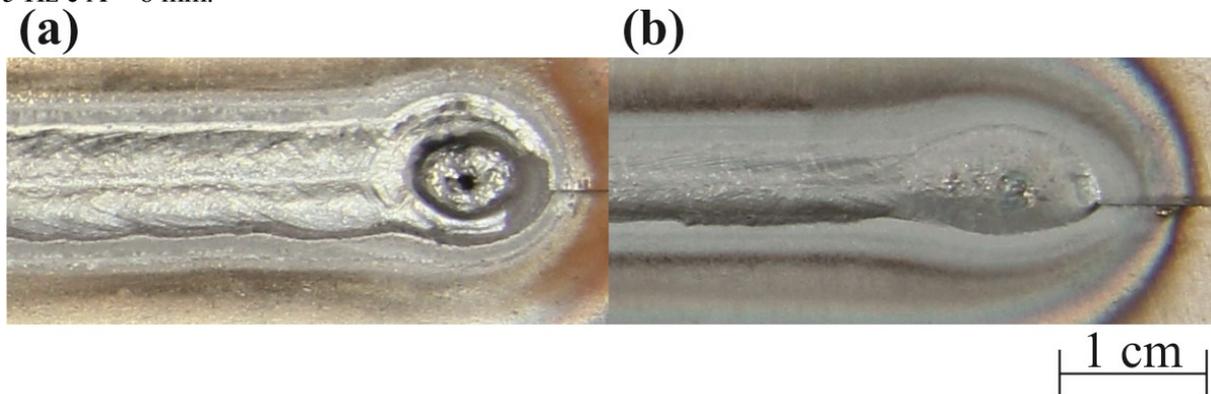
Com relação à largura dos cordões obtidos, verificou-se pelas imagens dos corpos de prova uma leve redução da largura das faces dos cordões com o acréscimo da frequência, este resultado está de acordo com os obtidos e mostrados na Figura 5.6. Já para a área fundida, pode-se concluir que se com a aplicação do *switch back* há uma redução da largura e da penetração dos corpos de prova, a área fundida conseqüentemente também diminui. Aparentemente alguns resultados mostram que a quantidade de material fundida na raiz de corpos com 5 Hz é a mesma observada nos casos com 8 Hz. Porém cabe ressaltar que ficou demonstrado pela Figura 5.30 que com o aumento dessa variável aumenta-se também a variação da DEP e, neste caso específico para 8 Hz a variação é 21,89% menor que o valor de 3 mm. Essa variação faz aumentar a pressão do arco, empurrando mais material para baixo, auxiliando na formação da raiz e fazendo com que a mesma se aproxime da quantidade de material fundido obtido com o ensaio de 5 Hz. Segundo Lancaster [15], a pressão do arco TIG estacionário para uma condição de 200 A de corrente, DEP de 3 mm, gás de processo argônio com vazão de 15 l/min é de 16gf/cm².

Dessa forma, fica bastante evidente que a vibração produzida pelo sistema de oscilação mais manipulador, interferiu nos resultados obtidos. Acredita-se que seria possível obter maiores velocidade de soldagem se essas vibrações fossem eliminadas. Por essa razão, o referido trabalho entende serem necessários novos investimentos para evoluir o projeto dos equipamentos mencionados, a fim de obter-se maior rigidez e robustez dos mesmos.

Um aspecto importante de ser mencionado para a soldagem dos corpos de prova nessa condição é quanto ao fechamento do arco. Observou-se que, ao final do cordão de solda no lado da raiz surge uma cratera na posição onde ocorre o desligamento do arco (Figura 5.68 (a)). Essa cratera aparece de forma bem mais acentuada nos cordões onde foi realizada a

soldagem pelo modo convencional. Em muitos casos onde foi realizada a soldagem com a aplicação da técnica *switch back*, esse defeito foi atenuado ou eliminado completamente.

Figura 5.68 - Defeito de cratera na raiz do cordão de solda no momento do fechamento do arco para um corpo de prova com espessura de 2 mm. Em (a): soldagem convencional com $V_s = 20$ cm/min e $I_m = 130$ A e; em (b): soldagem com aplicação do *switch back* com $V_s = 20$ cm/min, $I_m = 130$ A, $f = 5$ Hz e $A = 8$ mm.



Fonte: o próprio autor.

Observou-se também que com a aplicação da técnica *switch back*, os pontos de solidificação de óxidos na raiz ou na superfície dos cordões de solda foi muito atenuado.

Analisando-se a soldagem das chapas em junta de aresta, na posição horizontal, percebeu-se que a aplicação da técnica *switch back* produziu um incremento na velocidade de soldagem de 33% quando comparado ao modo convencional.

Destaca-se que nessa posição de soldagem a tocha encontra-se paralela ao eixo (Y) e, como há uma vibração vertical, para cima e para baixo ao longo do eixo (Z), a tocha acaba produzindo um micro tecimento. Dessa forma, muitas coisas podem ocorrer. A primeira consideração é que o micro tecimento tenha afetado os resultados em termos de ter propiciado um aumento na largura da poça, possibilitando assim que a mesma tenha tipo condição de preencher o *gap* com mais facilidade e, ainda fundir bem as bordas das chapas. Já a segunda consideração é de que o efeito do micro tecimento tenha prejudicado as soldas onde ocorreu gotejamento, uma vez que pode ter produzido uma agitação maior na mesma. E em terceiro lugar, supondo-se que ocorreu um espalhamento maior da poça, esse fenômeno tenha possibilitado que a película da poça de fusão tenha se tornado tão fina a ponto da tensão superficial não conseguir mantê-la unida, ocasionando o seu rompimento, principalmente na região do *gap* máximo. Em outras palavras, não foi possível saber se o micro tecimento existente produziu um efeito benéfico ou prejudicial a soldagem dos corpos de prova.

Como não existem na literatura trabalhos onde foi aplicada a técnica *switch back* em alta frequência, as comparações dos resultados tornam-se difíceis e ficam assim prejudicadas.

Os ensaios utilizando-se a máxima capacidade para produzir altas frequências no oscilador conseguiram demonstrar que com 15 Hz de frequência mostraram a ocorrência de poros quando as soldas foram realizadas sobre chapas para fim de parametrização do processo. Por outro lado, na baixa frequência, cerca de 1 Hz, às vezes, formava-se um túnel por baixo da solda, fazendo com que o reforço ficasse bastante sobressalente, algo como se fosse um bolsão de ar ou gás. Portanto, os resultados obtidos divergem do trabalho Morisada [21]. Possivelmente, a divergência se deve a diferença entre os processos utilizados e as frequências empregadas, uma vez que o autor conseguiu atingir frequências ultrassônicas.

Embora o presente trabalho não tenha realizado nenhum estudo térmico da poça de fusão com a utilização de filmagem com câmera térmica, o mesmo, corrobora com as interpretações de Roen [22], que afirma que uma alta frequência acima de 6 Hz permite o controle térmico da poça de fusão. Essa concordância se deve ao fato de que com o incremento da frequência o arco permanece menos tempo sobre uma determinada região do cordão de solda, produzindo assim um controle melhor de sua temperatura. Esse efeito também foi demonstrado por Carvalho[24] e Wizenmann [2].

Quanto à sobreposição, ficou bastante claro que o estudo do *switch back* pela sobreposição de trajetória ou pelo número que vezes que o arco passa numa determinada região não é um bom parâmetro que ajuda a explicar o funcionamento do processo. Pode-se fazer essa afirmação com base que, não ficou evidente nenhum valor em específico ou uma determinada faixa de concentração de valores de sobreposição de trajetória que demonstrasse claramente a sua funcionalidade. Portanto conclui-se que os resultados de sobreposição foram prejudicados pela variação de DEP. Porém, por tratar-se de um trabalho comparativo com os resultados de outros autores, menciona-se que se conseguiram resultados positivos com valores de sobreposição de trajetória iguais ou próximos os mencionados na literatura, que são de 33%, 40%, 47% e 50%, corroborando assim com os trabalhos [23], [25] e [29]. Destacam-se também os trabalhos de Bruecker [28] e Almeida [18] em que conseguiram incrementar em 60% a velocidade limite de soldagem com a aplicação de *switch back* utilizando sobreposições de 50%, porém esses resultados foram obtidos com processo alimentado e utilizando-se uma única reversão, como se refundindo todo o cordão de solda novamente, dessa forma divergindo em muito dos resultados conseguidos neste trabalho, onde a soldagem é autógena e as reversões são várias.

O presente trabalho necessita deixar claro um aspecto que aparece de forma bastante repetitiva e geral na literatura pesquisada. Trata-se da afirmação de que a aplicação do *switch back* produz um melhor controle da poça de fusão e, por essa razão a mesma não perfura as

chapas soldadas. O autor do presente trabalho precisa deixar bem claro seu ponto de vista de que na verdade, a oscilação da tocha não produz um controle, mas uma agitação, uma perturbação da poça de fusão e, é justamente esse fenômeno, que foi constatado na filmagem de alta velocidade, que realiza uma distribuição maior do calor da poça de fusão, impedindo assim a perfuração da junta. Outro aspecto que se percebeu e, que pode inferir nessa questão, é que a própria poça de fusão cria uma película entre o arco e o metal de base, formando um isolamento térmico, impedindo que maior penetração seja alcançada.

6 CONCLUSÕES

O conhecimento produzido com o estudo do TIG autógeno e da técnica *switch back*, representa um alicerce para outras vertentes de processos de soldagem que, visam o incremento da produtividade por intermédio da redução da penetração, melhor entendimento sobre a poça de fusão e de técnicas de oscilação da tocha. Ambiciona-se que este trabalho estimule a continuidade dos estudos com a técnica *switch back*, para que esta possa ser mais bem compreendida e aplicada a processos modernos de soldagem que busquem solucionar problemas industriais no âmbito da engenharia de soldagem.

Com relação às conclusões que podem ser extraídas deste trabalho citam-se as seguintes:

A DEP é uma variável extremamente significativa para uma condição de fusão adequada do processo TIG. Portanto, a vibração produzida pela combinação do sistema de oscilação com o manipulador Tartílope V2, afeta consideravelmente a capacidade do processo com a técnica *switch back* de se sobressair em relação ao modo convencional, principalmente no que tange ao incremento da velocidade de soldagem.

Com relação à soldagem realizada em junta de aresta sem *gap*, ficou claro que a aplicação da técnica *switch back* não apresentou ganhos de produtividade e qualidade da junta soldada quando comparado com o modo convencional. Este fato ocorreu em função da junta ser idealizada, não refletindo características industriais.

Em razão de haver uma vibração no Tartílope produzida pelo funcionamento do sistema de oscilação, há uma variação de DEP que é sensível a alteração da pressão do arco. Por sua vez a pressão do arco de acordo com a literatura está intimamente ligada ao surgimento de *humping*. Portanto, torna-se inconclusivo para este trabalho que existe ou não um valor ou uma faixa de valores de sobreposição de trajetória, para as quais o *humping* pode ser eliminado e, se esse parâmetro de análise realmente exerce alguma influência sobre a qualidade dos cordões de solda obtidos com o uso da técnica *switch back*.

A sobreposição de trajetória não é um parâmetro confiável para se determinar a capacidade de repetição dos cordões de solda sem o aparecimento de *humping*.

A análise da sobreposição em termos do número de vezes que a tocha passa percentualmente numa região do cordão de solda não demonstrou nenhuma correlação na comparação entre os ensaios que ficaram bons e aqueles que ficaram ruins.

Não foi possível definir, satisfatoriamente, um único valor ou uma faixa de valores de sobreposição de trajetória que fizesse com que todas as repetições realizadas produzam cordões de solda sem *humping*.

Não há correlação entre os resultados obtidos para eliminação de *humping* e as relações entre as velocidades de avanço e reversão da tocha e, o que realmente prevalece é a velocidade do conjunto (manipulador mais sistema de oscilação).

A amplitude e a frequência são variáveis independentes ou a correlação entre as mesmas é muito baixa e imperceptível. Portanto, este trabalho conclui que a modificação em uma variável não afeta a outra.

O efeito produzido pelo *switch back* reduz a penetração. O incremento da amplitude e frequência, de maneira generalizada, reduz os valores de penetração, área fundida e largura do cordão de solda.

Não é possível afirmar que o *switch back* quando realizado pelo processo TIG autógeno, reduza ou elimine as mordeduras. Embora informado pela literatura, este trabalho não conseguiu fazer esta constatação.

O parâmetro da área fundida é mais impactado pela amplitude e a largura é levemente mais impactada pela frequência (estatisticamente), embora pela observação visual este trabalho entenda que a largura é igualmente afetada pelas duas variáveis. Para a penetração, tanto a frequência quanto a amplitude influenciam fortemente este parâmetro.

A técnica *switch back* consegue efetivamente compensar desalinhamentos na montagem mecânica de uma junta soldada, porém a tocha precisa estar adequadamente alinhada com o centro dessa junta.

Há necessidade de projetar um manipulador de soldagem com maior rigidez e robustez mecânica para garantir uma execução de maior precisão nas trajetórias, corroborando com as conclusões do trabalho [20].

Conclusões do sistema de oscilação:

A diferença das velocidades resultantes de avanço e de reversão entre o robô antropomórfico e o módulo de oscilação, possivelmente podem explicar a obtenção de resultados diferentes quando aplicada a técnica *switch back* em ambos os casos. O movimento de oscilação empregando a técnica *switch back* com o sistema de oscilação é mais lento nas extremidades se comparado ao movimento produzido pelo robô antropomórfico. Porém, no centro da trajetória o oposto acontece, o sistema de oscilação é mais rápido e o robô é mais

lento. Outro aspecto que pode ter produzido a disparidade entre os resultados é a falta de rigidez do módulo de oscilação. Possivelmente estas diferenças expliquem a obtenção de resultados diferentes;

Existe um limite para a utilização do sistema de oscilação, em combinações de frequências e amplitudes muito altas (amplitudes maiores que 12 mm e frequências maiores que 8 Hz), ocorre porosidade nas soldas, independente de reduzir ou aumentar a vazão de gás de processo;

O aumento de sobreposição obtido tanto pelo incremento da amplitude quanto da frequência atenua ou elimina o aparecimento do defeito de *humping*;

De acordo com as observações vistas durante os ensaios (pelo menos aquilo que se conclui a olho nu) é de que com o aumento da frequência e a da amplitude a poça de fusão fica mais rasa e aparenta diminuir a penetração;

Os ensaios sugerem que em frequências e amplitudes mais baixas o processo de soldagem com a técnica *switch back* tende ao modo convencional, dessa forma aumentando a quantidade de *humping*;

Aparentemente não há diferença considerável em termos de resultados obtidos com o *switch back* entre a oscilação produzida por um robô antropomórfico e o sistema de oscilação utilizado neste trabalho. A única e real diferença observada é que o robô antropomórfico não pode realizar frequências de oscilação superiores a 3 Hz.

O robô antropomórfico permite a seleção da velocidade de avanço e reversão da tocha de modo independente. Atribui-se a este fato a razão pela qual as soldas produzidas pelo mesmo geram resultados diferentes das soldas produzidas pelo sistema de oscilação empregado neste trabalho. Isto também permite com que se possam ter os tempos de avanço e reversão iguais ou diferentes, uma vez que se podem arbitrar velocidades de avanço e reversão também diferentes.

Quanto a variabilidade da DEP observada no sinal de tensão, não foi possível dizer o quanto dessa variação é produzida pela vibração do sistema de oscilação com o tartilope e o quanto é produzida pela ação do arco, ora sobre o metal sólido, ora sobre a poça de fusão. Porém, afirma-se que a maior variação de penetração ocorra pelo segundo motivo citado.

Conclusões quanto às soldas realizadas:

A técnica *switch back* não apresenta ganho quando aplicada na junta sem *gap* tipo aresta quando comparada ao modo convencional, não apresentando vantagens relativamente importantes.

Quanto ao micro tecimento não foi possível concluir se o mesmo é benéfico ou prejudicial para a soldagem das juntas de aresta na posição horizontal. Também não é possível afirmar o quanto e, se a amplitude influencia o micro tecimento, assim como ocorre com a frequência. O micro tecimento deve ser tratado como ruído, afinal não é parâmetro controlável.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Estudar a associação dos processos TIG duplo eletrodo e TIG *Hot Wire* com a técnica *switch back* para aplicações de revestimento;
- 2) Aprofundar os estudos do *switch back* utilizando a corrente contínua pulsada;
- 3) Desenvolver um manipulador com maior rigidez para garantir uma maior confiabilidade na manutenibilidade da DEP;
- 4) Desenvolver rotinas de início e fim de soldagem para procedimentos de trabalho adequados a geometria da peça;
- 5) Desenvolver um novo sistema de oscilação levando em consideração as avaliações feitas nesse trabalho;
- 6) Desenvolver um módulo de oscilação com possibilidade de realizar o *switch back* e também deslocar-se com tecimento para as laterais, fazendo assim, um movimento elíptico;
- 7) Após a ignição do arco e formação da poça de fusão, estudar os efeitos de se iniciar o movimento do Tartílope com a posição do módulo de oscilação no início do avanço e também no início da reversão do movimento. Trazendo maior rigidez e eliminando possíveis ressonâncias;
- 8) Estudar a possibilidade de se aplicar a técnica *switch back* com o processo MIG/MAG para a soldagem de selamento dos compressores herméticos de refrigeração, visando aumento da velocidade de soldagem e redução do percentual de defeitos dos compressores.
- 9) Fazer análises do perfil geométrico do cordão de solda seccionando o corpo de prova no sentido longitudinal horizontal, a fim de verificar se os serrilhados ou ondulações também não ocorrem para os lados do cordão.
- 10) Realizar ensaios com a técnica *Schlieren* para confirmar a existência de turbulência e possível entrada de gases estranhos no arco voltaico e, também para verificar a existência de variação de tensão no arco em função do mesmo ter que ionizar um gás mais frio nas extremidades do movimento da tocha.

8 REFERÊNCIAS

- [1] SCHWEDERSKY, Mateus Barancelli. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG Duplo Eletrodo**. 2015. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [2] WIZENMANN, G. S. **Desenvolvimento de Infraestrutura para o Estudo dos Efeitos da Oscilação Longitudinal da Tocha de Soldagem (*switch back*) e a Avaliação de Desempenho no Processo TIG Autógeno**. 2015. 82 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [3] IETKA, M. F. **Aplicação de Soldagem TIG com Alta Produtividade no Selamento de Compressores Herméticos para Refrigeração**. Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica- POSMEC - UFSC. Florianópolis. 2010.
- [4] AMZA, Gheorghe; APOSTOLESCU, Zoia; GROZA, Maria Dragomir; PAISE, Liana Sanda. **Contributions from Smoke on Impact of Welding Procedures Health Operators Welder *Fiability & Durability / Fiabilitate si Durabilitate***. 2012 Supplement, p229-236. 8p. , Base de dados: Academic Search Premier.
- [5] DONAIRE, Denis. **Gestão ambiental na empresa**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1999. 169 p. ISBN 9788522421855.
- [6] POEPKE, J.S., BRITO, P. Processo TIG. GONÇALVES, W, V. **Soldagem: Área Metalurgia**. 1ª ed. São Paulo. Editora SENAI-SP, 719 pag.
- [7] MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. atual. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2009. 362 p. (Didática). ISBN 9788570417480.
- [8] WAINER, Emílio; BRANDI, Sergio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 494 p. ISBN 9788521202387.
- [9] CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC controle da qualidade total: no estilo japonês**. 9. ed. Nova Lima: Editora Falconi, 2014. 286p. ISBN 8586948144.
- [10] OLIVARES, Erick Alejandro González. **Uma Abordagem Técnica e Científica do Processo TIG Keyhole à Luz de Novas Tecnologias e Aspectos Comparativos com o Processo Plasma**. 2015. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [11] SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. **Humping mechanisms present in high speed welding**. Science and Technology of Welding and Joining, p. 572-579, 11(5) 2006.

- [12] MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding**. Massachusetts Institute of Technology. [S.l.]. 1999.
- [13] SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding**. Welding Journal, jul. 1979. 212s-224s.
- [14] GREENE, W., **An analysis os Trnasfer in Gas Shielding Welding Arcs**. A.I.E.E. Winter General Meeting, 1960.
- [15] LANCASTER, J.F. **The Physics of the Welding**. Oxford, UK: 2^a ed. Pergamon Press. pp 120-225, Inglaterra 1986.
- [16] HEIPLE, C. A., and ROPER, J. R. 1 982. **Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry**, Welding Journal 61(4)975.
- [17] SCHWEDERSKY, M.B., Gonçalves e Silva, R.H., Dutra, J.C. et al. **Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process**. Weld World (2017). doi:10.1007/s40194-017-0465-6.
- [18] ALMEIDA, Hélio Antônio Lameira de; MOTA, Carlos Alberto M. da; SCOTTI, Américo. **Efeitos do comprimento de reversão e do ângulo de ataque sobre a estrutura de solidificação do cordão em soldagem MIG/MAG**. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 17, n. 2, p.123-137, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000200006>.
- [19] KANEKO, Y. et al. **Numerical Simulation of MIG Weld Pool in Switch Back Welding**. Journal of the Japan Welding Society, v. 25, p. 372–380, 2007s.
- [20] PIRES, R. P. **Planejamento e Correção de Trajetória em Manipulador de Soldagem**. Dissertação de Mestrado - Departamento Acadêmico de Metal Mecânica-Mestrado Profissional em Mecatrônica-Instituto Federal de Ciência e Tecnologia. Florianópolis, p. 114. 2014.
- [21] MORISADA, Y.; Fujii, H.; Inagaki, F.; Kamai, M. **Development of high frequency tungsten inert gas welding method**. Mater. Des. 2012, 44, 12–16.
- [22] ROEN, R. A. **Arc welding apparatus with oscillating electrode**, United States Patent, Patent N. US 4295031 (A). Out. 1981.
- [23] SKHABOVSKYI, I. **MIG/MAG Com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade Visando Automação de Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações**. 2014.155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mecânica, Programa de Pós Graduação em Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

- [35] ONLINE, Tocha TIG modelo AUT-WIG-27. Disponível em: <http://www.binzel-abicor.com/uploads/Content/Brazil/PDF Files/PDF Files TIG/tig 27 - 500 amp.pdf>.
- [36] ONLINE, Afiador de eletrodos. Disponível em: <http://www.ckworldwide.com/portable-grinder.html>. Acesso em: 06/02/2017 às 10h46min.
- [37] ONLINE, Medidor de deslocamento linear. Disponível em: <https://www.burster.com/en/sensors/displacement/p/detail/8712-8713/> Acesso em: 07/02/2017 às 15h34min.
- [38] ONLINE, Sistema de Aquisição Portátil – SAP V4. Disponível em: https://www.google.com.br/search?q=sap+imc&biw=1600&bih=768&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj3uMGtvqTSAhVKjpAKHfMoDSsQ_AUIBygC#imgrc=Yu3FRYeLXfB80M Acesso em: 22/02/2017 às 17h00min.
- [39] ONLINE, Medidor de vazão de gases. Disponível em: http://www.sps-soldagem.com.br/catalogo/12_MVG_3.pdf: Acesso em: 22/03/2017 às 16h00min.
- [40] ONLINE, Termômetro Infravermelho Fluke modelo 568 IR. Disponível em: <http://www.fluke.com/fluke/brpt/termometros/fluke-568-566.htm?PID=56090> Acesso em: 26/05/2017 às 12h22min.
- [41] MATSUDA, F.; USHIO, M.; KUMAGAI, T. Study on Gas-Tungsten-Arc electrode (report 1): comparative study of characteristics of oxide-tungsten cathode. **Transactions of JWRI**, Osaka, v. 15, n. 1, p. 13-19, July 1986.
- [42] ONLINE, Câmera de alta velocidade. Disponível em: <https://idtvision.com/products/cameras/y-series-cameras/>: Acesso em: 22/03/2017 às 16h00min.