



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO (CTC)
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Junior Bonetti Zanini

INVESTIGAÇÃO E PROSPECÇÕES PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM
HÍBRIDA PLASMA-MIG SERIAL

Florianópolis

2020

Junior Bonetti Zanini

**INVESTIGAÇÃO E PROSPECÇÕES PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM
HÍBRIDA PLASMA-MIG SERIAL**

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. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Florianópolis

2020

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

Zanini, Junior

Investigação e Prospecções para o Processo de Soldagem
Híbrida Plasma-MIG Serial / Junior Zanini ; orientador,
Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2020.

135 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. Plasma-MIG. 3. Soldagem
Híbrida. 4. Física da Soldagem. 5. Soldagem de Chapa
Espessa. I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Junior Bonetti Zanini

**INVESTIGAÇÃO E PROSPECÇÕES PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM
HÍBRIDA PLASMA-MIG SERIAL**

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

Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Dr. Eng. Raul Gohr Júnior

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. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do programa

Prof. Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng
Orientador

Florianópolis

2020

A minha namorada Leticia e
Aos companheiros de todo dia Frank e Vicky

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, por disponibilizar a estrutura e corpo discente para desenvolvimento do aprendizado e trabalhos práticos;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Regis Henrique Gonçalves e Silva, pela orientação e incentivo neste e outros trabalhos conduzidos no Labsolda;

À minha namorada Leticia pelo apoio e carinho;

Aos meus dogs Frank e Vicky, sempre disponíveis para descontração;

Aos colegas de graduação e pós-graduação do Labsolda que tornam o diariamente o ambiente de trabalho mais dinâmico e produtivo. Gostaria de citar nomes, porém como são muitos, fico com medo de deixar alguém de fora, mas tenha certeza, que você colega de laboratório, que está lendo esse trabalho agora, está sendo lembrado!;

Aos colegas de Futebol, por proporcionar a prática do esporte mesmo no meio acadêmico, tornando a rotina mais saudável;

A minha família, pelo apoio contínuo, perseverança e auxílio nas horas de necessidade;

A FINEP, pelo suporte financeiro para desenvolvimento do projeto SOLDADUTO e demais parcerias efetuadas;

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001 pelo apoio financeiro para execução deste projeto;

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento desse trabalho.

Não diga que a vitória está perdida...

Se é de batalhas que se vive a vida...

Tente outra vez!

(SEIXAS, Raul, 1975)

RESUMO

Novos procedimentos e aplicações em soldagem são largamente desenvolvidos de forma a atender à crescente demanda em produtividade e qualidade almejada pelas empresas, mantendo os custos de fabricação o mais baixo possíveis. Diante disso, uma diversidade de processos e técnicas de soldagem estão disponíveis hoje no mercado, cada qual dedicada cada vez a aplicações mais específicas. Devido as particularidades na gama de aplicação de cada processo individual, surgiram os processos híbridos, que são aqueles que buscam aliar duas técnicas de soldagem diferentes simultaneamente, de forma a aliar as vantagens de ambas e originar um novo tipo de procedimento. Nesse contexto, surgiu o processo híbrido Plasma-MIG, que em suas diversas variações, tem como prerrogativa aliar a capacidade de impor energia do plasma de forma independente ao material de adição, com a capacidade do processo MIG de preenchimento da junta. Dada a escassa bibliografia sobre o processo, em especial, da versão Plasma-MIG Serial, esse trabalho tem como objeto principal investigar e caracterizar esse processo a fim de se criar uma base tecnológica de dados que permita dar suporte a futuras aplicações e desenvolvimentos do mesmo, explorando seus mecanismos de funcionamento e suas potencialidades. Para isso, este trabalho usou como principais recursos a filmagem de alta velocidade e a monitoração de alta frequência dos sinais elétricos do processo. O comportamento físico dos arcos elétricos foi explorado, bem como sua hibridização e as implicações na poça de fusão. Além disso, foi explorado o comportamento do processo perante diferentes parametrizações para ambos os arcos, principalmente na parte plasma. Os resultados mostraram diversas peculiaridades oriundas da hibridização dos arcos, tal como o desvio resultante nos arcos em decorrência das forças magnéticas atuantes no sistema, e em que situações esse é mais ou menos relevante para o processo. Os dados apresentados também sugeriram fortemente que para diversos tipos de parametrização houve o acoplamento elétrico entre os arcos, ocorrendo a passagem de corrente entre tochas, fato que se mostrou indesejável para soldagem. Também foi possível identificar os tipos de transferência metálica predominantes, assim como o impacto dos parâmetros impostos no processo Plasma sobre a geometria do cordão de solda. Por fim, o processo foi aplicado na soldagem circunferencial de tubo de 1/2", cujo resultado foi de acordo com o almejado para o trabalho.

Palavras-chave: PLASMA-MIG. Super-MIG. Física da soldagem. Soldagem de chapa espessa. Produtividade. Soldagem Híbrida.

ABSTRACT

New welding procedures and applications are often developed in order to attend the increasing demand of productivity and quality, keeping lower costs. Therefore, a diversity of welding procedures and techniques are available in the market, each devoted to specific applications. In this scenario has raised the hybrid procedures, in which seek to ally the advantages of each specific technique to build a new whole procedure. On this context, has come the hybrid Plasma-MIG welding procedures, which in its various forms, tries to ally the power input available in the plasma with the MIG bridging capability. Given the short data on this procedure this work aims to investigate and characterize it, in order to create a technologic database that backs up futures developments and applications on this procedures, exploring its functionalities and possibilities. Thus, this work took as primary resource the use of high speed filming and high frequency electric data acquisition. The behavior of the electric arcs were widely explored, as well as the hybridization between arcs and its effects in the welding pool, Hence, the behavior of the procedure were explored under different parametrization for both arcs, but mostly the plasma. Results showed several peculiarities arising from the arc hybridization, such as the arc deviation due the acting magnetic forces, and which cases it affects most the procedure. Data also suggested there may be an arc coupling between arcs which allows current transfer between power sources, being undesired for the weld. In addition, it was possible to identify the predominant metallic transfers during the hybrid process, and the impact of the plasma parameters on the weld bead geometry and defects. As the end, the process was applied in a circumferential welding of a ½” circumferential pipe, which showed good results accordingly expected.

Keywords: PLASMA-GMAW. Super-MIG. Welding physics. Thick plate welding. Productivity. Hybrid Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos tipos de transferência metálica segundo Ponomarev et al [11].	22
Figura 2 – Ilustração da transferência metálica no modo goticular [13].	22
Figura 3 – Ilustração dos oscilogramas de corrente e tensão durante a transferência pelo modo goticular [15].	23
Figura 4 – Ilustração da transferência metálica no modo goticular com alongamento [13].	23
Figura 5 – Ilustração da transferência metálica no modo goticular rotacional [13].	24
Figura 6 – Ilustração da transferência metálica no modo pulsado [14].	24
Figura 7 – Comparação entre GMAW spray convencional (a) e GMAW burried Arc (b).	25
Figura 8 – Comparação entre GMAW spray convencional (esquerda) e GMAW burried Arc (direita) imagens confeccionadas no LABSOLDA.	25
Figura 9 – Filmagem em alta velocidade do processo <i>Burried Arc</i> otimizado pelo controle de indutância da fonte (Ks 100, Kd 1) [20].	26
Figura 10 – Soldas em juntas em T pelos respectivos processos DeepArc-Merke, ForceArcPuls-EWM, RapidWeld-Cloos, PowerArc, MIGatronic, em comparação com GMAW convencional (esquerda). Imagens retiradas dos catálogos dos respectivos fabricantes.	26
Figura 11 – Elementos que compõem as tochas Plasma (esquerda) e GTAW (direita).	27
Figura 12 – Ilustração do mecanismo de possíveis defeitos de porosidade (esquerda) e <i>humping</i> (direita) na soldagem plasma.	29
Figura 13 – Esquemático da atuação das forças exercidas pelo arco plasma na poça de fusão nas vistas lateral e superior respectivamente [24].	29
Figura 14 – Esquemático das primeiras concepções de processo híbrido Plasma-GMAW [29].	31
Figura 15 – Esquema da tocha de soldagem no caso do processo Plasma-GMAW Coaxial [29].	32
Figura 16 – Esquema da tocha de soldagem no caso do processo Plasma-GMAW Serial (PLT, 2014).	33
Figura 17 – Comparação entre as geometrias propostas para cada tipo de solda antes da operação de soldagem, e a soldagem resultante das mesmas para os processos GMAW, Plasma-GMAW, e Plasma respectivamente [33].	34
Figura 18 – Comparação dos tempos de arco aberto e quantidade de material de adição utilizado nos três processos GMAW, PAW-GMAW e PAW [33].	35
Figura 19 – Ilustração do campo magnético gerado por uma corrente passando em um meio (A) e regra da mão direita para determinação do sentido das linhas de campo e do vetor força (B, C) [34].	36
Figura 20 – Força produzida por uma carga elétrica positiva se movendo em um campo magnético. (A força aponta no sentido oposto caso a carga elétrica seja negativa) [35].	36
Figura 21 – Diagrama explicando o comportamento da deflexão do arco para diferentes polaridades (esquerda: mesma polaridade - atração; direita: polaridades opostas - repulsão) [35].	38
Figura 22 – Ilustração da atuação do campo eletromagnético suplementar (B) nos arcos plasma e GMAW.	39
Figura 23 – Observação do comportamento dos arcos plasma e GMAW em relação a distância entre eles (a) 15mm, (b) 35mm [37].	39
Figura 24 – Característica dinâmica de uma fonte controlada pelo sistema PWM.	40
Figura 25 – Topologia de estruturas de potência de fontes que utilizam o sistema de controle PWM.	41
Figura 26 – Simulação da distribuição das direções e valores de corrente [39].	42
Figura 27 – Diagrama esquemático do mecanismo de controle de PWM na fonte [39].	42
Figura 28 – Comparação entre o arco GTAW (a) e o arco híbrido GTAW-GMAW (b) [39].	43
Figura 29 – Esquema de aquisição de dados elétricos utilizados por BERNARDI et al, durante o processo TIG-MIG [40].	44
Figura 30 – Aquisição de corrente no diodo de roda livre e tensão no IGBT para o processo TIG [40].	44
Figura 31 – Aquisição dos sinais elétricos no processo TIG-MIG Pulsado [40].	45
Figura 32 – Ciclogramas (tensão x corrente) dos processos MIG pulsado e MIG curto circuito.	46
Figura 33 – Modelos elétricos propostos para o processo Plasma-GMAW Coaxial segundo segundo MATTES & KOHLER [42] e OLIVEIRA [4].	47
Figura 34 – Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-GMAW Coaxial e GMAW convencional [43].	48
Figura 35 – Corrente de transição entre os modos de transferência goticular axial e rotacional para os processos GMAW (A) e Plasma-GMAW (B) [43].	49

Figura 36 – Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade [26].	50
Figura 37 – Diagrama Esquemático da Característica do Processo Plasma-MIG coaxial [4].	50
Figura 38 – Representação do efeito da polaridade sobre os arcos elétricos e a projeção da gota metálica para GMAW negativo (A) e GMAW positivo (B) [37].	51
Figura 39 – Filmagem de alta velocidade da projeção da gota metálica durante GMAW positivo [37].	51
Figura 40 – Velocidade x tamanho na gota no processo VPPA-GMAW [45].	52
Figura 41 – Resultados obtidos a partir da variação do balanço de correntes para o Plasma-GMAW coaxial [4].	52
Figura 42 – Penetração em função da energia de soldagem (esquerda) e penetração em função da corrente imposta no processo GMAW (direita) para o processo Plasma-GMAW Coaxial [26].	53
Figura 43 – Distribuição de temperaturas para o processo GMAW e Plasma-GMAW [46].	54
Figura 44 – Eficiência térmica de alguns processos de soldagem [47].	54
Figura 45 – Variação na largura e penetração no cordão de solda de acordo com (A) velocidade de soldagem e (B) corrente no arco GMAW [48].	55
Figura 46 – Variação na largura e penetração no cordão de solda de acordo com (C) corrente de plasma e (D) vazão de gás de plasma [48].	56
Figura 47 – Mudança do perfil de em função da variação do ângulo de trabalho [49].	56
Figura 48 – Ensaio em Juntas de topo com o processo Plasma-GMAW serial [49].	57
Figura 49 – Fontes de soldagem utilizadas para o processo Plasma-GMAW. (A) Fonte SuperGMAW HD (B) Fonte IMC Digiplus 800A.	58
Figura 50 – Cabeçote alimentador de arame STA-20 (A) e unidade de refrigeração UPR 7500 (B).	59
Figura 51 – Sistema da tocha Plasma-GMAW Serial em detalhes (A- Bobinas eletromagnéticas; B- Bicos GMAW e plasma).	60
Figura 52 – Sistema manipulador cartesiano tartilope V2 (A) e Robô antropomórfico Motoman UP6 (B).	61
Figura 53 – Sistemas de aquisição de dados (A- Sistema de aquisição de dados portátil (SAP); B- MotionPro DAS; C- TC-1).	62
Figura 54 – Câmera para filmagem dos arcos elétricos em tempo real.	62
Figura 55 – Principais equipamentos necessários para filmagem de alta velocidade (A- câmera de alta velocidade; B- Lente; C- Sistema de iluminação LASER)	63
Figura 56 – Fluxômetro utilizado para medir o campo magnético da tocha de soldagem.	63
Figura 57 – Ilustração dos modelos de <i>Backing</i> utilizados nos ensaios (A) cerâmico (B) fibra de vidro (C) cobre.	64
Figura 58 – Configuração entre os instrumentos utilizados para aquisição dos sinais elétricos	65
Figura 59 – Esquemático de tomada dos sinais elétricos para o ensaio de calibração.	66
Figura 60 – Teste realizando a aproximação da bússola à tocha, durante o modo teste do campo magnético.	67
Figura 61 – Medição do campo magnético presente no bocal da tocha no modo teste.	68
Figura 62 – Exibição do display da fonte SUPER-GMAW no modo de ajuste do programa de campo magnético.	69
Figura 63 – Elementos analisados nas macrografias das soldas realizadas.	71
Figura 64 – Geometria da junta de topo utilizada para soldagem com diferentes tipos de <i>backing</i> .	72
Figura 65 – Junta utilizada para posterior soldagem de tubo com o processo Plasma-GMAW, em comparação a juntas comumente soldada pelo processo SAW.	73
Figura 66 – Bancada de ensaios para soldagem em Tubo.	74
Figura 67 – Aquisição de dados provenientes do SAP e do TC1	74
Figura 68 – Aquisição de dados provenientes do SAP e do TC1 ajustados para as grandezas físicas correspondentes.	75
Figura 69 – Aquisição de dados provenientes do TC1 ajustados para as grandezas físicas correspondentes.	76
Figura 70 – Filmagem do arco elétrico (A) sem filtros digitais (B) a partir da aplicação de filtros digitais.	77
Figura 71 – Representação do modelo elétrico do processo Plasma-GMAW serial.	77
Figura 72 – Filmagens dos Arcos elétricos variando a corrente de plasma ajustada na fonte e respectivos oscilogramas de corrente e tensão.	79
Figura 73 – Oscilogramas de corrente e tensão dos processos Plasma e GMAW elucidando o comportamento gerado no início de ambos os processos.	80

Figura 74 – Comportamento da tensão plasma para diferentes correntes de soldagem durante o processo Plasma-GMAW (laranja) e processo Plasma (Azul).....	82
Figura 75 – Esquema dos campos magnéticos e forças magnéticas atuantes no processo Plasma-GMAW serial.....	84
Figura 76 – Esquema de atuação de Hb em Imp proposto.....	85
Figura 77 – Ilustração da compressão do arco GMAW com o aumento da corrente de Plasma.....	86
Figura 78 – Deflexão do arco plasma para três diferentes níveis de corrente de plasma e duas diferentes distâncias entre o eletrodo e a peça (DBPP).	87
Figura 79 – Deflexão do arco plasma para três diferentes níveis distância entre o eletrodo Plasma e a peça (DBPP), Ip-200A.	87
Figura 80 – Filmagens em alta velocidade do arco elétrico para três diferentes ajustes de campo magnético (2, 40 e 100%). Quadros sincronizados conforme posição indicada pelo oscilograma de corrente e tensão.	90
Figura 81 – Sobreposição das curvas de corrente e tensão dos processos Plasma e GMAW para três diferentes intensidades de campo magnético (2%, 40% e 100%) [30].	91
Figura 82 – Filmagem do arco em tempo real para três diferentes intensidades de campo magnético (2, 40 e 100%) e sem a presença do campo magnético (sem bocal).	92
Figura 83 – Representação esquemática das forças magnéticas no processo Plasma-GMAW serial, considerando que Imp gera um vetor campo magnético Hmp.	92
Figura 84 – Oscilograma de corrente e tensão para transferência Metálica por Curto-circuito no Processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 210 A; UGMAW: 26 V; Ip 200 A; Up: 15 V; Va: 12 m/min).	93
Figura 85 – Transferência Metálica por Curto-circuito para o Processo Plasma-GMAW Serial e oscilograma de tensão e corrente para o processo GMAW.	94
Figura 86 – Ocorrência de transferência por voo livre, elucidando efeito da gota sendo puxada em direção ao arco plasma.	95
Figura 87 – Transferência Metálica Pulsada no Processo Plasma-GMAW Serial.....	97
Figura 88 – Teste com pulso longo para verificar a acomodação da corrente plasma perante a perturbação do sistema.	98
Figura 89 – Comparação dos oscilograma de corrente e tensão para o processo GMAW durante o processo híbrido (vermelho) e operando sozinho (azul).	100
Figura 90 – Transferência goticular no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 285 A, UGMAW: 26 V; Ip: 300 A; Up: 23 V).....	101
Figura 91 – Transferência goticular com alongamento no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 370 A/380 A, UGMAW: 32 V; Ip).....	102
Figura 92 – Transferência goticular rotacional no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 384 A, UGMAW: 32 V; Ip: 300 A).....	103
Figura 93 – Modelo elétrico do Processo Plasma-MIG serial quando há a inversão de polaridade na fonte Plasma.	104
Figura 94 – Oscilogramas de corrente e tensão de um procedimento MIG pulsado apresentando instabilidade e seu respectivo ciclograma.	105
Figura 95 – Filmagens do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes parâmetros de Plasma.	107
Figura 96 – Filmagens de alta velocidade do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes correntes de plasma.	108
Figura 97 – Filmagens do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes correntes de plasma e DBPP.	108
Figura 98 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma (A- Ip 100 A; B- Ip 150 A).	110
Figura 99 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma A- Ip 200 A; B- Ip 250 A (A amostra 20 não foi apresentada devido a perfuração grosseira durante os testes).	111
Figura 100 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma Ip 300 A.	111
Figura 101 – Macrografias das soldas realizadas variando corrente de plasma (100 à 300 A) e gás de plasma (3 à 7 L/min)	112
Figura 102 – Profundidade de penetração da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.	114
Figura 103 – Profundidade de penetração da zona fundida com a variação do gás de plasma e do diâmetro do bico constritor [30].....	115

Figura 104 – Largura da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.	116
Figura 105 – Altura do reforço da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.	116
Figura 106 – Ensaio Radiográfico para as amostras soldadas para verificação de porosidade.	118
Figura 107 – Comparação entre bocal constritor novo, e após aproximadamente 30 minutos de arco aberto [30].	119
Figura 108 – Comparação dos bocais constritores após aproximadamente 30 minutos de arco aberto.	119
Figura 109 – Macrografias resultantes para soldas realizadas com três tipos diferentes de <i>backing</i> (A) Cerâmico, (B) Fibra de Vidro e (C) Cobre.	120
Figura 110 – Radiografias para soldas realizadas com três tipos diferentes de <i>backing</i> (A) Cerâmico, (B) Fibra de Vidro e (C) Cobre.	121
Figura 111 – Soldagem dos Tubos para a velocidade de 45 cm/min (A/B: <i>backing</i> cerâmico/fibra de vidro; 1/2 Face/raíz da solda).	121
Figura 112 – Aspecto das soldas realizadas nos tubos para Vs: 60 cm/min. (A) <i>backing</i> cerâmico. (B) Fibra de Vidro.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros utilizados para ensaio de calibração.....	65
Tabela 2. Parâmetros utilizados para verificar a interação entre os arcos nesta etapa.....	67
Tabela 3. Parâmetros utilizados para os ensaios do campo magnético	69
Tabela 4. Parâmetros utilizados para verificação da transferência metálica.	70
Tabela 5. Parâmetros utilizados para verificação da poça de fusão.	70
Tabela 6. DOE realizada para os parâmetros de plasma variando I_p de 100 a 300 A e Gás de plasma 3 a 7 l/min.	71
Tabela 7. Parâmetros de soldagem para junta de topo e chapa de ½” conforme Figura 64	72
Tabela 8. Medições de corrente realizadas para os diferentes ensaios e diferença do ajustado.	81
Tabela 9. Dados retirados dos ensaios elucidando o incremento da tensão com a mudança da corrente	82
Tabela 10. Correntes médias apresentadas no processo Plasma-GMAW pulsado em estudos realizados por Fagundes [30].....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical Engineering
DBPP	Distância Bocal Plasma-Peça
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
Gp	Gás de Plasma
Ib	Corrente de Base
Ip	Corrente de Pulso
Im	Corrente GMAW
Ipl	Corrente de Plasma
Imp	Corrente entre tochas
IIW	Instituto Internacional de Soldagem
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission
MIG	Metal Inert Gas
PAW	Plasma Arc Welding
PLT	Plasma Laser Technologies
PWM	Pulse Width Modulation
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SAW	Submerged Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
tp	Tempo de Pulso
tb	Tempo de Base
Vs	Velocidade de Soldagem
Va	Velocidade de Alimentação
VPPA	Variable Polarity Plasma Arc

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo geral	21
1.2	Objetivos específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BASES TECNOLÓGICAS	21
2.1	Novas tecnologias MIG	21
2.1.1	<i>Transferência Metálica por Voo Livre</i>	22
2.1.2	<i>Variantes Modernas do Processo GMAW para alta penetração</i>	24
2.2	Fundamentos da Soldagem Plasma e suas Tecnologias	26
2.3	Fundamentos da Soldagem Híbrida Plasma-GMAW	30
2.3.1	<i>Plasma-MIG Coaxial</i>	31
2.3.2	<i>Plasma-GMAW Serial</i>	33
2.4	Interações Físicas e Comportamento Elétrico do Processo Plasma-GMAW	35
2.4.1	<i>Forças Elétricas e Magnéticas Presentes no Processo Plasma-GMAW</i>	35
2.4.2	<i>Controle das Fontes de Soldagem e Modelagem Elétrica do Arco Híbrido</i>	40
2.5	Transferência Metálica no Processo Plasma-GMAW	47
2.6	Efeitos da Hibridização no Processo Plasma-GMAW	52
3	EQUIPAMENTOS MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Equipamentos	57
3.1.1	<i>Fontes de Soldagem</i>	57
3.1.2	<i>Tocha Plasma-GMAW Serial</i>	59
3.1.3	<i>Sistemas de Movimentação</i>	60
3.1.4	<i>Sistemas de Medição e Monitoração</i>	61
3.2	Materiais	63
3.3	Métodos	64
3.3.1	<i>Calibração do Sistema de Medição</i>	64
3.3.2	<i>Interação Física entre os Arcos Elétricos</i>	66
3.3.3	<i>Estudo do Campo Magnético Externo</i>	67
3.3.4	<i>Estudo da Transferência Metálica</i>	69
3.3.5	<i>Estudo da Dinâmica do Processo Híbrido na Poça de Fusão</i>	70
3.3.6	<i>Estudo da Morfologia do Cordão de Solda de acordo com os Parâmetros de Plasma</i>	70

3.3.7	Ensaio em soldagem de União	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1	Calibração do Sistema de Medição	74
4.2	Interação Física entre os Arcos Elétricos	76
4.2.1	<i>Modelagem Elétrica para o Processo Híbrido e efeitos elétricos da hibridização</i>	76
4.2.2	<i>Características Elétricas do Processo Híbrido</i>	78
4.2.3	<i>Modelagem das Forças Magnéticas Atuantes no Sistema</i>	83
4.2.4	<i>Deflexão dos Arcos Elétricos</i>	85
4.3	Atuação do Campo Magnético Externo	88
4.4	Tipos de Transferência Metálica no Processo Plasma-GMAW Serial	93
4.4.1	<i>Transferência Metálica por Contato</i>	93
4.4.2	<i>Transferência Pulsada</i>	96
4.4.3	<i>Transferência Goticular</i>	100
4.5	Análise e Hipóteses para Transferência de Corrente entre Tochas	103
4.6	Dinâmica de Atuação do Arco Plasma Sobre a Poça de Fusão	106
4.7	Efeito da Corrente e Gás de Plasma nas Características Morfológicas da Solda	109
4.7.1	<i>Efeito da Corrente e Gás de Plasma no Aspecto Superficial do Cordão de Solda</i>	109
4.7.2	<i>Efeito da Corrente e Gás de Plasma na Geometria do Cordão de Solda</i>	111
4.7.3	<i>Efeito da Corrente e Gás de Plasma na Porosidade</i>	116
4.8	Desgaste nos Consumíveis de Soldagem	118
4.9	Aplicação do Processo Plasma-GMAW Serial em Soldagem de União	119
4.9.1	<i>Influência do Tipo de <i>Backing</i> na Soldagem de União</i>	120
4.9.2	<i>Soldagem Circunferencial de Tubo</i>	121
5	CONCLUSÕES	123
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
	BIBLIOGRAFIA	126
	ANEXOS	134

1 INTRODUÇÃO

Na indústria metal mecânica pesada, principalmente naval, construção e óleo e gás, a produtividade é essencial, pois a união de chapas espessas requer uma grande quantidade de energia e insumos. Nesse contexto, maiores taxas de deposição e de penetração são essenciais. Dentre os processos comuns para esse tipo de aplicação podem ser citados a soldagem MIG/MAG (também denominada GMAW) e SAW [1] [2], que apesar da grande quantidade de deposição que podem atingir, o controle da corrente aplicada, é diretamente proporcional a quantidade de material depositado, o que torna o processo limitado em termos de penetração/material depositado, podendo exigir extensa preparação de junta.

Outros processos, via arco elétrico, comuns para soldagem de chapas espessas são os que utilizam eletrodo permanente, conhecidos também por poderem atuar com o efeito “*keyhole*” [3]. Nestes processos, pode haver ou não a adição de material, e há uma maior independência da taxa de fusão do arame adicionado em relação a energia utilizada. Esta propriedade permite uma maior atuação do processo de soldagem na geometria da solda, porém, geralmente esses processos tendem a ter uma produtividade consideravelmente menor [4].

Uma solução moderna para a união de chapas espessas é por meio da soldagem LASER. A energia provida pelo feixe de luz altamente concentrado pode soldar chapas de espessuras de até 24 mm sem a necessidade de chanfro, mantendo uma alta produtividade. Porém da mesma forma que os processos que usam eletrodo permanente, sua capacidade de união de gaps é limitada, tornando difícil absorver grandes variações de gaps na junta a ser soldada [5].

Tendo em vista as limitações apresentadas pelos processos individuais e sendo visível a complementariedade entre eles, surgiram os processos híbridos: LASER-MIG, LASER-TIG, TIG-MIG, Plasma-MIG, LASER-FSW, entre outros. Os processos híbridos podem ser definidos como a associação física de dois processos, a fim de aliar as vantagens de cada um dos processos individuais [6].

No tocante ao processo híbrido LASER-MIG, em 2002, a Volkswagen já o utilizava para soldagem de algumas partes de automóveis [7]. Apesar de sua grande promessa no setor metal mecânico, este processo tem uma grande limitação no quesito investimento e portabilidade. Normalmente, para ser viável, são necessárias produções em larga escala e que tenham continuidade, dificultando também a aplicação em campo. Não obstante, o processo híbrido Plasma-GMAW é sugerido como uma alternativa viável, de mais fácil portabilidade, e investimento consideravelmente menor.

Na década de 1980, no seu surgimento, o processo híbrido Plasma-MIG (também conhecido como Plasma-GMAW) era realizado em uma única tocha, com o arame MIG passando através do eletrodo anular plasma, no entanto, devido as características construtivas desse tipo de tocha, a parametrização do processo é limitada, não abrindo muito espaço para sua aplicação industrial [8].

Apenas em 2007, a empresa PLT (Plasma Laser Technologies) introduziu ao mercado o processo Plasma-MIG serial. Este processo tem disposição semelhante ao Laser-MIG, porém nesse caso há a presença de dois arcos elétricos atuando simultaneamente. O arco plasma funde o metal base formando uma cavidade, dependendo da energia utilizada esta é denominada *keyhole*, enquanto o processo MIG faz a adição de material com a fusão do arame consumível [9].

Diferente de outros processos já consolidados na indústria e na pesquisa, o processo Plasma-GMAW serial foi introduzido, porém sua gama de aplicações e configurações possíveis foi muito pouco explorada pelo fabricante, sendo disponível bibliografia sobre este processo apenas para aplicações específicas, detalhando muito pouco e de forma muito generalista o seu modo de atuação/funcionamento. Dessa forma, está em aberto muito espaço para a pesquisa em cima desse método.

Vale enfatizar que a resultante do processo não é uma simples combinação de variáveis elétricas aplicadas em cada fonte, a vaporização metálica, a condutividade elétrica dos plasmas, a resultante das forças elétricas e magnéticas atuantes formam uma interação única e complexa, sensível aos parâmetros aplicados. A ausência de linearidades, proporcionalidades e elevada interação entre os componentes do sistema eletrodos-arco-poça presentes já nos processos individuais são multiplicadas nos processos híbridos, haja vista também o surgimento de parâmetros geométricos relativos entre os processos individuais.

Configurar um processo de soldagem individualmente pode ser árduo o suficiente, principalmente os processos mais modernos, que podem exigir uma série de configurações mecânicas e elétricas para o seu bom funcionamento. A configuração de um processo híbrido, por sua vez, é ainda mais complexa, pois uma leve alteração em um dos processos interfere em todo o conjunto de atuação [10].

A otimização de um processo de soldagem através da “tentativa e erro” é algo comum. Porém, considerando o apresentado, a otimização de um processo híbrido utilizando exclusivamente esse método apresenta elevada dificuldade, podendo ser considerada inviável por alguns autores [10], o que torna necessário um avançado entendimento do processo híbrido antes de sua parametrização à uma aplicação específica, e justifica as investigações a seu respeito.

1.1 Objetivo geral

Com base nos dados apresentados, o objetivo geral deste trabalho é a análise do processo híbrido Plasma-MIG serial. Pretende-se adquirir conhecimento sobre a influência de técnicas aplicadas nos processos individuais sobre o resultado hibridizado, além do estabelecimento de uma base tecnológica aplicativa/operacional.

1.2 Objetivos específicos

Para consecução do objetivo geral, alguns objetivos específicos foram traçados, sendo estes:

- Estudar a presença e atuação dos campos eletromagnéticos presentes no processo;
- Verificar as interações físicas resultante do arco plasma e o MIG convencional e sua variante MIG-pulsado;
- Reproduzir parâmetros da literatura, no sistema integrado do LABSOLDA;
- Verificar os modos de transferência metálica sob atuação de diferentes parâmetros;
- Verificar a influência dos parâmetros de plasma na penetração e geometria do cordão de solda;
- Analisar o comportamento da poça de fusão perante diferentes configurações de soldagem;
- Aplicar o processo na soldagem de chapas espessas (até 12,7 mm) e realizar breve comparação com os processos concorrentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BASES TECNOLÓGICAS

2.1 Novas tecnologias MIG

Mesmo tendo em vista as possíveis classificações denominadas pelo IIW (Instituto Internacional de Soldagem), o avanço do controle e automação das fontes eletrônicas tiristorizadas e subsequente transistorizadas permitiu o desenvolvimento de formas de onda que possam controlar a transferência metálica, culminando em diversas novas possibilidades de transferência metálica. Posto isso, Ponomarev et al [11] propuseram uma nova possibilidade de classificação para os tipos de transferência metálica, denominando os métodos de transferência metálica convencionais como “naturais” e os mais novos métodos como transferência “controlada” ou “combinada”, como pode ser observado no diagrama da Figura 1.

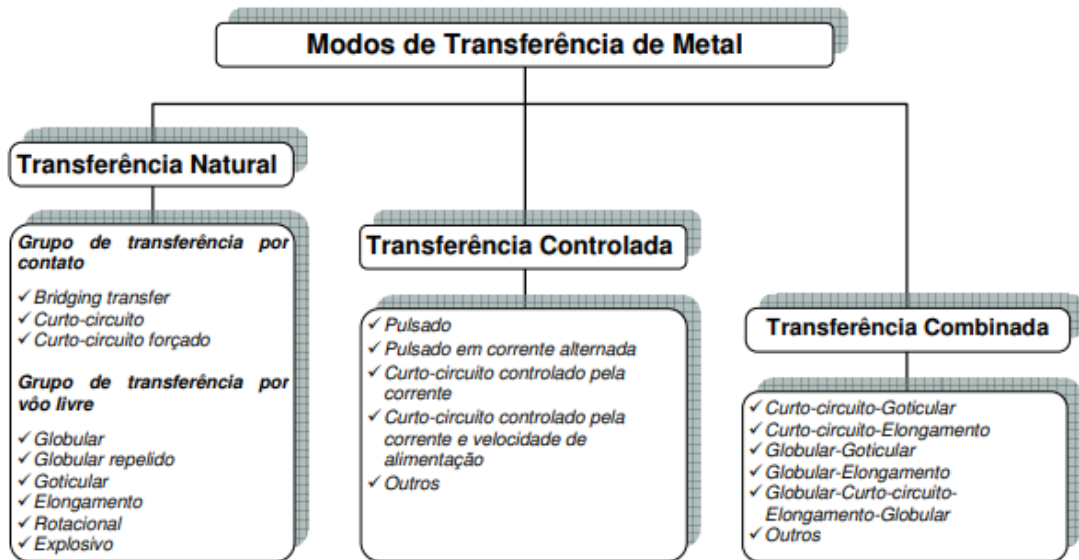


Figura 1 – Classificação dos tipos de transferência metálica segundo Ponomarev et al [11].

Dentro do contexto do presente trabalho, a transferência metálica em voo livre é enfocada.

2.1.1 Transferência Metálica por Voo Livre

A transferência metálica por voo livre ocorre quando o arco elétrico fornece energia suficiente para o arame-eletrodo ser fundido e a gota formada na ponta do arame ser expelida em direção a poça fundida através do efeito eletromagnético. Neste tipo de transferência é comum a utilização de elevadas correntes (acima de 200 A). Dentre os tipos de transferência por voo livre, pode-se destacar a goticular, globular e pulsada.

O modo goticular, mais conhecido pela sua denominação em inglês *spray*, é caracterizado pela transferência de pequenas gotas com diâmetro aproximado ao do eletrodo, de forma sequencial e em alta frequência, conforme ilustra Figura 2 [12].

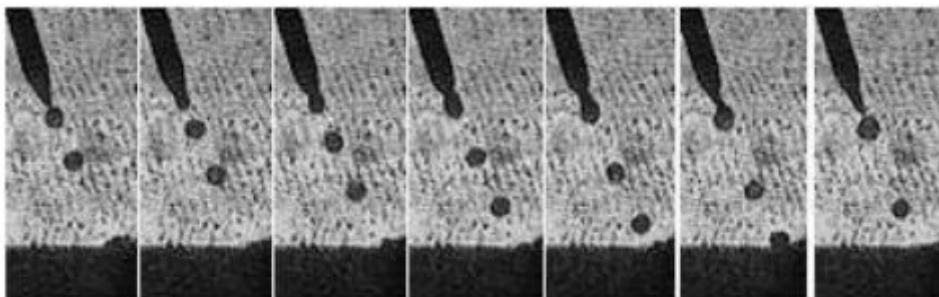


Figura 2 – Ilustração da transferência metálica no modo goticular [13].

Um fator importante para transferência goticular é a chamada corrente de transição. A mesma se trata de uma corrente teórica a partir da qual a transferência metálica passa a realizar

a transferência por voo livre. Devido ao seu comportamento intrínseco, os oscilogramas de corrente e tensão nesse modo tendem a apresentar comportamentos poucas oscilações [14], conforme Figura 3.

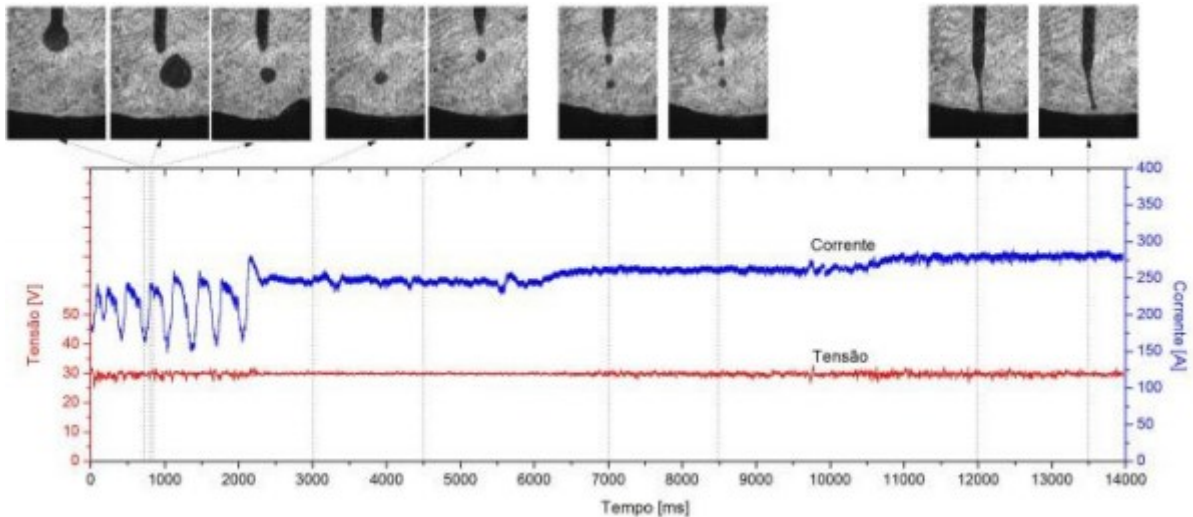


Figura 3 – Ilustração dos oscilogramas de corrente e tensão durante a transferência pelo modo gótico [15].

Uma variante do modo gótico é o modo gótico com alongamento (*streaming*). Nesse modo, a corrente fornecida no processo é elevada de modo que a atuação do arco elétrico não se concentra na ponta do eletrodo, escalando o mesmo e atingindo porções superiores do eletrodo, de forma a buscar uma maior área de contato para a transferência dos elétrons. Como resultado, o eletrodo é alongado, a transferência metálica ocorre em maior frequência e as gotas são menores [16], conforme ilustra Figura 4.

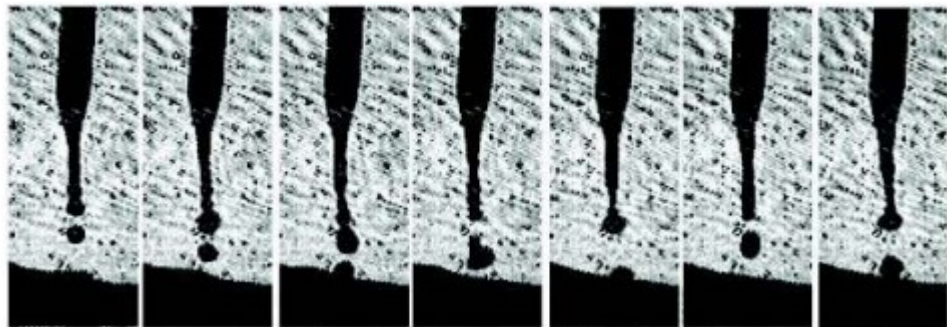


Figura 4 – Ilustração da transferência metálica no modo gótico com alongamento [13].

Outra variante da transferência gótica é o modo rotacional. Nesse modo, as correntes são elevadas de forma que além do alongamento obtido no eletrodo, o efeito da instabilidade *pinch* é relevante, ou seja, a força eletromagnética induzida pelo fluxo de carga é tal que o vetor força que está em direção ao centro do arco elétrico é desbalanceado, ocasionando a rotação do eletrodo durante sua fusão [17], como pode ser observado na Figura 5.

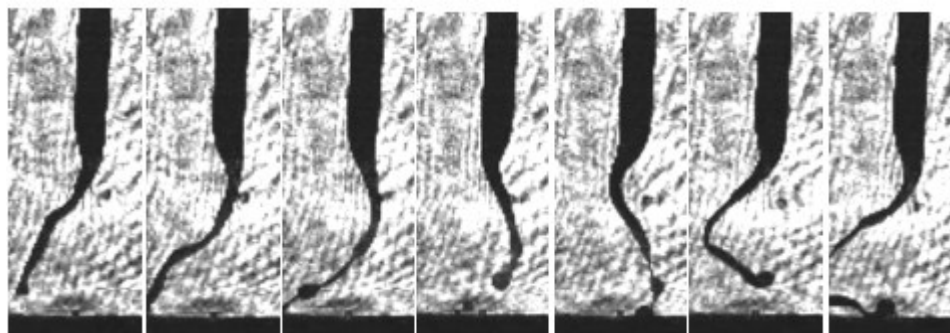


Figura 5 – Ilustração da transferência metálica no modo goticular rotacional [13].

Ainda com relação a transferência por voo livre, pode ser citado a transferência pulsada. A mesma que originalmente foi criada através do controle da corrente durante o processo buscando uma transferência goticular, porém operando em níveis de corrente média próximo ao do curto-circuito. De forma a se obter um maior controle da transferência metálica. Esta transferência é obtida com a utilização de dois níveis de corrente de soldagem distintos, denominados corrente de base (I_b) e corrente de pulso (I_p), sendo que cada uma possui o seu respectivo tempo de duração, tempo de base (t_b) e tempo de pulso (t_p) [18]. A Figura 6 mostra um oscilograma de corrente bem como as variáveis envolvidas no GMAW Pulsado.

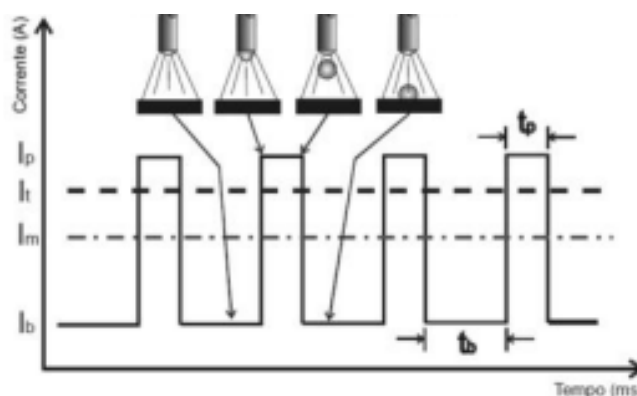


Figura 6 – Ilustração da transferência metálica no modo pulsado [14].

2.1.2 Variantes Modernas do Processo GMAW para alta penetração

Devido aos avanços tecnológicos em controle e fontes de soldagem, uma série de novas técnicas de soldagem foram criados. E como cada fabricante adicionou uma particularidade ao seu processo, uma série de patentes foram desenvolvidas, e nomes novos foram incorporados aos processos [19]. O anexo A, mostra uma grande variedade dos novos processos bem como os seus fabricantes e nomes comerciais.

Dentre os processos modernos, pode-se destacar aqueles denominados spray modificados ou spray pulsado (do inglês *modified spray arc/pulsed arc spray*), que são os que utilizam

o controle de indutância e controle eletrônico da fonte de soldagem para conseguir atingir um arco do tipo spray usando altas correntes de soldagem e altas velocidades de alimentação, porém com baixa tensão e comprimento de arco reduzido. Esse tipo de soldagem permite um efeito físico na poça de fusão, semelhante ao que acontece no caso da soldagem *keyhole*, aqui comumente conhecido como *burried arc*. A Figura 7 e Figura 8 Ilustram o efeito teórico e prático respectivamente, do arco atuando no modo *burried arc* em comparação ao spray convencional.

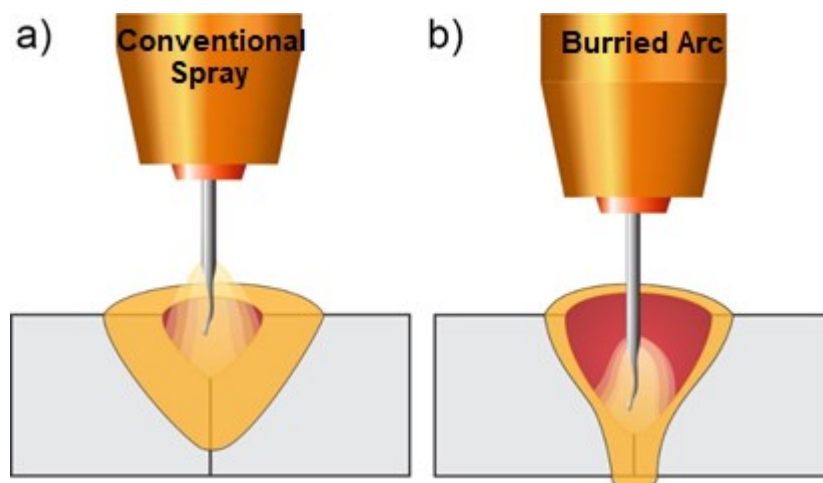


Figura 7 – Comparação entre GMAW spray convencional (a) e GMAW burried Arc (b).

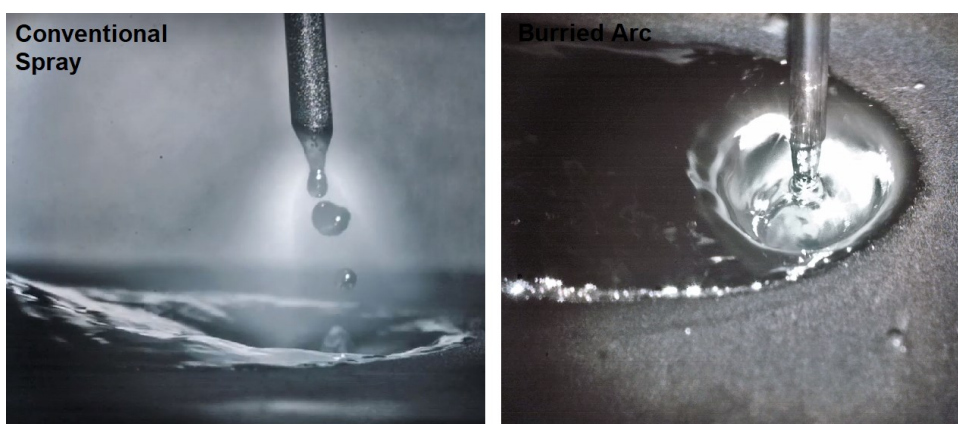


Figura 8 – Comparação entre GMAW spray convencional (esquerda) e GMAW burried Arc (direita) imagens confeccionadas no LABSOLDA.

A atuação do processo na forma *burried arc* permite que o arco elétrico atue nas camadas inferiores à superfície, tendo uma maior incidência na sua camada sólida inferior a poça de fusão. Ao mesmo tempo, o comprimento de arco reduzido tem o efeito de concentrar mais o calor emitido pelo arco elétrico, automaticamente otimizando a penetração. Vale considerar que mesmo utilizando menor comprimento de arco, os parâmetros da fonte são regulados de forma a se aumentar a estabilidade do processo, evitando eventos de curto-circuito e respingos, como pode ser visualizado na Figura 9 [20].

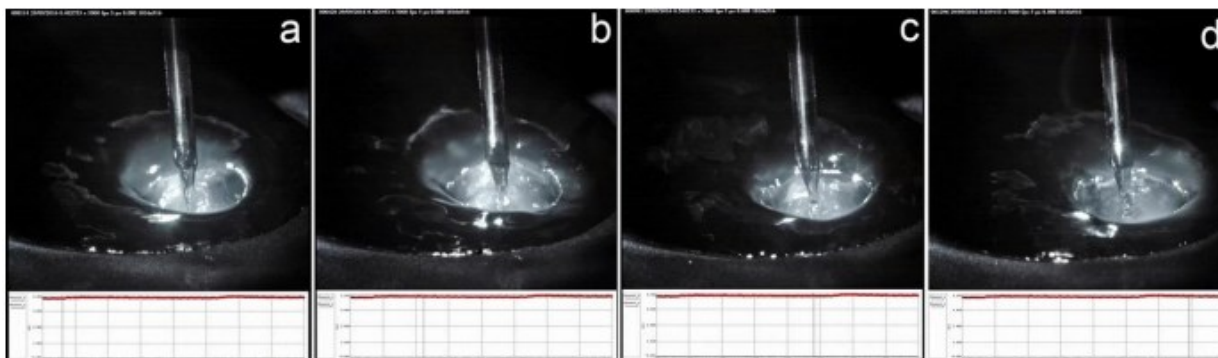


Figura 9 – Filmagem em alta velocidade do processo *Burried Arc* otimizado pelo controle de indutância da fonte (Ks 100, Kd 1) [20].

Dentre os processos patenteados pelos fabricantes como spray modificados para alta performance podemos destacar: Deep Arc - Merke; Force Arc – EWM; Rapid Weld – Cloos; High Penetration Speed – Oerlikon; Pulse Controlled Spray – Fronius; Power Arc – MIGAtronic; entre outros. Algumas das soldas oriundas desses processos estão ilustradas na Figura 10, segundo imagens retiradas do catálogo do fabricante, as mesmas atingem penetrações de aproximadamente 5 mm para as condições propostas.

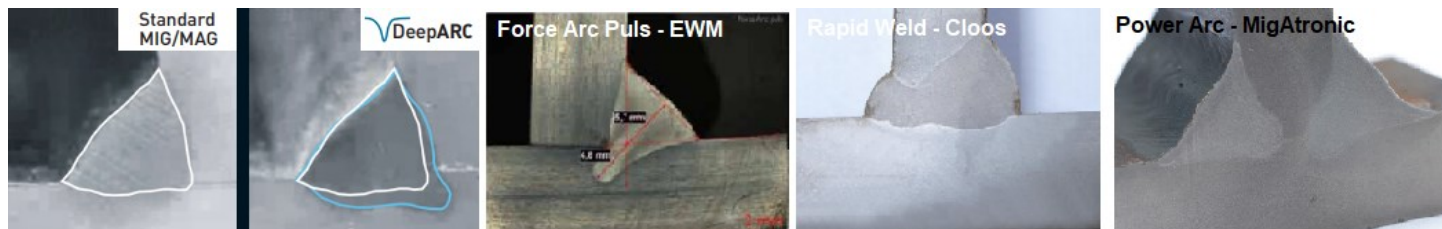


Figura 10 – Soldas em juntas em T pelos respectivos processos DeepArc-Merke, ForceArcPuls-EWM, RapidWeld-Cloos, PowerArc, MIGatronic, em comparação com GMAW convencional (esquerda). Imagens retiradas dos catálogos dos respectivos fabricantes.

2.2 Fundamentos da Soldagem Plasma e suas Tecnologias

O processo de soldagem Plasma, da sigla em inglês PAW – *Plasma Arc Welding*, pode ser considerado uma evolução do processo TIG (Tungsten Inert Gas), também denominado GTAW (*gas Tungsten arc welding*). Devido à ambos os processos serem caracterizados pela presença de um eletrodo não consumível de tungstênio que será responsável pela emissão de elétrons, ionizando a atmosfera gasosa protetora envolta à região de interesse, produzindo assim um arco elétrico que será direcionado para efetuar a fusão da peça. A principal diferença, é que no caso do processo PAW, o eletrodo é confinado pelo denominado bocal constritor, resultando

em um efeito de compressão do arco elétrico e automaticamente produzindo um arco elétrico com energia mais concentrada. Os parâmetros adicionais, em relação ao processo GTAW, que podem ser encontrados na soldagem Plasma são: recuo do eletrodo (em relação ao bico constritor), diâmetro do orifício constritor e vazão de gás de plasma. A Figura 11 apresenta uma comparação entre os bocais para o processo GTAW e Plasma.

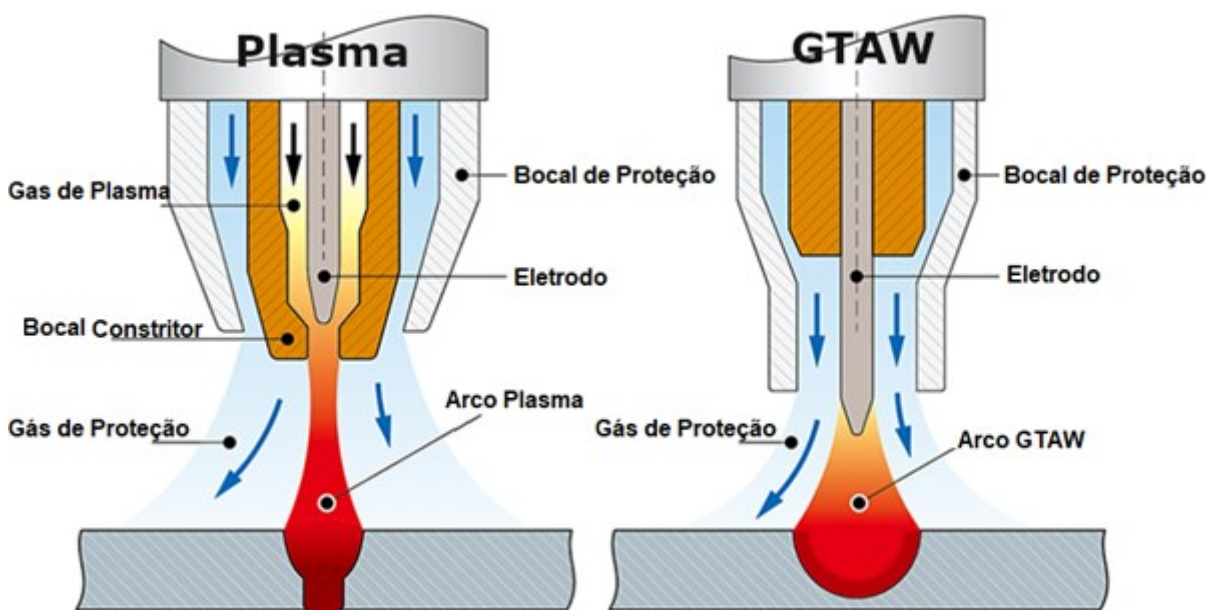


Figura 11 – Elementos que compõem as tochas Plasma (esquerda) e GTAW (direita).

A origem do nome do processo Plasma é oriunda do conceito de “um gás quando aquecido a uma temperatura elevada, e suficientemente ionizado, pode conduzir eletricidade e ser capaz de sustentar um arco elétrico”. Na realidade outros processos a arco utilizam-se do plasma, porém ao ponto que o processo PAW foi desenvolvido, outros processos não conseguiam obter tal nível de densidade de energia, dessa forma, o processo acabou sendo patenteadado com o nome que dá origem ao gás ionizado [6].

As vantagens da utilização do processo Plasma sobre o processo GTAW, são àquelas intrínsecas ao fato da maior concentração de energia proporcionada pelo processo Plasma, sendo elas: menor distorção térmica durante a soldagem, possibilidade de soldar em maiores velocidades, maiores taxas de penetração além de maior vida útil do eletrodo [21].

O processo de soldagem plasma pode ser separado em duas técnicas, o *melt-in* e o *keyhole*. A soldagem denominada *melt-in* ou soldagem plasma convencional, é obtida quando há uma menor constrição do arco, combinado com o uso de menores correntes, geralmente entre

abaixo de 200 A. Nesse modo, o metal abaixo do arco elétrico é fundido, e o arco incide diretamente na poça de fusão, aquecendo o líquido já fundido e incrementando a fusão de forma mais radial. Como resultado, é obtido uma poça de fusão mais estável e um cordão de solda mais suave [21].

Já durante a soldagem *keyhole*, o arco é mais constricto, exercendo uma forte pressão sobre a poça de fusão. Dessa forma, a medida que o arco realiza a fusão, o metal líquido se movimenta contrário a direção de soldagem, para que uma nova porção sólida possa ser fundida. Esse fenômeno potencializa a penetração, de modo que o arco Plasma “cava” a peça podendo ser verificado uma cavidade profunda abaixo da região de atuação do arco elétrico, a mesma denominada *keyhole*. existem três tipos de *keyhole*: *blind keyhole*, *unstable open keyhole* e *open keyhole* [21].

Blind keyhole ocorre quando a cavidade abaixo do arco é formada, e o comportamento da poça de fusão e do metal recém fundido seguem o descrito anteriormente, porém não há a penetração total através da peça. *Open keyhole* ou *penetrated keyhole* como os nomes em inglês sugere, é quando o *keyhole* tem potência suficiente para atravessar a espessura da peça e o mesmo se mantém ao longo da solda com pequena variação de seu tamanho. Já *Unstable open keyhole* ocorre quando durante a soldagem, há uma oscilação entre os formatos *blind* e *penetrated keyhole*, algumas vezes essa oscilação é proposital, de forma a garantir características específicas para o processo, ou também pode ser oriunda de instabilidade no controle do *keyhole* completo [21].

Um dos fatores mais importantes para a soldagem Plasma-*keyhole* é a pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão, que não é um parâmetro que pode ser diretamente regulado, mas pode ser aumentado ou reduzido conforme a combinação dos parâmetros utilizados no processo. A constrição física por exemplo, aumenta a pressão do arco, e pode ser obtida pelo aumento no recuo do eletrodo, ou redução no diâmetro do orifício constritor. Outra forma de aumentar a pressão do arco elétrico, é através do aumento da corrente de plasma, ou aumento da vazão do gás de plasma.

Entretanto, é necessário ter cautela em elevar excessivamente a pressão do arco, pois pode haver um desbalanço entre a mesma e a taxa de fusão, resultando em cordões de solda com geometrias indesejadas ou até mesmo o aparecimento de defeitos de soldagem como por exemplo excesso de porosidade, mordedura ou o *humping* [22] [23], conforme exemplos indicados na Figura 12.

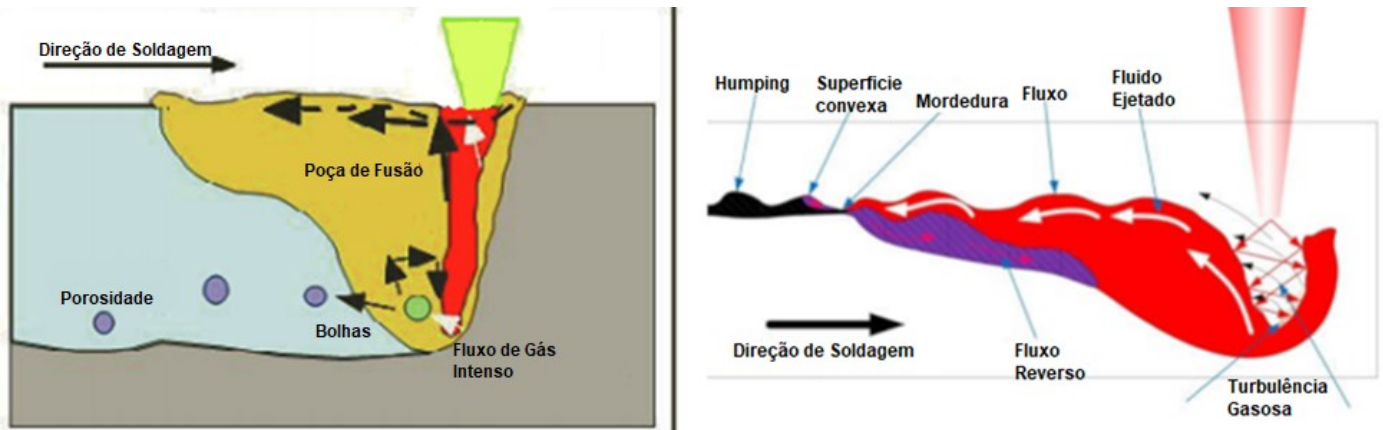


Figura 12 – Ilustração do mecanismo de possíveis defeitos de porosidade (esquerda) e *humping* (direita) na soldagem plasma.

Esses defeitos ocorrem principalmente, pois a porção que está em fase de fusão ligeiramente a frente ao arco elétrico tende a avançar no sentido contrário ao sentido de soldagem, contornando o arco elétrico, em direção a poça de fusão (que é deslocada em relação a posição do arco), gerando uma resultante das forças atuantes na poça da forma mostrada na Figura 13 consequentemente, acarretando em elevada turbulência na poça.

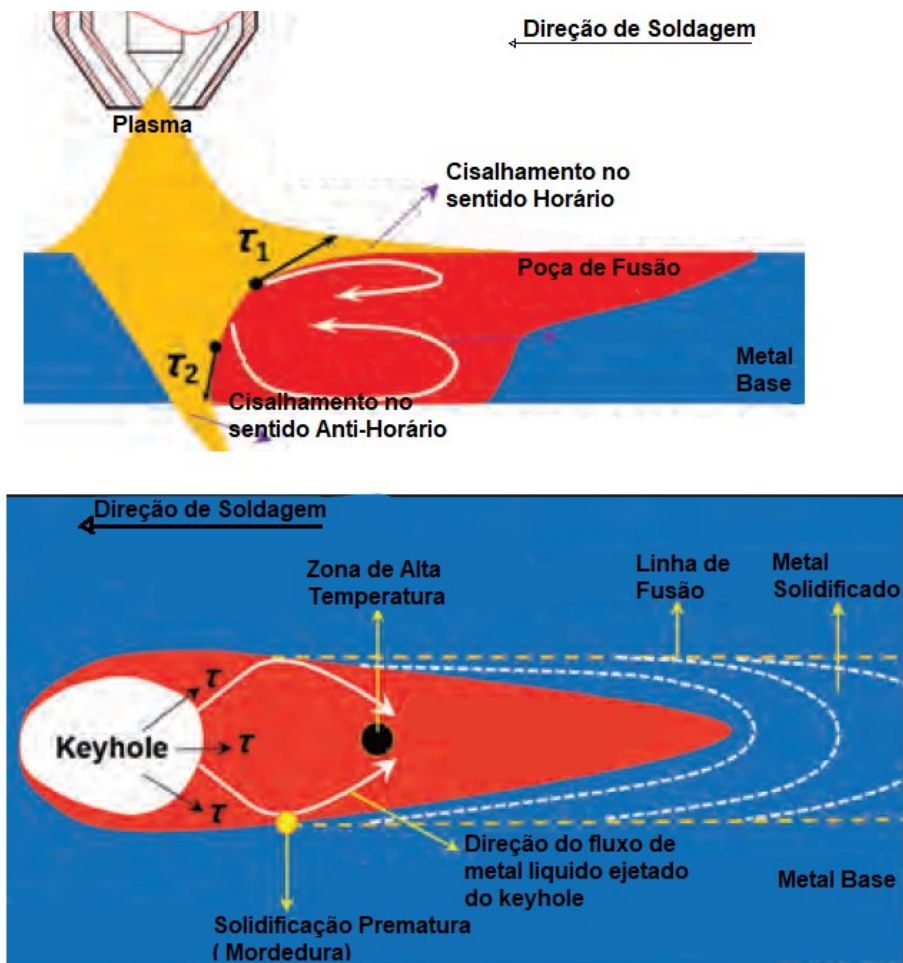


Figura 13 – Esquemático da atuação das forças exercidas pelo arco plasma na poça de fusão nas vistas lateral e superior respectivamente [24].

2.3 Fundamentos da Soldagem Híbrida Plasma-GMAW

A palavra “híbrido”, no seu significado etimológico, significa a união ou cruzamento de dois ou mais elementos, para a formação de um terceiro elemento, peculiar, com características intermediárias aos elementos unidos.

Assim como qualquer processo de fabricação, os diversos processos de soldagem existentes apresentam suas vantagens e limitações e uma forma de criar um processo que associe essas vantagens, é a combinação de dois ou mais processos. Em soldagem, tem-se os processos conhecidos como “Tandem”, cuja característica é o uso de dois ou mais processos em associação simples, ou seja, não há a hibridização dos processos, mas sim os dois processos atuando concomitantemente [25].

Semelhante aos processos Tandem, quando duas técnicas atuam simultaneamente sobre a mesma zona, com correlação mútua entre si, o mesmo pode ser considerado um processo híbrido. Nesse contexto, o Plasma-MIG, ou Plasma-GMAW, é um exemplo de processo híbrido de soldagem, visto que se trata da união de dois arcos elétricos, com características individuais diferentes, que quando atuando em conjunto tem direta correlação entre eles [26]. Essa união permite aliar a vantagem do aquecimento concentrado gerado pelo arco Plasma, com a capacidade de preenchimento do processo GMAW.

Fundamentalmente, o processo Plasma-GMAW é caracterizado no fato dos eletrodos consumível e não consumível bem como suas respectivas poças de fusão e arcos elétricos resultantes estarem envoltos de uma corrente de gás termicamente ionizado, atuando simultaneamente [27].

A primeira concepção de processo híbrido Plasma-GMAW, foi criada na década de 1950, por Yenni [28], na qual o arame-eletrodo do arco GMAW era incidido perpendicularmente no arco plasma (Figura 14-A). Mais tarde, na década de 1970, uma outra concepção foi desenvolvida, ao invés da alimentação do arame GMAW pela lateral do arco, o arame era alimentado pelo centro da tocha, passando através do bocal plasma, sendo que o eletrodo de tungstênio permanecia descentralizado com relação ao centro da tocha, para abrir espaço para o arame GMAW, como pode ser visualizado na Figura 14-B [29].

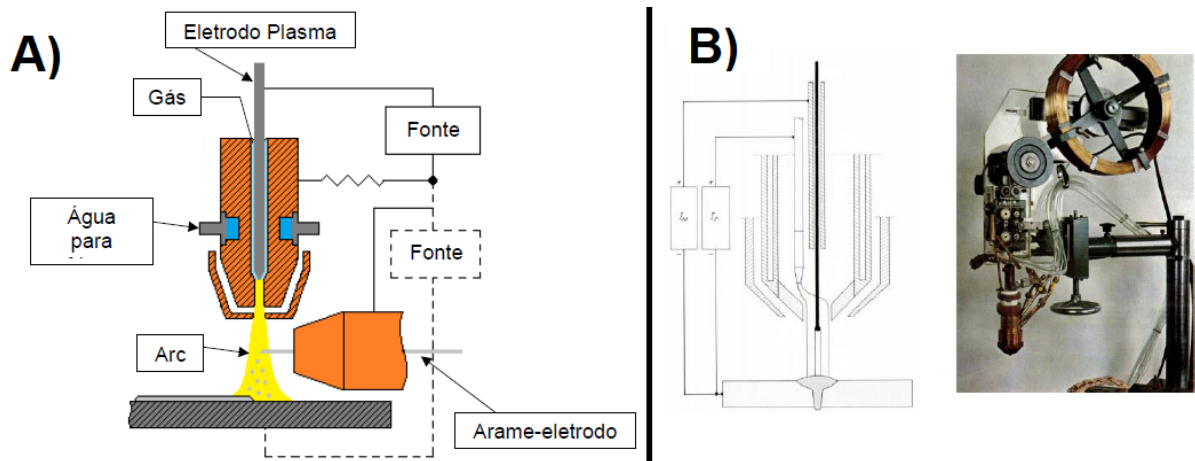


Figura 14 – Esquemático das primeiras concepções de processo híbrido Plasma-GMAW [29].

A partir dessas configurações iniciais, outras concepções de tochas foram surgindo, diferenciando-se entre si, principalmente pela disposição e formato do eletrodo não consumível em relação ao eletrodo consumível, cada qual resultando em características únicas na interação dos arcos Plasma e GMAW, bem como nos modos de transferência metálica resultantes, sendo que nos dias atuais existem dois principais tipos de tocha relativamente difundidos na indústria e no meio científico: a coaxial e serial [30].

2.3.1 Plasma-MIG Coaxial

O processo Plasma-MIG coaxial, também conhecido por plasma-MIG anular, ou plasma-MIG com eletrodos concêntricos, é caracterizado pelo arame-eletrodo consumível ser alimentado em direção a peça, passando concentricamente pelo eletrodo não consumível de cobre, em seu formato anular. Os eletrodos ficam dispostos coaxialmente, daí fica evidente a relação dos nomes dado ao processo com a disposição dos eletrodos no mesmo. A Figura 15 mostra um esquema da tocha para esse processo, destacando seus principais componentes.

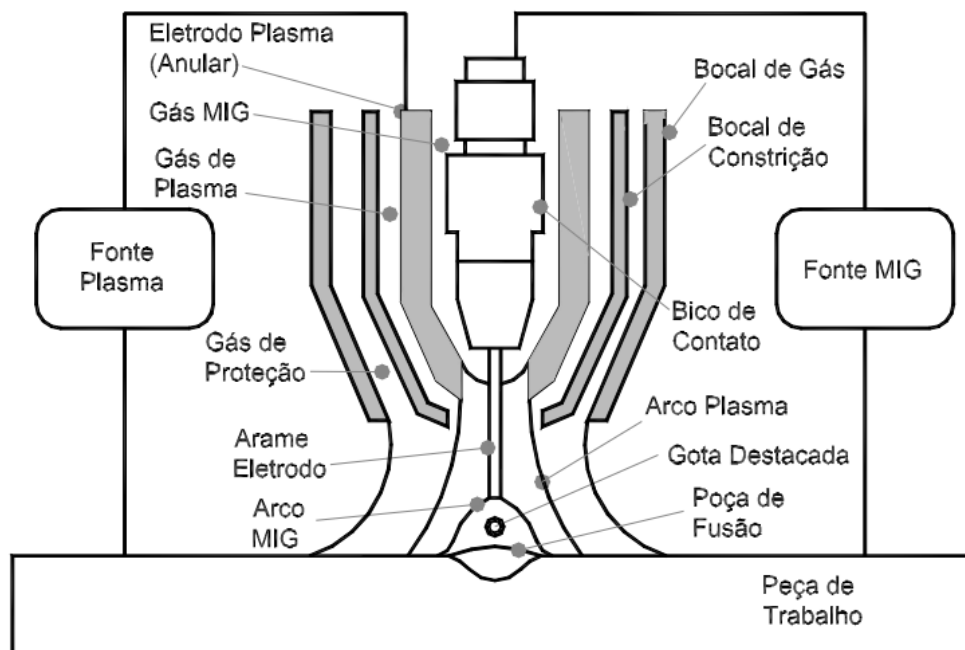


Figura 15 – Esquema da tocha de soldagem no caso do processo Plasma-GMAW Coaxial [29].

Esse processo foi extensivamente estudado por OLIVEIRA [4] e RESENDE [31] em seus trabalhos de doutorado, onde puderam chegar a uma série de conclusões a respeito desse processo, tais como: tipo de transferência metálica, características térmicas, modelo e interação elétrica, forças envolvidas e a influência dos parâmetros de processo, sendo que suas descobertas permitiram estabelecer uma ótima base científica para o presente estudo.

Precipuaemente, o processo Plasma-MIG coaxial não pode trabalhar com os eletrodos em polaridades opostas devido a repulsão inerente as forças elétricas presentes. Por conseguinte, o processo deve funcionar com ambos os eletrodos em polaridade positiva, ou negativa. Estudos conduzidos por OLIVEIRA [4] mostraram que o processo é tecnicamente mais viável em termos de estabilidade e repetitividade quando ambos os eletrodos trabalham em polaridade inversa (eletrodo positivo ou CC+), pois o eletrodo MIG em polaridade direta ocasiona severa instabilidade no processo em termos de transferência metálica.

À vista disso, o processo Plasma-MIG coaxial apresenta uma limitação em termos de quantidade máxima de corrente que é possível aplicar no eletrodo plasma. Devido a polaridade de trabalho ser a positiva, o desgaste no eletrodo é muito mais intenso, sendo que a aplicação de elevadas correntes tornaria o processo inviável devido a constante reposição que seria necessária no eletrodo. Logo, mesmo havendo a combinação de dois arcos, a potência máxima do processo é limitada [31].

Outra limitação, ainda, é a faixa operacional de trabalho de ambos os processos. Uma vez que o eletrodo-aramé MIG passa por dentro do eletrodo anular plasma, a combinação dos

dois processos tem influência mais direta, ou seja, a variação dos parâmetros de plasma tem que ser acompanhada por uma variação relativamente proporcional nos parâmetros do GMAW para que o processo seja crível. Aliado ao fato da corrente de plasma apresentar um patamar máximo, contribui na limitação do processo.

A fim de tentar contornar as limitações apresentadas, a concepção de uma nova tocha de soldagem para o processo Plasma-GMAW foi criada, a tocha do tipo serial.

2.3.2 Plasma-MIG Serial

Em meados de 1995, a empresa PLT (Plasma Laser Technologies) desenvolveu a tocha para o processo híbrido Plasma-GMAW do tipo serial. Nesse caso, os eletrodos estão dispostos em série, sendo que o eletrodo Plasma gera o arco isoladamente iniciando a fusão da peça de trabalho, e o arame-eletrodo GMAW atua na mesma poça de fusão, após o eletrodo Plasma. Do contrário do processo coaxial, nesse caso o eletrodo é configurado na forma cilíndrica, assim como no processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). A premissa inicial para a criação dessa tocha, é a maior independência dos parâmetros do Plasma em relação aos do GMAW, o que no processo coaxial apresenta maior restrição [32].

De modo geral, o arco plasma inicia a fusão formando uma cavidade na peça de trabalho, a mesma que poderá atuar ou não no modo *keyhole* de acordo com a parametrização imposta no processo Plasma. Concomitantemente, o arco GMAW contribui na fusão da mesma poça ao tempo que fornece metal de adição. A Figura 16 mostra a configuração da tocha Plasma-GMAW do tipo serial, bem como a posição dos arcos Plasma e GMAW em relação a poça de fusão.

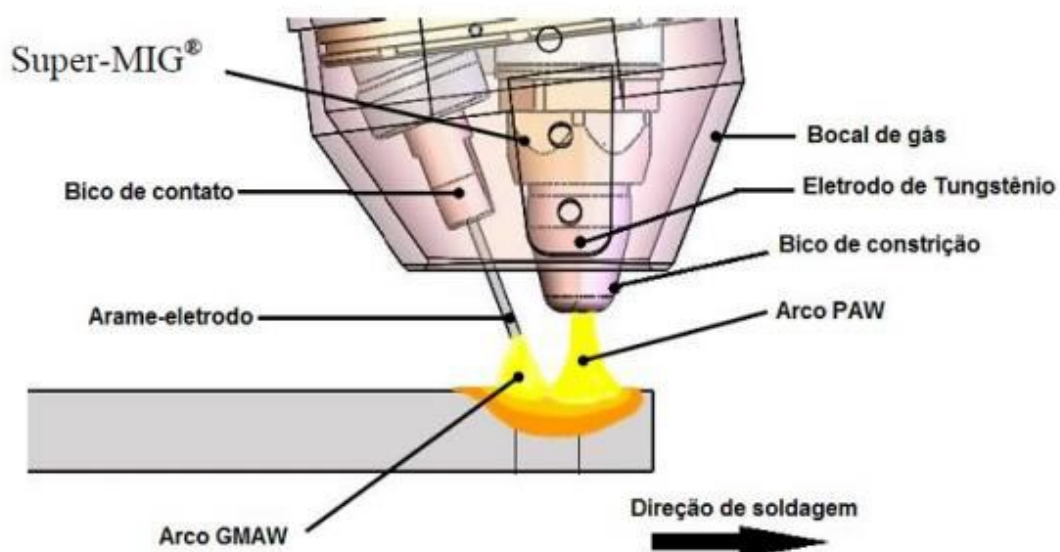


Figura 16 – Esquema da tocha de soldagem no caso do processo Plasma-GMAW Serial (PLT, 2014).

Ao contrário da tocha coaxial, cujo arco Plasma envolve o arco GMAW, resultando em uma atuação combinada na poça de fusão, no processo serial os arcos atuam em regiões relativamente distintas durante a soldagem, sendo que a intersecção entre os arcos se dá em apenas uma pequena interface da poça de fusão.

Ainda em contraste ao processo coaxial, cujas aplicações até então estudadas, são focadas em operações de brasagem e na soldagem de ligas especiais. A premissa proposta pelo fabricante para o processo serial, é a soldagem de alta potência, visando a aplicação do processo em chapas espessas, sendo que sua construção foi focada inicialmente de forma a soldar juntas com características intermediárias ao que se é aplicado comumente aos processos Plasma e GMAW individualmente.

Isto é, no processo GMAW é comum preparar a junta a ser soldada com chanfro de elevado grau e até presença de espaçamento entre as peças a serem soldadas. Já na soldagem Plasma, é comum a soldagem de peças sem espaçamento algum. O processo Plasma-GMAW propões exatamente chanfros de baixo grau e baixo ou nenhum espaçamento entre as peças, vide exemplo na Figura 17.

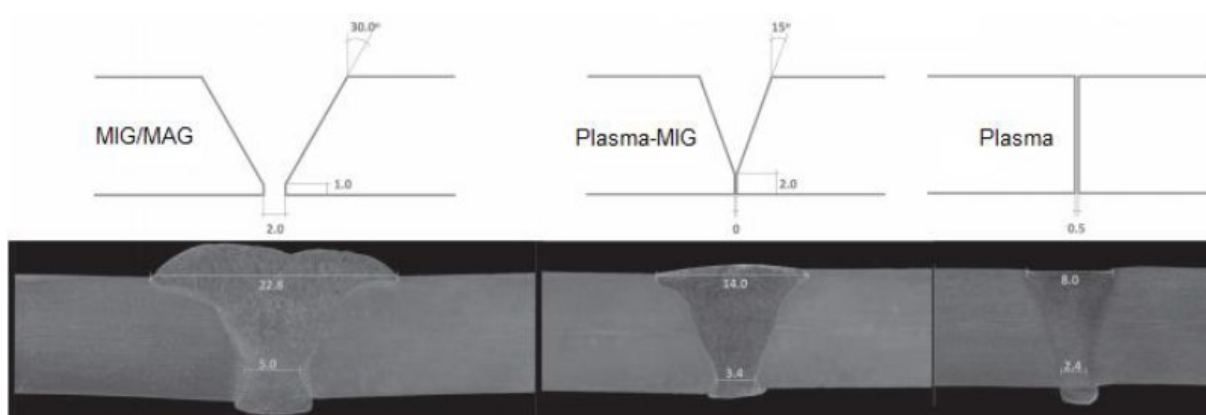


Figura 17 – Comparação entre as geometrias propostas para cada tipo de solda antes da operação de soldagem, e a soldagem resultante das mesmas para os processos GMAW, Plasma-GMAW, e Plasma respectivamente [33].

Utilizando o processo proposto, pode-se atingir velocidades de soldagem superiores às praticadas no processo GMAW, ao mesmo tempo, é possível realizar a soldagem em passe único, como ocorre no processo Plasma, reduzindo consideravelmente o tempo de arco aberto. YURTISIK [33] realiza uma comparação entre os tempos de arco aberto e a quantidade de material de adição necessária nos três processos conforme Figura 18.

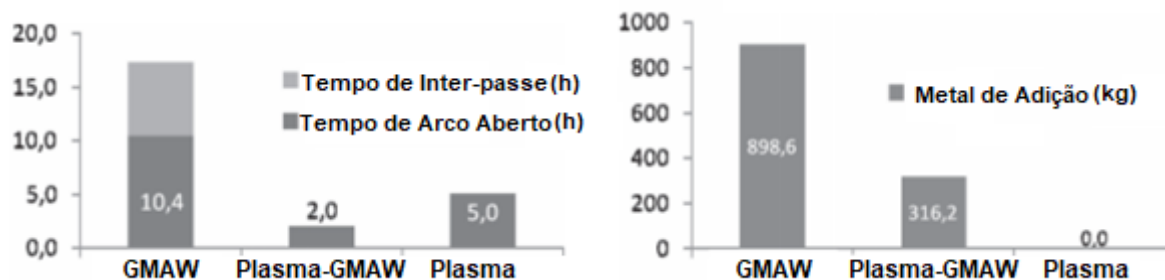


Figura 18 – Comparação dos tempos de arco aberto e quantidade de material de adição utilizado nos três processos GMAW, PAW-GMAW e PAW [33].

2.4 Interações Físicas e Comportamento Elétrico do Processo Plasma-GMAW

2.4.1 Forças Elétricas e Magnéticas Presentes no Processo Plasma-GMAW

O conhecimento das características elétricas e forças eletromagnéticas atuantes em soldagem ao arco elétrico, é essencial para a caracterização da física do processo, uma vez que as mesmas comandam o comportamento do arco elétrico, principalmente no que diz respeito a processos que utilizam eletrodo consumível.

No caso da soldagem híbrida, esse entendimento é primordial, pois os campos magnéticos auto induzidos pelos arcos elétricos, devido à proximidade entre eles, terão efeito mútuo entre si, em especial, quanto à deflexão e área de atuação dos arcos, e suplementarmente, quanto a transferência metálica.

A passagem de uma determinada corrente elétrica através de um meio gera um campo magnético, e o mesmo que é denominado campo magnético auto-induzido. Esse campo magnético tem orientação circular à direção da corrente, e dessa orientação se originam as linhas de campo magnético (Figura 19-A). As linhas de campo, geram um vetor força magnética, que tem como direção o centro do condutor. Sendo assim, conhecendo o sentido da corrente, é possível determinar o sentido das linhas de campo, e do vetor força magnética (Figura 19-B e Figura 19-C) [34].

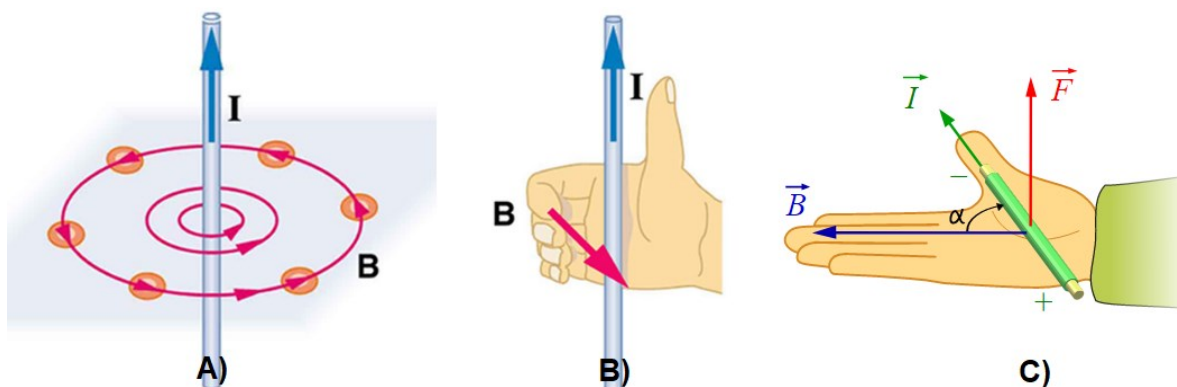


Figura 19 – Ilustração do campo magnético gerado por uma corrente passando em um meio (A) e regra da mão direita para determinação do sentido das linhas de campo e do vetor força (B, C) [34].

Quando uma carga elétrica (q) viaja dentro de um campo magnético, a força magnética será exercida sobre ela. Isso não mudará a aceleração da partícula, mas alterará sua direção, vide Figura 20.

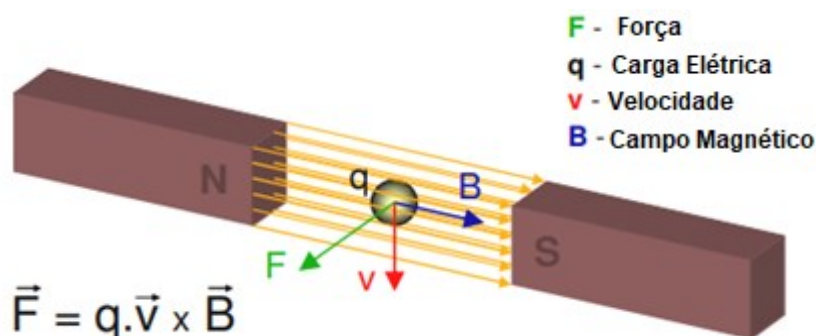


Figura 20 – Força produzida por uma carga elétrica positiva se movendo em um campo magnético. (A força aponta no sentido oposto caso a carga elétrica seja negativa) [35].

Segundo *Biot-Savart*, no domínio da magnetostática, uma corrente que passa através de um condutor, pode gerar um campo magnético, que vai depender do raio da distância entre o vetor corrente e o condutor (r), da corrente aplicada (i), da distância (dz) do condutor e do seno que o vetor campo forma com o vetor corrente, podendo ser colocada conforme a equação (1).

$$dB = \frac{\mu_0 i dz \sen\theta}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Uma outra abordagem para a lei de *Biot-Savart* é toma-la em sua forma reduzida, admitindo que o vetor campo está a 90° do vetor corrente, podendo então ser expressada conforme a equação (2), onde D é a distância entre o vetor corrente e o vetor campo magnético (no caso do processo híbrido é a distância entre os arcos). Esse cálculo também é válido para soldagem,

como pode ser visualizado na Figura 21, quando uma corrente elétrica flui entre o eletrodo e a peça de trabalho, o campo também é gerado.

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot D} \quad (2)$$

Ainda com relação à equação (2), admitimos, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A), sendo que um condutor elétrico na presença de um campo magnético é sujeito a uma força diretamente proporcional à intensidade do campo magnético, e ao comprimento do condutor L_{a2} (no caso do processo híbrido é o comprimento do arco) conforme equação (3).

$$F_2 = I_2 \cdot L_{a2} \cdot B_1 \quad (3)$$

Assumindo o campo magnético que B_1 exerce no arco 2, podemos calcular a força de atração ou repulsão, no arco 2, conforme equação (4), ainda associando com a Figura 21.

$$F_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot L_{a1}}{2\pi \cdot D} \quad (4)$$

Analisando o diagrama da Figura 21 fica claro que quando dois arcos atuam com proximidade suficiente em mesma polaridade, há o fenômeno de atração, quando atuam em polaridades opostas, há o fenômeno de repulsão. Mesmo tendo em vista a relativa complexidade do modelo elétrico apresentado e das forças atuantes, essa é uma solução simplista para o problema, pois as linhas de campo e de força não se comportam de forma linear, logo, a aplicação do modelo, e das equações propostas, servem apenas de base para prever o comportamento resultante dos arcos elétricos.

Essas considerações são de extrema importância no tocante aos processos Plasma-GMAW coaxial e serial. Pois como mencionado, devido a esse fenômeno, o processo coaxial só permite a soldagem com ambos os eletrodos em mesma polaridade, sendo que o contrário, a repulsão entre os arcos, tornaria o processo instável de tal maneira que não seja possível a manutenção da estabilidade dos arcos durante a soldagem [36].

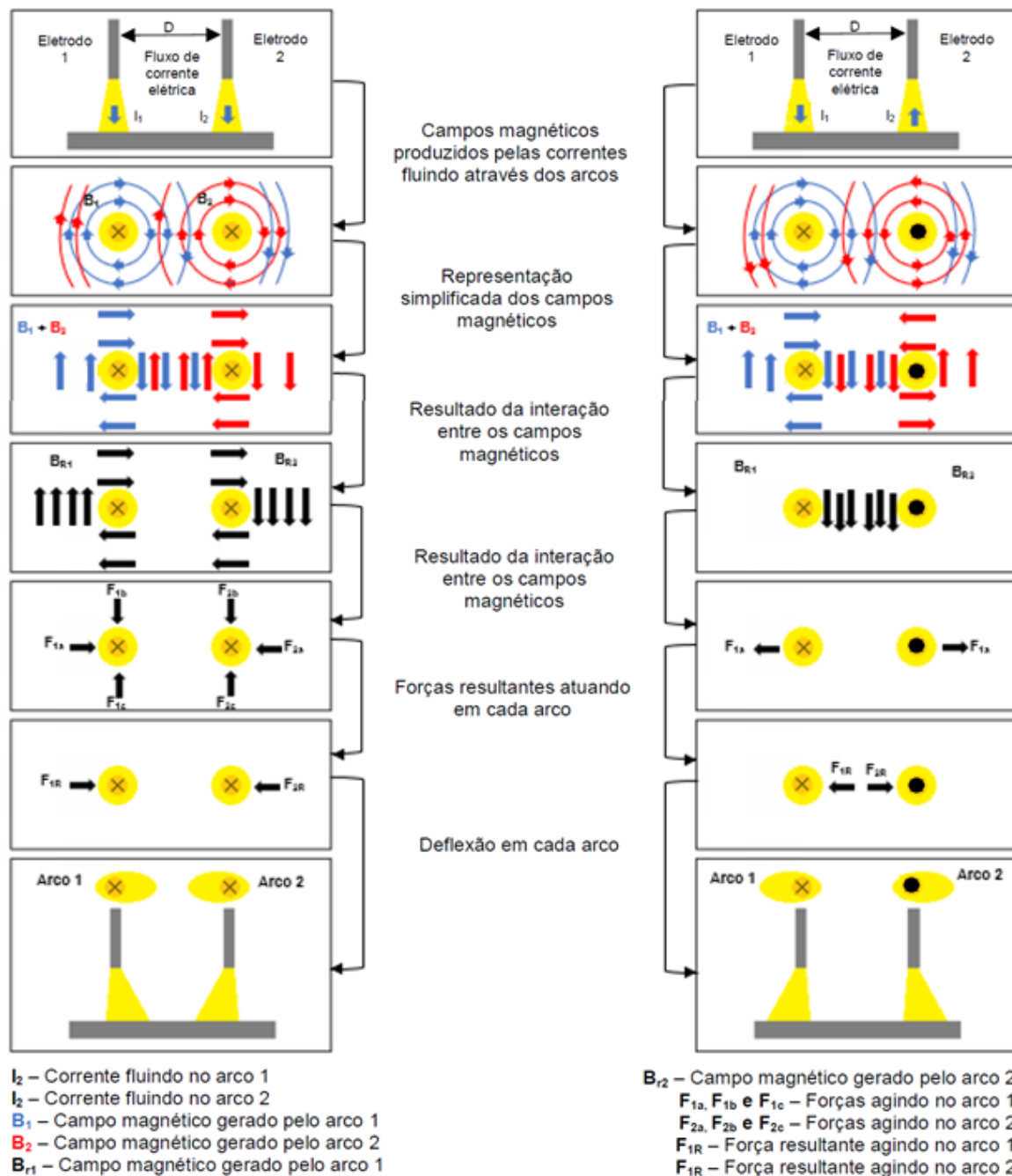


Figura 21 – Diagrama explicando o comportamento da deflexão do arco para diferentes polaridades (esquerda: mesma polaridade - atração; direita: polaridades opostas - repulsão) [35].

Ao contrário da configuração coaxial, na configuração serial, cujos eletrodos estão dispostos em série, existe uma maior autonomia na disposição dos eletrodos, permitindo a aplicação de polaridades opostas. No entanto, devido à elevada força de repulsão entre os arcos elétricos, ainda existe uma distância mínima necessária entre eles.

De forma a solucionar o comportamento repulsivo dos arcos elétricos e ainda assim conseguir manter uma pequena distância entre os eletrodos, o fabricante propôs uma solução única para o processo, que é a aplicação de um campo eletromagnético suplementar na região

intermediária aos eletrodos plasma e GMAW, o mesmo atua no sentido contrário as forças repulsivas, estabilizando a repulsão entre os arcos elétricos como pode ser visualizado na Figura 22.

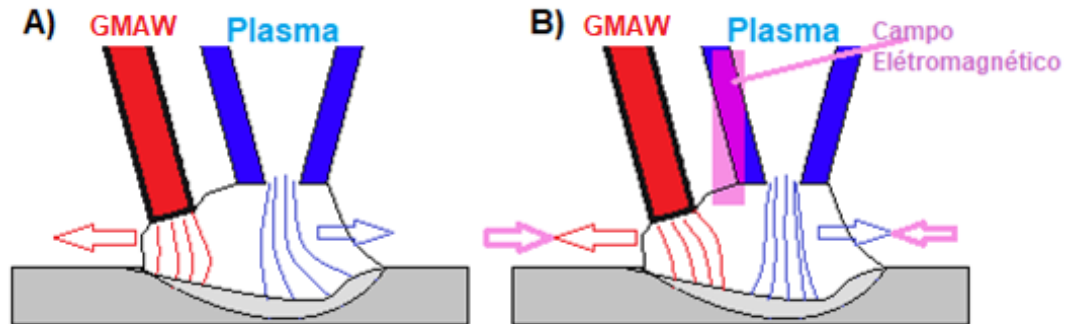


Figura 22 – Ilustração da atuação do campo eletromagnético suplementar (B) nos arcos plasma e GMAW.

Apesar da proposta feita pelo fabricante, a eficácia do campo eletromagnético suplementar é questionável, uma vez que não é apresentado um embasamento teórico conclusivo quanto a sua atuação.

Em trabalho realizado com o processo Plasma-GMAW na configuração serial, YAMANE [37] observou o comportamento dos arcos elétricos na configuração serial, para duas distancias, 15 e 35 mm. Para 35 mm foi verificado que os processos atuam na mesma poça, porém separadamente, descaracterizando a característica híbrida do processo, enquanto que para 15 mm, há uma forte interação elétrica entre os arcos e apenas uma poça, se assemelhando a apresentar praticamente um arco só, a visualização do comportamento dos arcos para essas configurações são apresentados na Figura 23.

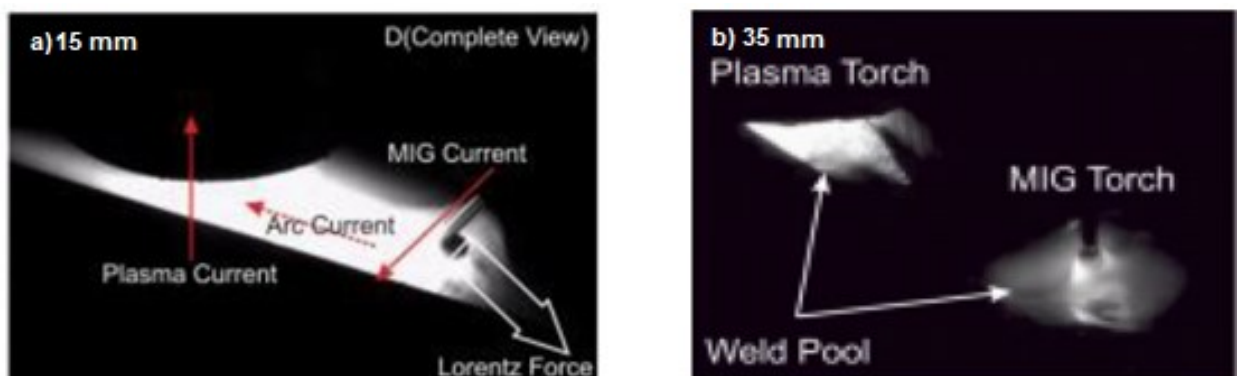


Figura 23 – Observação do comportamento dos arcos plasma e GMAW em relação a distância entre eles (a) 15mm, (b) 35mm [37].

2.4.2 Controle das Fontes de Soldagem e Modelagem Elétrica do Arco Híbrido

A maioria das fontes de soldagem utilizam o sistema de controle PWM (*Pulse Width Modulation*) que nada mais é que a modulação por razões cíclicas. Este método consegue entregar determinada potência para o sistema, através da subdivisão de sua potência máxima em partes discretas. A tensão ou corrente entregue para o sistema, é controlada por uma chave que é aberta e fechada à uma altíssima frequência, quando a chave é fechada a energia é fornecida, quando a chave é aberta o fornecimento de energia é cessado. Dessa forma, a carga média entregue pelo sistema será dependente da razão entre o tempo de chave fechada e o tempo de chave aberta (*Duty Cycle*) [38].

Na Figura 24-A é apresentado um modelo da estrutura de potência para as fontes chaveadas do tipo DC. Considerando E_r o valor da tensão a vazio, a média da tensão de saída será proporcional ao valor da razão cíclica (*Duty Cycle*), assim quando $Duty\ Cycle = 100\%$, $E_a = E_r$, e quando 0% , $E_a = 0$. Já para o controle da corrente, diferentes técnicas podem ser aplicadas, mas todas atuam sobre os transistores. A leitura da corrente fornecida pela fonte é feita ao final do sistema, e conforme a indicação da leitura o transistor é comandado a conduzir (liga) ou bloquear (desliga) a corrente, operando como uma chave liga/desliga.

A indutância, que é inerente as tecnologias de chaveamento, opera como se fosse uma fonte de corrente, mantendo a corrente de soldagem durante o período que o transistor está bloqueado (chave aberta). Nesse período ocorre uma leve queda no valor da corrente, que é reestabelecida quando o transistor conduz novamente (chave fechada), essa flutuação da corrente é intrínseca a fontes chaveadas, sendo conhecida como “*ripple*”, esse efeito é representado pela linha verde na Figura 24-B.

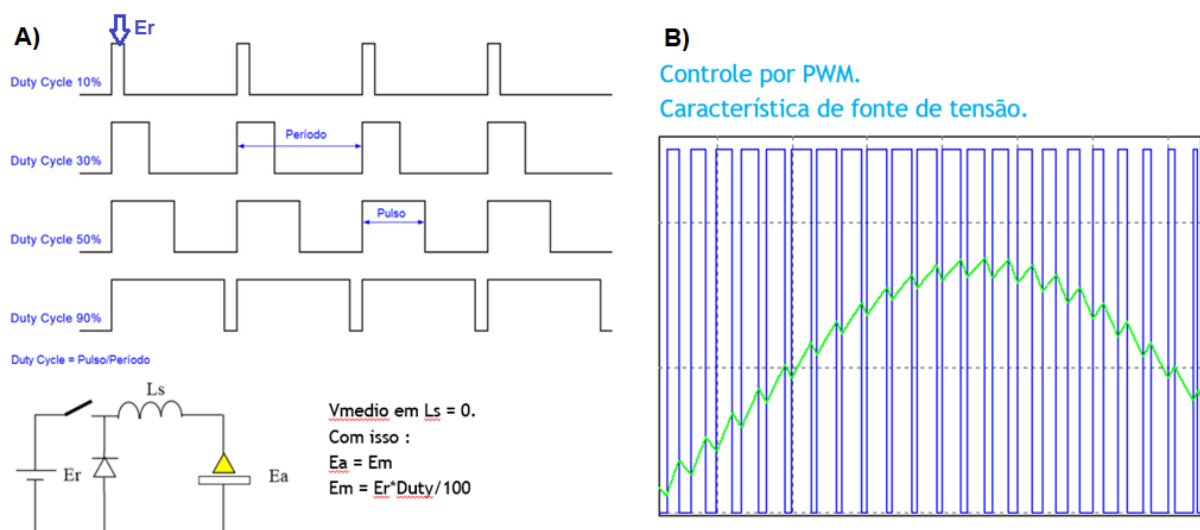


Figura 24 – Característica dinâmica de uma fonte controlada pelo sistema PWM.

A principal característica das fontes DC chaveadas, em comparação às fontes analógicas, é que elas possuem diodo de roda livre ao final de sua estrutura, que permite absorver a energia da indutância dos cabos de solda nas transições de descida da corrente. As mesmas são classificadas em dois principais tipos, as que são chaveadas no secundário (*chopper*), ou seja, o sistema de controle se encontra após o retificador, e as que são chaveadas no primário (*inverter*), cujo sistema de controle se encontra anterior ao retificador, esses detalhes são apresentados na Figura 25.

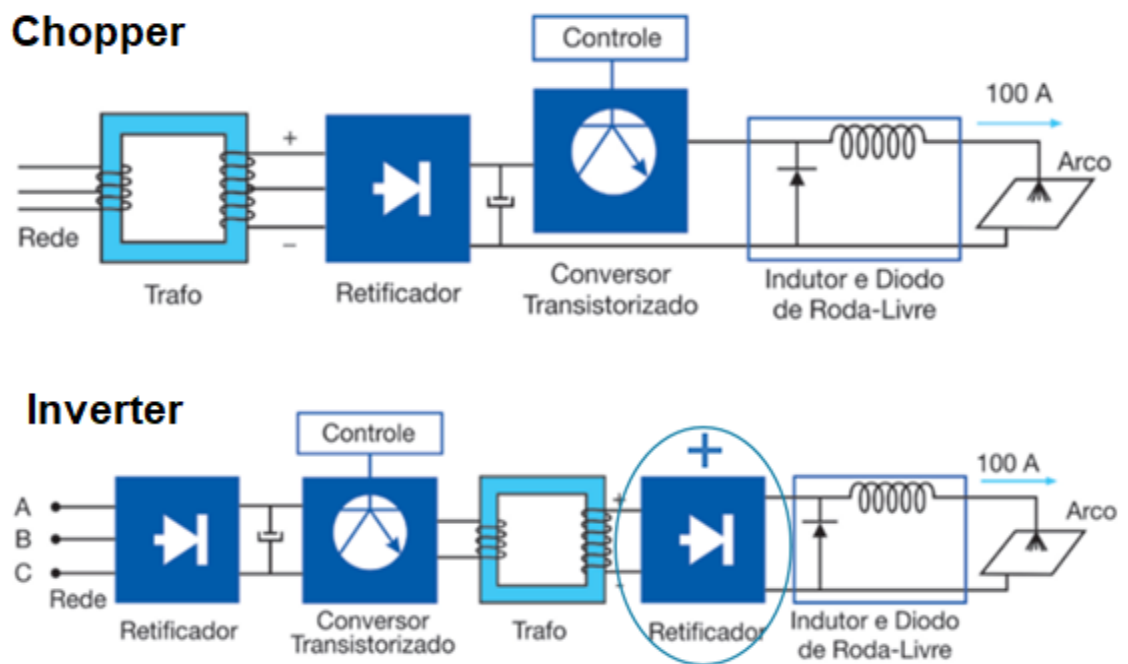


Figura 25 – Topologia de estruturas de potência de fontes que utilizam o sistema de controle PWM.

Em um estudo conduzido por KANEMARU [39], com o processo TIG-MIG, foi verificado que para uma determinada proximidade entre os eletrodos é possível verificar a passagem de corrente entre eles (Figura 26), fenômeno determinado *direct current path*. Pesquisas realizadas em processos híbridos de soldagem desses tipos (que utilizam eletrodos em polaridades opostas) sugerem que para dada proximidade entre os eletrodos, é possível haver a passagem de corrente entre eles. Contudo, não é investigado profundamente a influência dessa transferência de corrente entre os eletrodos na prática, e suas implicações durante a soldagem.

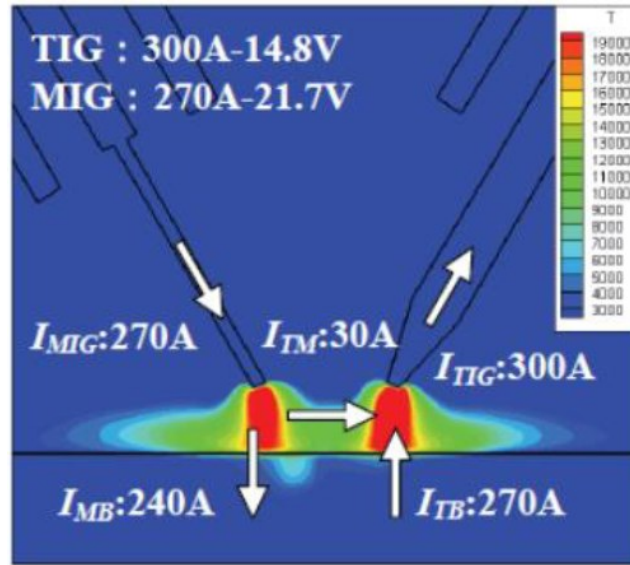


Figura 26 – Simulação da distribuição das direções e valores de corrente [39].

Essa simulação considerou os valores de corrente e tensão da fonte de soldagem TIG, diretamente no sistema PWM, assim apresentado pela Figura 27, na qual E_s corresponde a tensão de saída da fonte de soldagem. Desta forma, quando a corrente de referência I_r é maior do que a corrente de saída I_o , o tempo de pulso do PWM se eleva, fazendo com que o valor de E_s aumente. Do contrário, quando I_r é menor que I_o , a largura de pulso do PWM diminui resultando na diminuição do E_s . Assim, o autor afirma que uma vez verificado esse fenômeno é factível afirmar que outra fonte (GMAW) está fornecendo corrente para fonte GTAW.

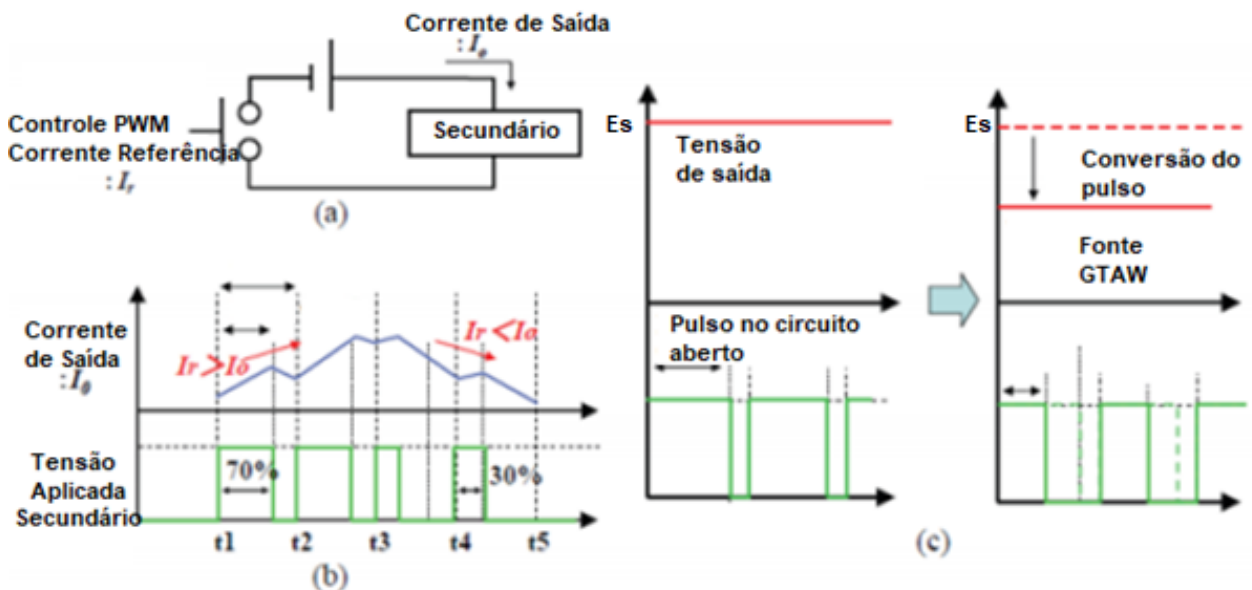


Figura 27 – Diagrama esquemático do mecanismo de controle de PWM na fonte [39].

A Figura 28 mostra, através de ensaios práticos, que de fato há uma diminuição do valor de E_s quando formada a hibridização dos arcos. Com apenas o arco TIG aberto, é possível verificar um valor de corrente de 304 A, tensão de 13,4 V e E_s de 20,8 V. Com ambos os arcos abertos foi verificado uma alteração nos valores, obtendo respectivamente 306 A, 8,5 V e E_s de 14 V para um arco GMAW de 270 A e 23,4 V. A queda nos valores de tensão durante o arco híbrido pode ser resultado da formação de um caminho direto para passagem de corrente do eletrodo MIG para o eletrodo TIG, ou se trata de um favorecimento na emissão termiônica do eletrodo de tungstênio através do aquecimento gerado pelo arco MIG e maior presença de vapores metálicos melhorando condutividade elétrica do plasma [39].

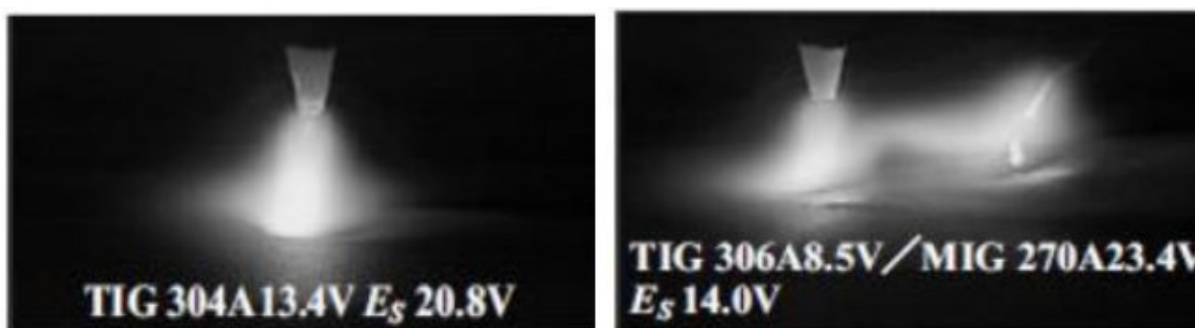


Figura 28 – Comparação entre o arco GTAW (a) e o arco híbrido GTAW-GMAW (b) [39].

Com base na proposta apresentada por KANEMARU [39], assumindo haver a passagem de corrente entre as duas fontes, BERNARDI et al [40] conduziram estudos para demonstrar que há a passagem de corrente entre as fontes. Para isso, eles utilizaram o processo híbrido TIG-MIG, e adquiriram os sinais elétricos em diversos pontos do sistema, inclusive nos componentes internos da fonte de soldagem TIG.

Conforme pode ser visualizado na Figura 29, eles mediram a corrente no cabo terra, tocha, e a corrente que entra no diodo de roda livre. Também adquiriram os sinais de tensão entre tocha e peça e no IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), este último, o mais importante, pois faz parte do sistema de controle PWM da fonte.

Para manter uma determinada corrente, o controle PWM abre e fecha a chave no IGBT periodicamente em alta frequência. Caso haja a passagem de corrente entre tochas, é possível detectar pelo comportamento anômalo do IGBT. Pois a corrente que é lida no diodo de roda livre tem que ser condizente com o comportamento do chaveamento no IGBT.

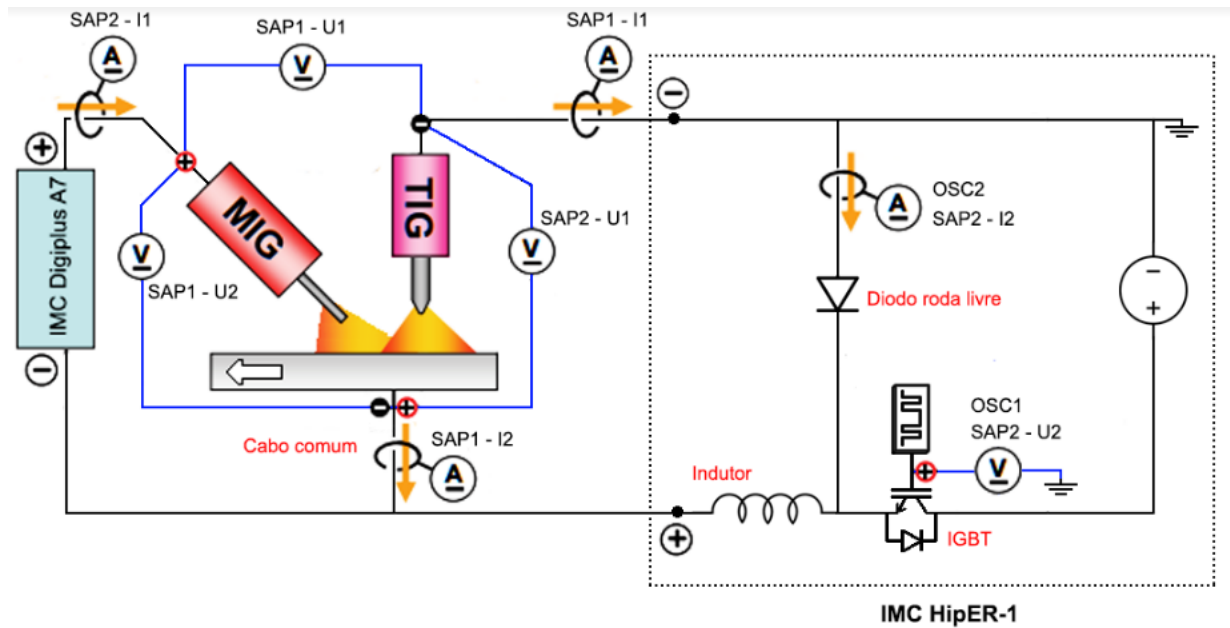


Figura 29 – Esquema de aquisição de dados elétricos utilizados por BERNARDI et al, durante o processo TIG-MIG [40].

Para o processo TIG atuando sozinho à corrente constante, é comum um comportamento de tensão no *gate* e corrente no diodo de roda livre conforme a Figura 30. Nota-se que quando a chave é fechada (tensão no *gate* -15 V), a corrente imediatamente tende a zero.

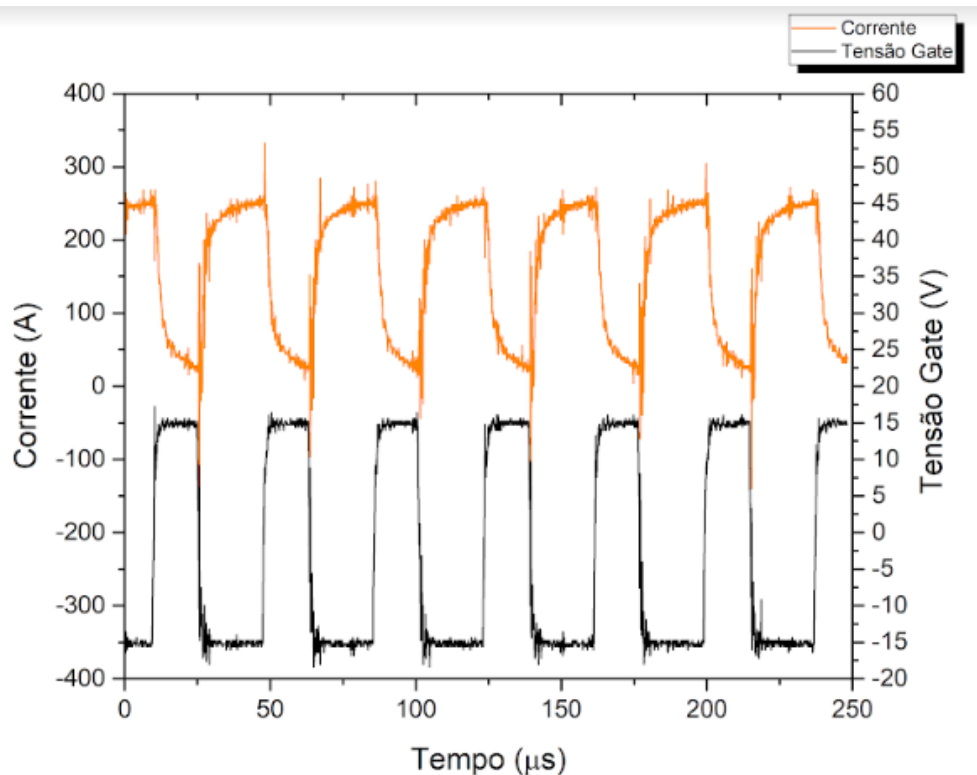


Figura 30 – Aquisição de corrente no diodo de roda livre e tensão no IGBT para o processo TIG [40].

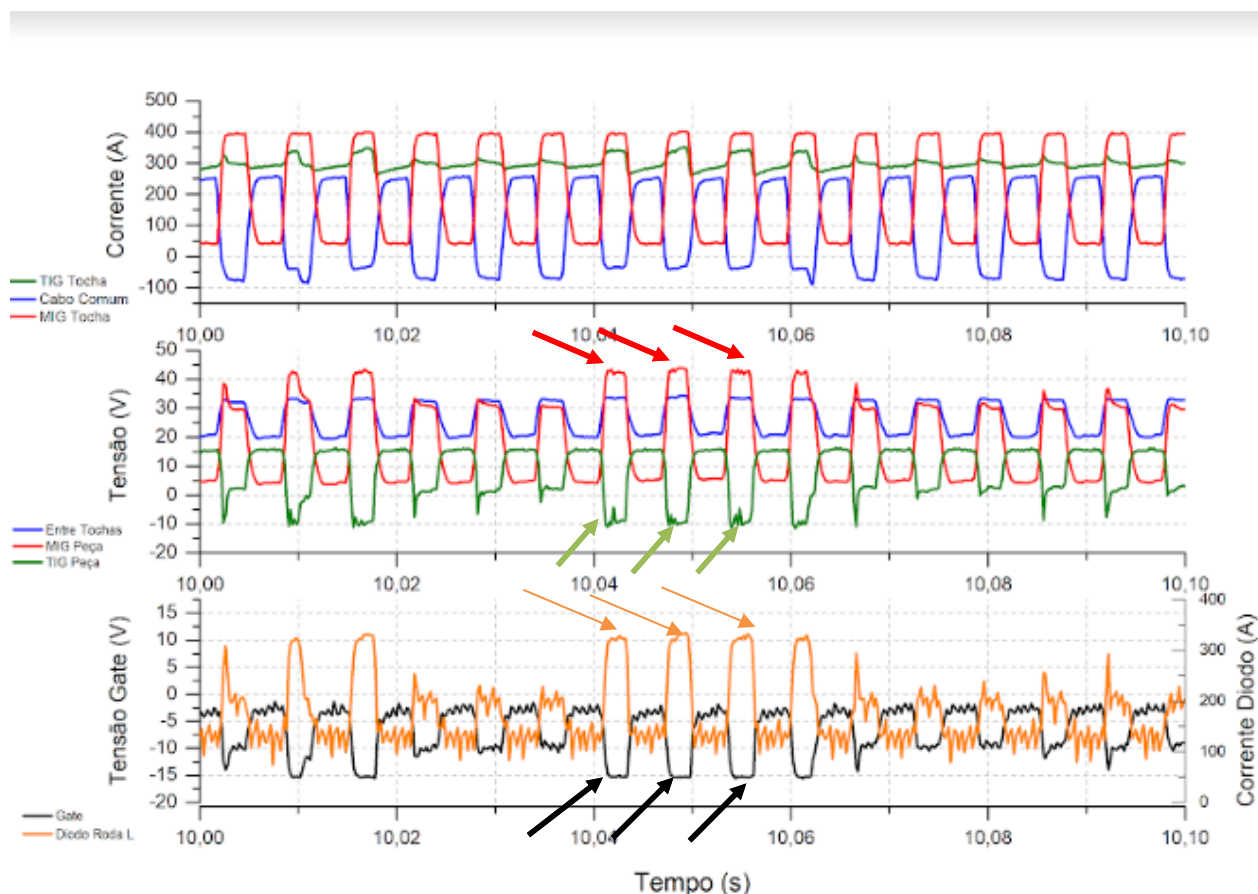


Figura 31 – Aquisição dos sinais elétricos no processo TIG-MIG Pulsado [40].

Ao realizar ensaios com o processo TIG-MIG (MIG Pulsado) conforme Figura 31, é identificado que em alguns momentos ao longo da soldagem, mesmo com a chave aberta (seta preta) há a passagem de corrente no diodo de roda livre (seta laranja), e ainda por cima, essa corrente que passa no diodo de roda livre é superior a corrente que passa normalmente (com a chave fechada).

Ao mesmo tempo em que isso acontece, a tensão aquiritada no arco TIG tende a zero, até podendo inverter o sinal (seta verde). A inversão do sinal da tensão TIG, é a prova que há a passagem de corrente da fonte MIG para a fonte TIG. Pois a fonte TIG deixou de fornecer energia para se tornar meio para a condução da corrente fornecida pela fonte MIG. Por sua vez, o valor da tensão medida na fonte MIG nesses pontos destacados (seta vermelha), é muito superior aos demais valores de tensão, ou seja, é um indicativo que ela está fazendo esforço maior do que o comum para fornecer a corrente, suportando a teoria da passagem de corrente entre tochas.

Tomando o processo de soldagem como um sistema onde há a passagem de corrente através dos condutores e do arco elétrico, com uma força eletromotriz atuando nos mesmos,

pode-se estimar o processo como um modelo de resistências. Segundo SCOTTI [41] o arco pode ser modelado como uma fonte de tensão em série com uma resistência, conforme apresentado na equação (5).

$$U_a(t) = E(t) + R_t(t) \cdot I(t) \quad (5)$$

Onde U_a = tensão de arco.

$E(t)$ = fonte de tensão variante no tempo.

$R(t)$ = resistência de arco variante no tempo.

$I(t)$ = corrente de soldagem.

Este modelo fica claro ao avaliar o ciclograma (tensão x corrente) do processo pulsado Figura 32-a. A média dos valores de tensão x corrente geram uma reta (traço amarelo) que cruzam o eixo y em 20 V [$E(t)$], ou seja quando $I = 0$. E a inclinação dessa mesma reta representa a resistência do arame-eletrodo [$R(t)$].

A reta em vermelho representa o comportamento durante o curto circuito (Figura 32-b), onde é possível perceber que as inclinações das retas para o curto e o pulso são muito semelhantes, mostrando que a resistência no modelo do arco se dá em grande parte pela resistência do arame-eletrodo.

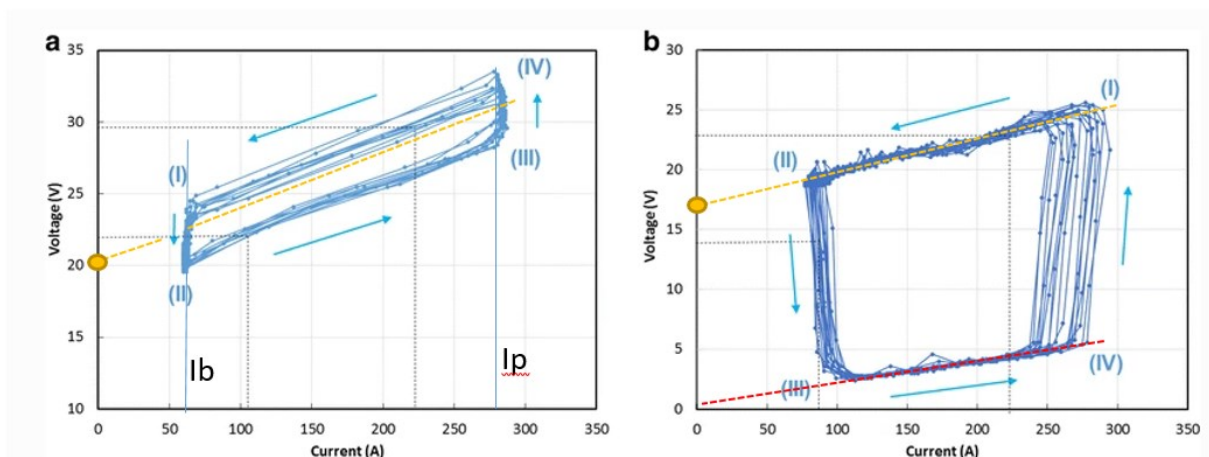


Figura 32 – Ciclogramas (tensão x corrente) dos processos MIG pulsado e MIG curto circuito.

De uma forma geral, é possível verificar que o arco elétrico tem um comportamento dinâmico, de forma que é possível perceber no ciclograma do processo pulsado, que para mesma corrente de base e de pulso (I_b e I_p), tem-se variações na tensão do arco, de forma que mesmo com as alterações das características do arco, os valores de corrente são mantidos.

MATTHES [42] e OLIVEIRA [4] propuseram dois possíveis comportamentos elétricos

para os processos plasma e GMAW durante o processo coaxial. O primeiro (Figura 33-A) propõe que os arcos plasma e GMAW, além de fecharem circuito com a peça de trabalho, fecham um circuito entre si, onde ambos interagem eletricamente enquanto estabelecem o arco elétrico com a peça, ou seja, além de estabelecer uma resistência com a peça de trabalho, eles estabelecem uma resistência entre si.

Já o segundo (Figura 33-B), propõe que além do comportamento já apresentado, os arcos GMAW e Plasma apresentam também caminhos para a corrente que não são interferidos pelo arco vizinho, ou seja, um determinada porção de cada um dos arcos estabelece uma resistência diretamente com a peça de trabalho, enquanto que o restante da carga que passa através do arco é transferido isoladamente a peça, sem a interferência do arco vizinho.

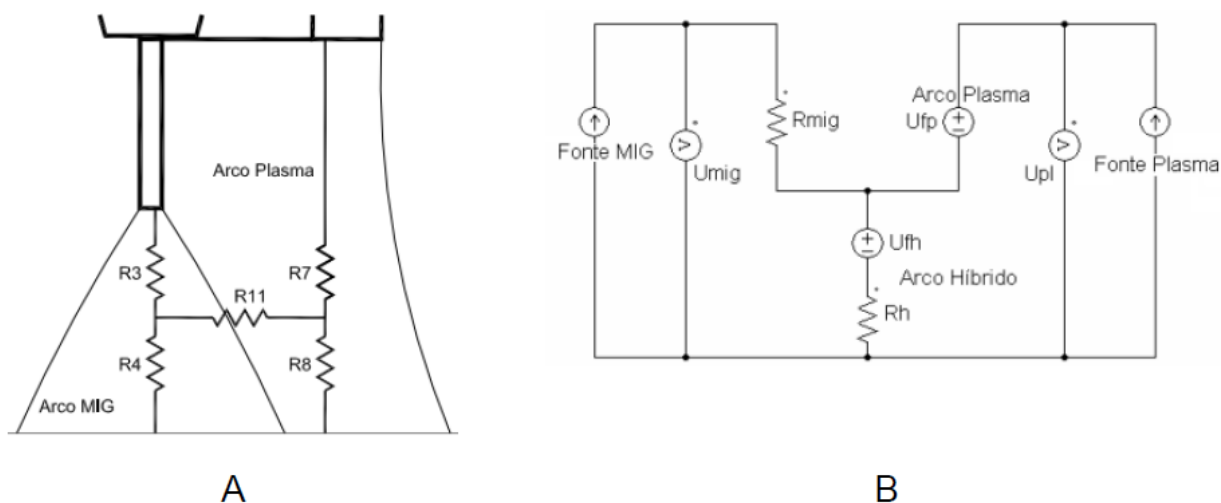


Figura 33 – Modelos elétricos propostos para o processo Plasma-GMAW Coaxial segundo segundo MATTES & KOHLER [42] e OLIVEIRA [4].

2.5 Transferência Metálica no Processo Plasma-GMAW

Pouco se tem conhecimento sobre as características da transferência metálica no processo Plasma-MIG serial, sendo que é assumido que ele se comporta conforme aquilo apresentado no processo GMAW convencional. Porém, os estudos conduzidos com o processo Plasma-MIG Coaxial mostraram que a hibridização dos arcos pode gerar características singulares para o comportamento elétrico e a transferência metálica no sistema.

Um dos fatos que pode ser destacado no processo Plasma-MIG Coaxial, é que o comportamento da tensão e corrente são proporcionais ao longo de uma grande faixa de operação, inclusive para baixíssimos níveis de corrente no eletrodo GMAW. O mesmo não ocorre para o

processo GMAW convencional, pois ao impor correntes demasiadamente baixas, a instabilidade gerada no processo em decorrência da formação de gotas muito grandes, resulta em uma tensão alta [43]. O comportamento da tensão x corrente do processo GMAW durante ambos os processos é ilustrado na Figura 34.

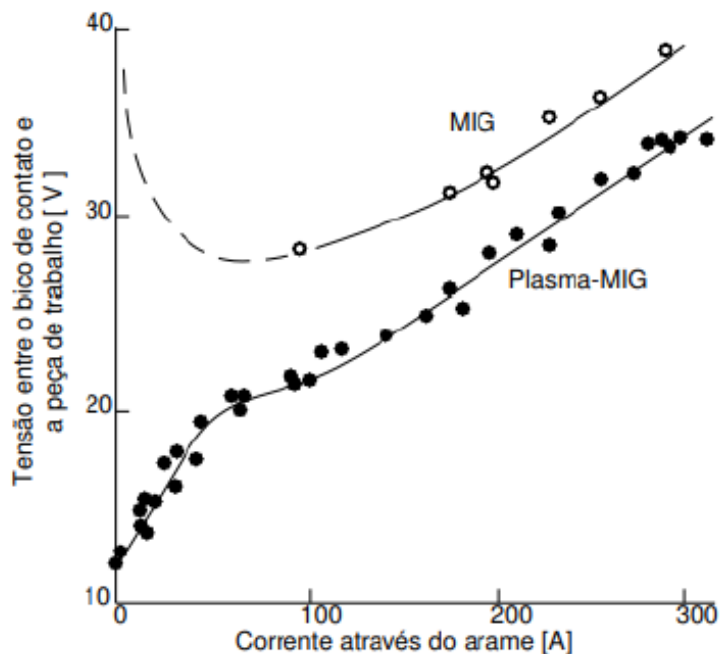


Figura 34 – Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-GMAW Coaxial e GMAW convencional [43].

Além disso, ESSERS [44] verificou que a transição goticular-axial para goticular-rotacional ocorre muito antes no processo híbrido. Enquanto que essa transição é atingida para correntes superiores a 400 A no processo convencional, ela é atingida a correntes próximas a 300 A no processo Plasma-MIG coaxial (Figura 35). Ele atribui isso a maior taxa de fusão proporcionada pelo eletrodo plasma, o que promove a mais fácil “escalada” do arco no eletrodo GMAW, favorecendo a transferência rotacional. Ao contrário do que é verificado no processo GMAW, no processo Plasma-GMAW a transferência rotacional se mostrou favorável a soldagem [44].

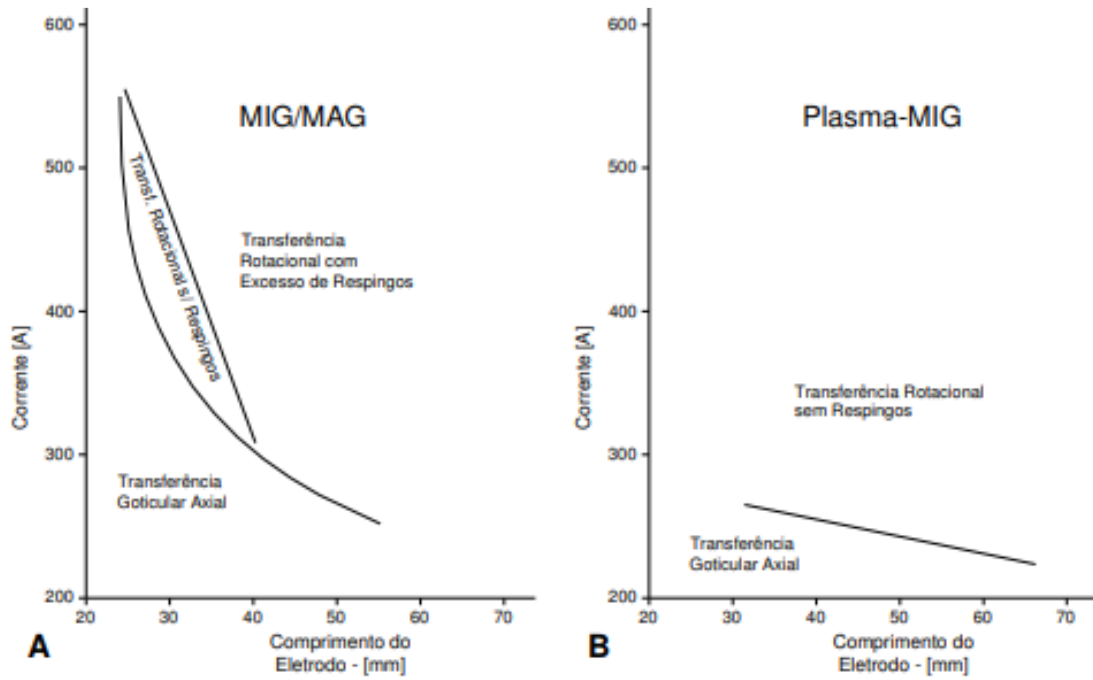


Figura 35 – Corrente de transição entre os modos de transferência goticular axial e rotacional para os processos GMAW (A) e Plasma-GMAW (B) [43].

Estudos conduzidos por RESENDE [26] a respeito do processo híbrido utilizando GMAW pulsado, apresentaram resultados muito semelhantes aos já conhecidos no processo GMAW convencional. Para a parametrização utilizada foi apresentado a condição de UGPP (uma gota por pulso) com a transferência da gota entre o final do pulso e início da base, tensão média semelhante as normalmente encontradas e diâmetro de gota semelhante ao diâmetro do eletrodo. Os dados relativos a esse estudo são apresentados na Figura 36.

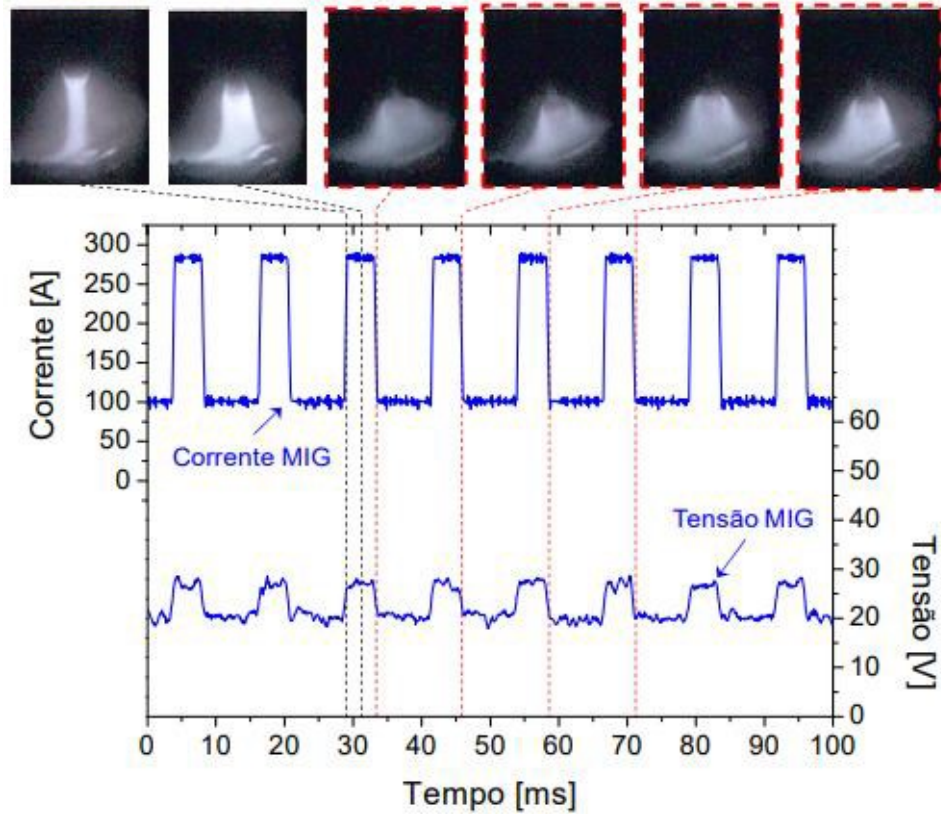


Figura 36 – Oscilogramas de corrente e tensão sincronizados com imagens da câmera de alta velocidade [26].

Ademais, foi verificado que as tensões GMAW e plasma tem uma dependência diretamente proporcional à corrente GMAW, mesmo mantendo a corrente plasma constante, conforme pode ser visualizado na Figura 37. Isso quer dizer, a corrente imposta no eletrodo GMAW influenciará diretamente a resposta elétrica do sistema [4].

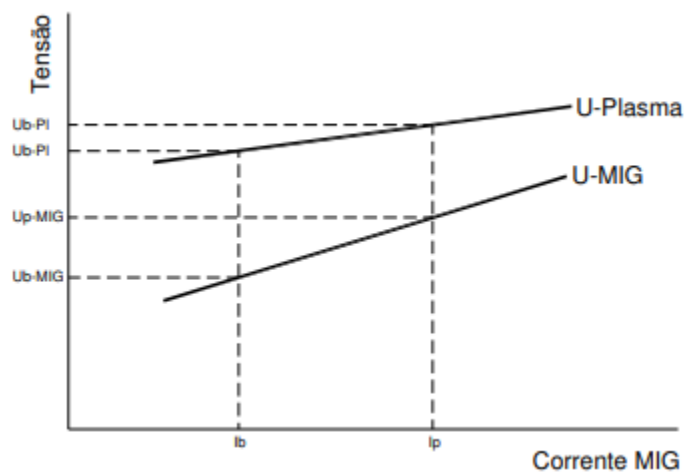


Figura 37 – Diagrama Esquemático da Característica do Processo Plasma-MIG coaxial [4].

Em se tratando do processo Serial, YAMANE [37] buscou avaliar a influência da polaridade no circuito GMAW no modo da transferência metálica. Mantendo o GMAW positivo

enquanto plasma negativo, foi verificada uma transferência estável, e a gota sendo projetada em direção à poça de fusão. Já para o GMAW negativo com plasma negativo a gota é projetada em direção ao bocal plasma, resultando em grande instabilidade na transferência metálica e no processo como um todo, esse esquema é representado na Figura 38.

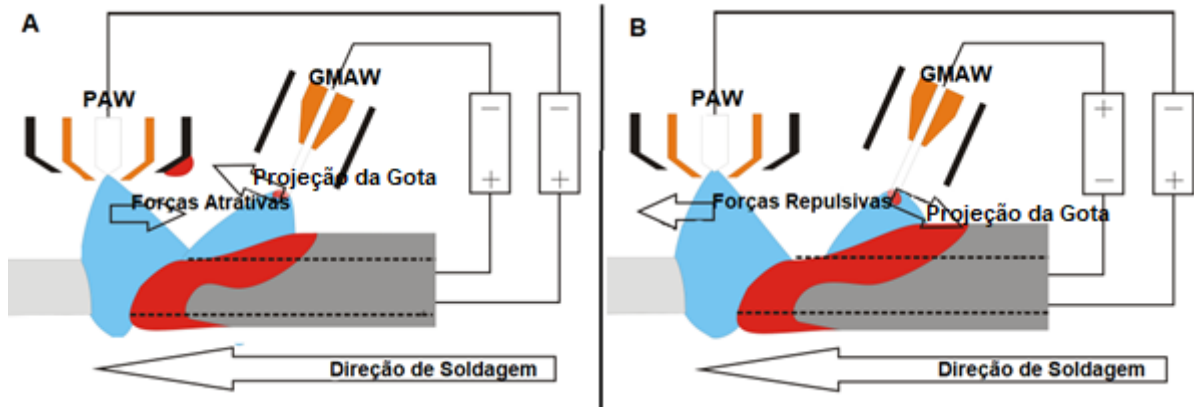


Figura 38 – Representação do efeito da polaridade sobre os arcos elétricos e a projeção da gota metálica para GMAW negativo (A) e GMAW positivo (B) [37].

Através da filmagem de alta velocidade do processo Plasma-GMAW, para o arco GMAW em polaridade positiva, YAMANE [37] comprova o efeito teórico apontado, onde a gota metálica é projetada em direção a poça de fusão, contrário à direção de soldagem, como pode ser verificado na Figura 39.

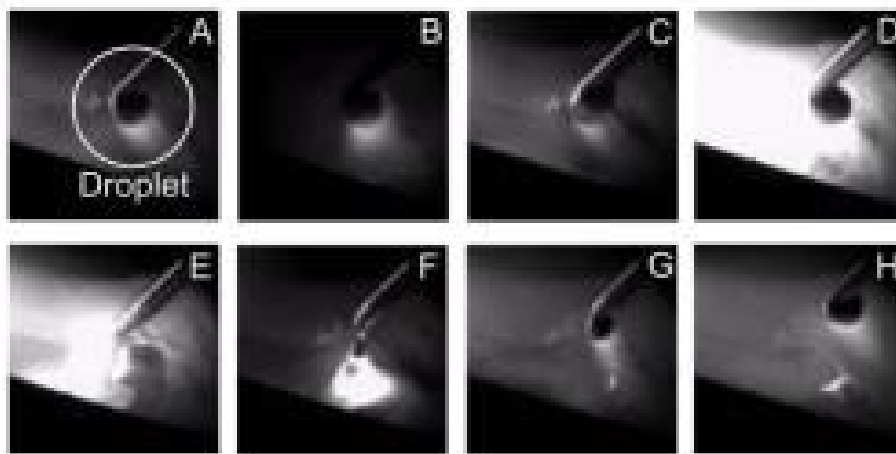


Figura 39 – Filmagem de alta velocidade da projeção da gota metálica durante GMAW positivo [37].

Em investigação realizada por HONG [45] acerca da velocidade da gota no processo serial com o plasma aplicado em corrente alternada (VPPA), foi verificado que a imposição de maiores correntes no plasma, resultou em maiores velocidades da gota durante a transferência metálica, conforme pode ser visualizado na Figura 40. Esse aumento na velocidade da gota é

atribuído a compressão gerada no arco GMAW, resultante das forças magnéticas que o arco plasma exerce no mesmo.

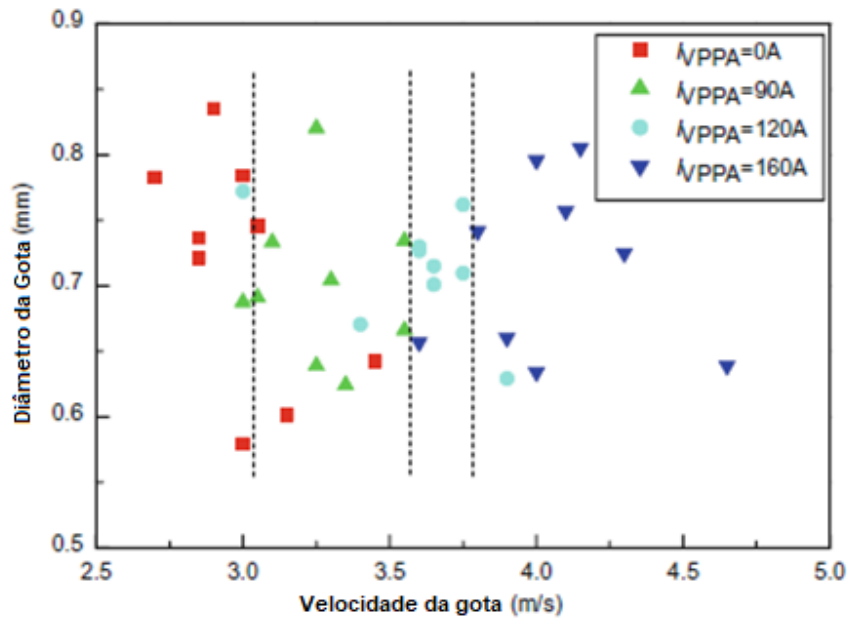


Figura 40 – Velocidade x tamanho na gota no processo VPPA-GMAW [45].

2.6 Efeitos da Hibridização no Processo Plasma-GMAW

Como já mencionado, o processo híbrido não é a simples soma de dois processos individuais, ou seja, os fatores que contribuem para a fusão e penetração nos processos de soldagem quando atuando individualmente, não necessariamente serão os mesmos que contribuirão para a penetração e aspectos geométricos do cordão durante o processo híbrido. Por causa disso faz-se necessário a investigação do comportamento do processo híbrido para cada caso particular.

Um exemplo disso pode ser encontrado no trabalho de OLIVEIRA [4], o qual mostrou que para mesma taxa de fusão de arame, o aumento da corrente de plasma reduz a penetração em detrimento do aumento da largura do cordão de solda, como pode ser visualizado na Figura 41.



$I_{pl} = 40 \text{ A}; I_{MIG} = 155 \text{ A}$

$I_{pl} = 60 \text{ A}; I_{MIG} = 147 \text{ A}$

$I_{pl} = 80 \text{ A}; I_{MIG} = 139 \text{ A}$

Figura 41 – Resultados obtidos a partir da variação do balanço de correntes para o Plasma-GMAW coaxial [4].

Nesse contexto, também pode-se destacar o trabalho de RESENDE [26], onde o aumento da corrente de plasma reduz a penetração dos cordões para uma mesma energia total de soldagem (energia plasma + energia GMAW). Sendo que nesse caso a penetração é comandada principalmente pela corrente imposta no processo GMAW, como pode ser visualizado na Figura 42.

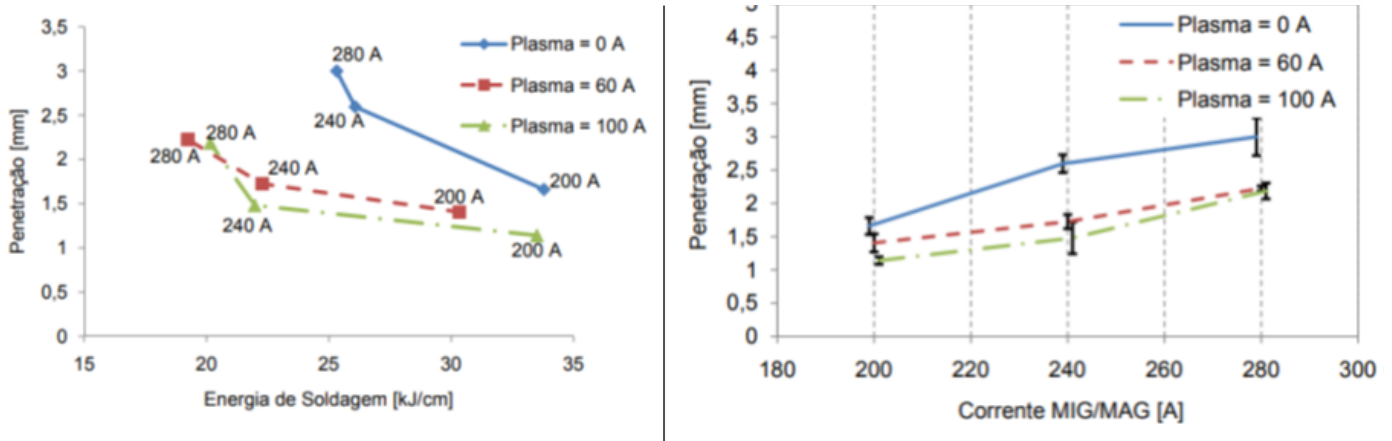


Figura 42 – Penetração em função da energia de soldagem (esquerda) e penetração em função da corrente imposta no processo GMAW (direita) para o processo Plasma-GMAW Coaxial [26].

Já para o processo plasma-GMAW serial, ANH [46] verificou através de filmagens termográficas do processo, que as temperaturas mais altas da poça de fusão estão localizadas logo abaixo do arame-eletrodo GMAW, tanto no processo híbrido quanto no processo GMAW-convencional. Nisso, foi detectado temperaturas na faixa de 2260 K e 1960 K no processo híbrido e convencional respectivamente, diferença na qual é atribuída as melhores características do molhamento do cordão de solda no processo híbrido. As distribuições da temperatura para cada processo são visualizadas na Figura 43.

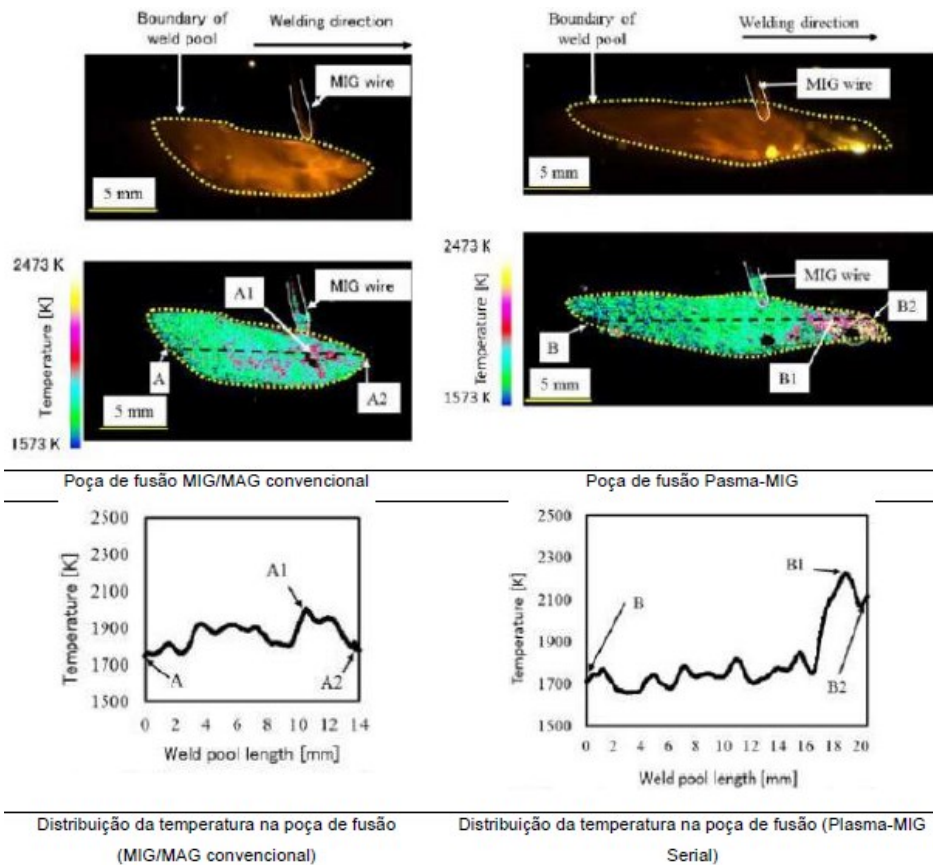


Figura 43 – Distribuição de temperaturas para o processo GMAW e Plasma-GMAW [46].

A eficiência térmica, por sua vez, é outro fator importante com relação a transferência de calor e aquecimento da peça de trabalho, e é resultado da diferença entre o calor absorvido pela peça e a energia total gerada pelo processo. A eficiência térmica do processo Plasma-MIG é de aproximadamente 65%, enquanto que os processos Plasma e MIG/MAG são 50 e 85% respectivamente, ou seja, o processo plasma-GMAW encontra-se exatamente entre os processos que o compõe [47]. Esse diagrama pode ser visualizado na Figura 44.

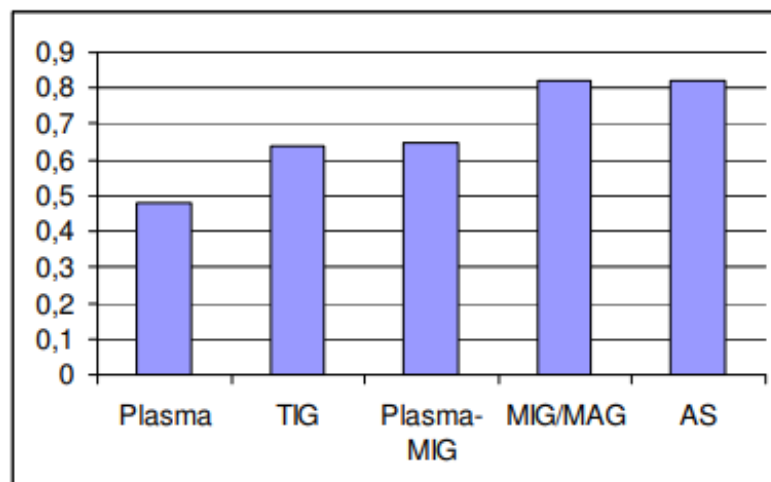


Figura 44 – Eficiência térmica de alguns processos de soldagem [47].

Em seus estudos conduzidos para o processo VPPA-GMAW-serial, GUO et al [48] desenvolveu um extenso estudo sobre a influência das características dos parâmetros de processo na penetração e largura do cordão de solda. A primeira conclusão obtida, é que com o aumento da velocidade de soldagem (V_s) há uma diminuição na penetração e largura do cordão de solda, conforme pode ser visualizado na Figura 45-A. Esse comportamento é natural, pois o aumento da velocidade de soldagem acarreta a redução na taxa de deposição e automaticamente menor material de adição disponível para espalhamento durante a solda. Ao mesmo tempo, a maior V_s também acarreta em menor densidade de energia por unidade de tempo, sabendo que a corrente média se manteve constante, logo, a menor penetração.

Nessa temática, também foi analisado o efeito da corrente imposta no processo GMAW na geometria do cordão, e da mesma forma, o processo não apresentou resultados fora do esperado. Ambos largura e penetração aumentaram com o aumento da corrente GMAW, ao passo de que é notado que para esses ensaios a quantidade de material depositado também foi elevada, como pode ser visualizado na Figura 45-B.

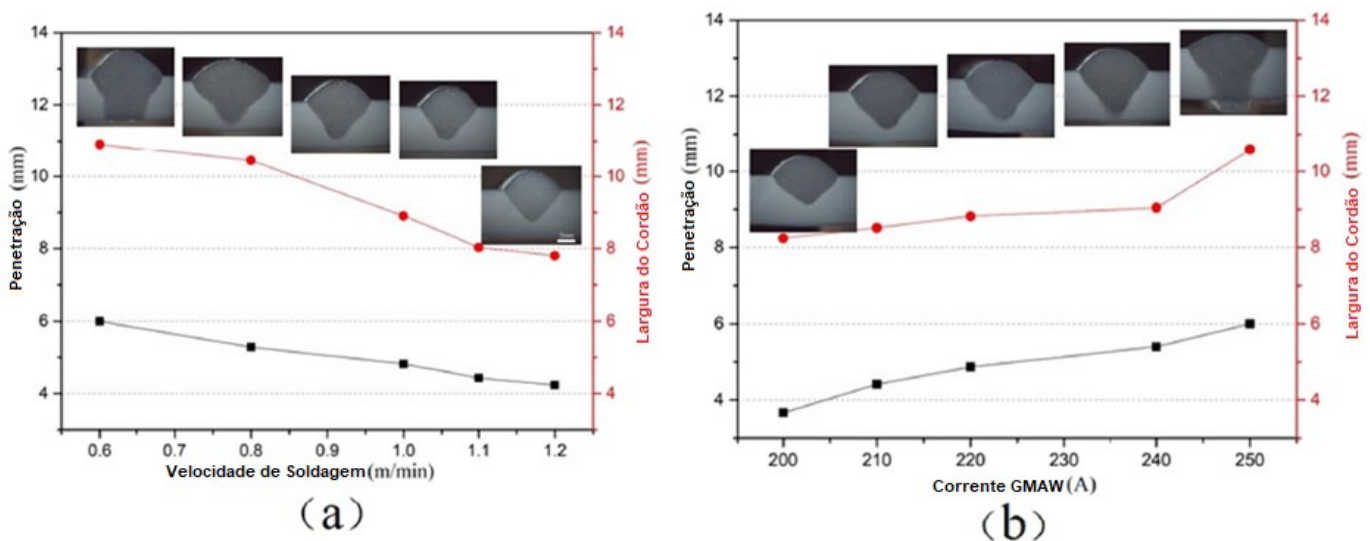


Figura 45 – Variação na largura e penetração no cordão de solda de acordo com (A) velocidade de soldagem e (B) corrente no arco GMAW [48].

Mantendo os demais parâmetros constantes, não foi verificado aumento na largura do cordão de solda com a corrente de plasma, enquanto que a penetração mostrou aumento significativo (Figura 46-C), porém vale destacar que a amplitude das correntes de plasma utilizadas nesse ensaio é demasiadamente baixa, não sendo possível estimar qual seria o comportamento para maiores níveis de energia, e automaticamente maiores espessuras de chapa.

Já para a vazão de gás de plasma, foi observado que no nível de 5 L/min, foi obtida penetração total da peça, enquanto que para níveis maiores, que seria esperado a manutenção

da penetração, foi apresentado uma redução na penetração, conforme pode ser visualizado na (Figura 46-C). O autor atribui esse efeito a um possível *vortex* criado na região do plasma (*keyhole*) devido ao excesso de gás, retirando calor do mesmo e prejudicando a fusão.

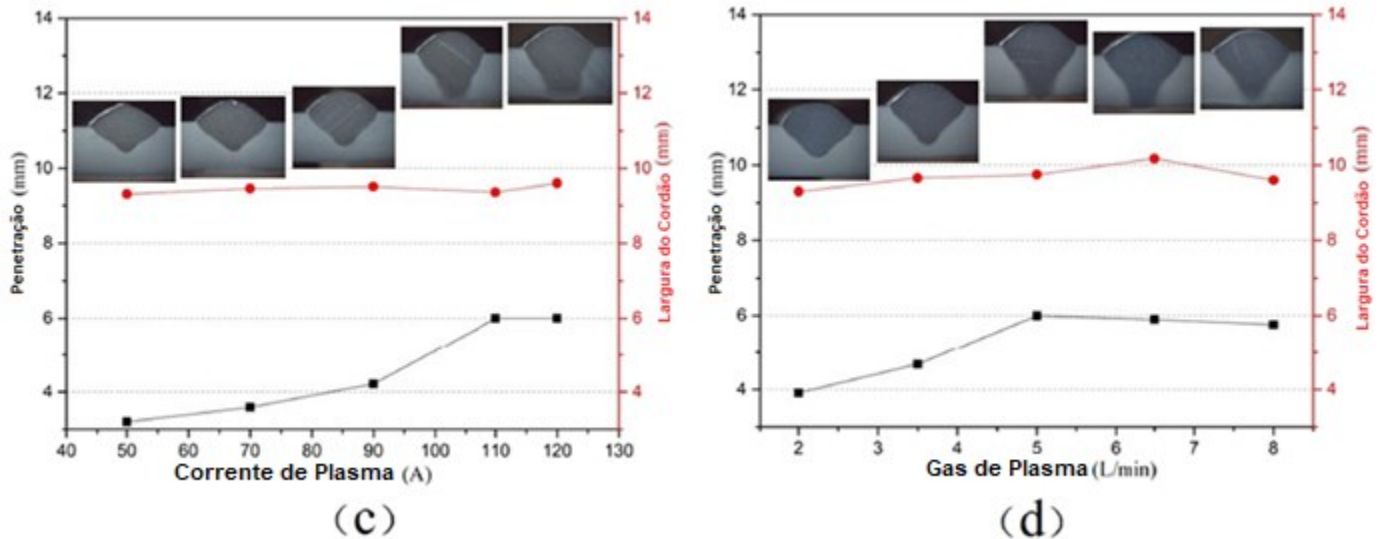


Figura 46 – Variação na largura e penetração no cordão de solda de acordo com (C) corrente de plasma e (D) vazão de gás de plasma [48].

O processo Serial também foi aplicado por RIBEIRO et al [49], que em seus trabalhos realizou algumas análises práticas do processo. Como por exemplo a influência do ângulo de incidência da tocha para a soldagem de juntas em T (Figura 47). Foi concluído que a seleção do ângulo é de extrema importância para se atingir uma soldagem satisfatória, uma vez que ângulos mais agudos podem ocasionar o escorrimento da solda e conseqüente mordedura e outros defeitos (2.3.a), enquanto ângulos mais altos implicam na falta de penetração (1.4.a), sendo que para essa aplicação específica o melhor ângulo para soldagem foi de 33° (2.4.a).

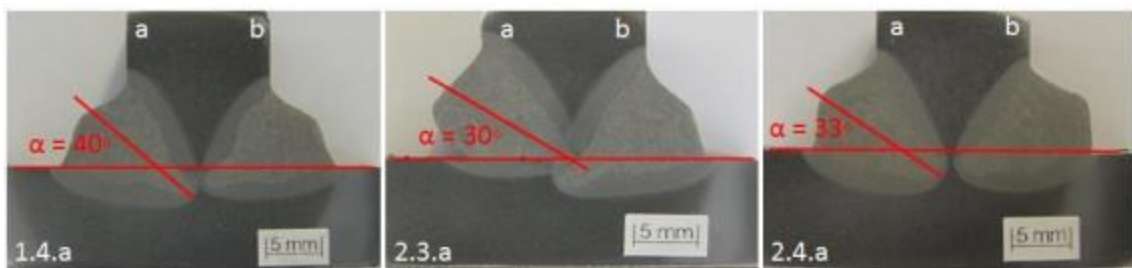


Figura 47 – Mudança do perfil de em função da variação do ângulo de trabalho [49].

O autor também promoveu ensaios de união em juntas de topo, porém nesse tipo de aplicação ele se deparou com problemas sistemáticos. Mesmo com a utilização de *backing* de proteção para soldagem, um leve aumento na imposição de energia pelo processo plasma-

GMAW leva, da falta de penetração à penetração excessiva, como pode ser visualizado na Figura 48.

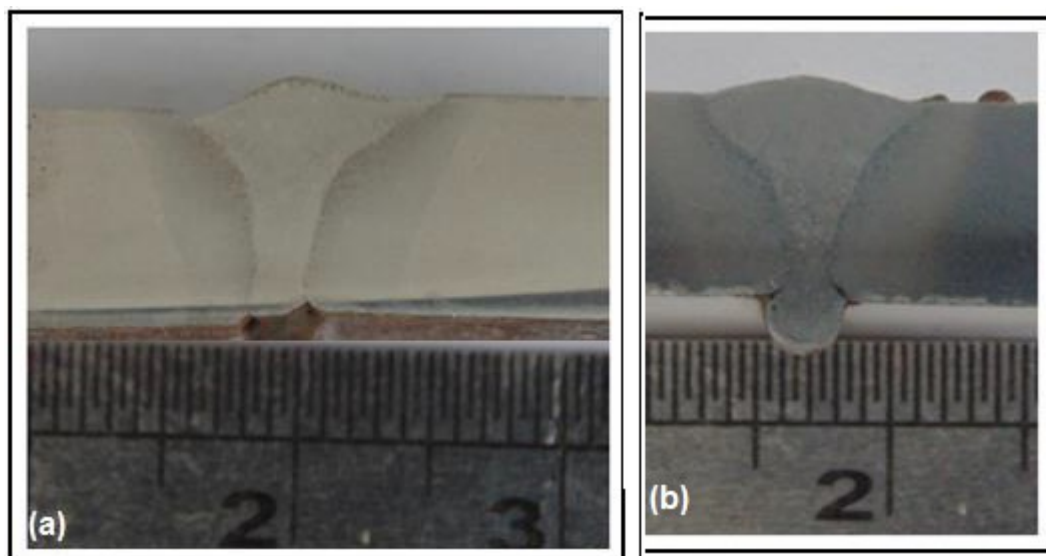


Figura 48 – Ensaio em Juntas de topo com o processo Plasma-GMAW serial [49].

3 EQUIPAMENTOS MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos

O trabalho foi desenvolvido utilizando a estrutura disponível no LABSOLDA e na Universidade Federal de Santa Catarina. A fonte SuperMIG HD utilizada em conjunto com as fontes de soldagem presentes no Labsolda para o processo GMAW. Além desses foram utilizados uma série de equipamentos que permitam a execução e monitoração dos ensaios. A seguir serão apresentados esses equipamentos juntamente com uma breve descrição e o papel de cada um dentro do contexto do trabalho.

3.1.1 Fontes de Soldagem

Apesar de se tratar de um processo híbrido, o Plasma-GMAW requer duas fontes de soldagem agindo a princípio de forma separada na imposição dos parâmetros de soldagem tanto para o plasma quanto para o GMAW, sendo utilizadas respectivamente a SuperMIG HD e a IMC DIGIPLUS 800A.

A fonte SuperMIG HD Interface Unit (Figura 49-A) foi o principal equipamento utilizado nesse trabalho, na qual é capaz de controlar a interface de comunicação entre manipulador e fonte GMAW, permitindo o início e fim da soldagem de forma simultânea entre o plasma e o GMAW. Dentre suas principais características, essa fonte permite controlar a corrente de

plasma em regime contínuo e constante limitada a 360 A, assim como variar a vazão do gás de plasma entre 3 e 9 L/min. Outros parâmetros como corrente de início e fim e seus respectivos tempos de subida e descida, além da porcentagem do campo magnético, podem ser alterados previamente a soldagem. Existe ainda mecanismos responsáveis por verificar os níveis de água da refrigeração da tocha, bem como dos gases de plasma e de processo.

A fonte IMC DIGIPLUS 800A (Figura 49-B) foi escolhida devido sua grande faixa de operação, uma vez que permite a soldagem com correntes de até 800 A, além de possuir um sistema eletrônico avançado, com um indutor físico que proporciona uma baixa indutância a fonte, e conseqüentemente elevadas taxas de subida e descida da corrente, que podem ser ajustados com o respectivo controle eletrônico da indutância (K_s , K_d). Na prática, isso possibilita uma resposta mais rápida da fonte à variações dos parâmetros elétricos impostos. No mais, ela é habilitada à soldagem com diversas versões do processo GMAW, como por exemplo convencional, curto-circuito controlado, alternado e pulsado e possui um sistema de malha aberta, ou seja, permite a alteração dos parâmetros de forma independente, permitindo total controle sobre o formato da onda, por exemplo no processo pulsado é possível ajustar parâmetros de corrente de pulso (I_p) e de base (I_b), tempos de pulso (t_p) e de base (t_b), além da velocidade de alimentação (V_a), parâmetros de indutância e resposta a eventos indesejados durante a soldagem, mesmo simultaneamente a soldagem [50].



Figura 49 – Fontes de soldagem utilizadas para o processo Plasma-GMAW. (A) Fonte SuperGMAW HD (B) Fonte IMC Digiplus 800A.

Outros dois dispositivos foram adicionados a fonte IMC DIGIPLUS, o cabeçote alimentador de arame STA-20 e a unidade de refrigeração UPR 7500 (Figura 50). O sistema de refrigeração, por sua vez, é responsável por realizar o arrefecimento da tocha de soldagem na região de atuação do arco GMAW.



Figura 50 – Cabeçote alimentador de arame STA-20 (A) e unidade de refrigeração UPR 7500 (B).

3.1.2 *Tocha Plasma-GMAW Serial*

Outro equipamento fundamental para o desenvolvimento dos ensaios propostos foi a tocha Plasma-GMAW Serial. Este subsistema possui integrado duas tochas, plasma e GMAW, de forma sequencial. Como citado anteriormente, uma vez dispostas próximas e com polaridades opostas, esse equipamento possui um mecanismo capaz de gerar um campo eletromagnético a qual o fabricante afirma manter os dois arcos voltaicos a uma distância mínima sem que os mesmos se afastem devido as forças magnéticas características de cada um. A Figura 51 apresenta em detalhes o subsistema de tocha Plasma-GMAW Serial.

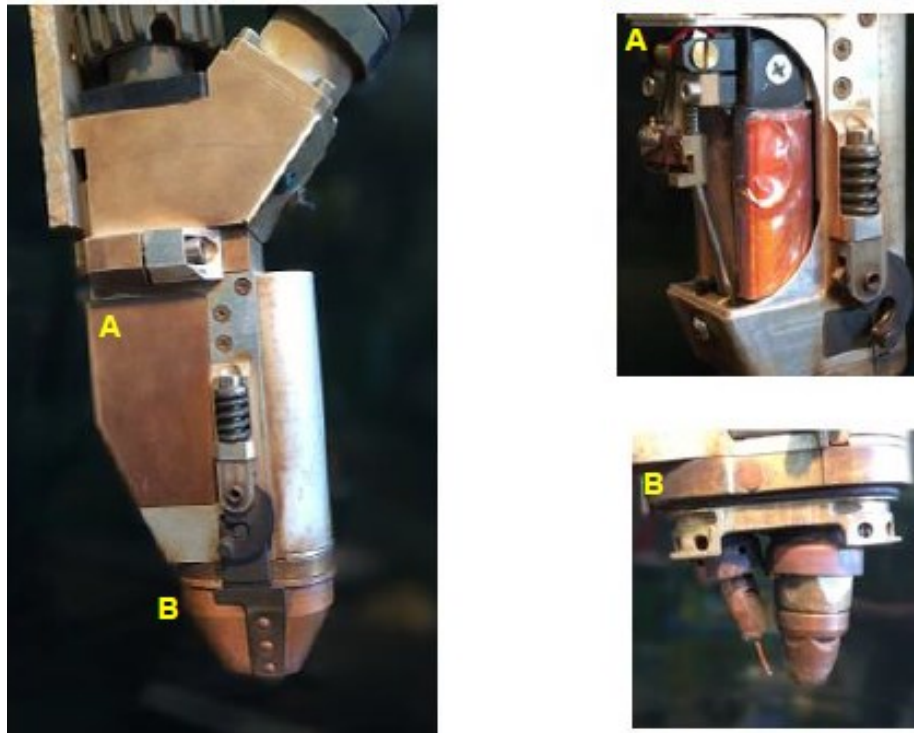


Figura 51 – Sistema da tocha Plasma-GMAW Serial em detalhes (A- Bobinas eletromagnéticas; B- Bicos GMAW e plasma).

3.1.3 Sistemas de Movimentação

Inicialmente, foi utilizado o sistema manipulador cartesiano SPS modelo Tartilope V2 (Figura 52-A), devido sua maior disponibilidade no laboratório, que possibilita atuação automatizada em dois eixos (x e y) de soldagem, propiciando a movimentação da tocha de forma constante. Porém, ao longo dos testes foi verificado que o mesmo, por possuir maior sensibilidade a carga (menor *payload*), não demonstrou robustez na condução dos ensaios. Sendo que após os testes iniciais, os ensaios passaram a ser conduzidos no robô antropomórfico Motoman modelo UP6 (Figura 52-B).

O robô antropomórfico motoman UP6 tem um sistema de movimentação de seis eixos, com interface para comunicação com as fontes de soldagem, permitindo a configuração de programas de soldagem automáticos. O sistema é equipado com sensores de colisão e pode atingir uma amplitude de trabalho de até 1,37 metros suportando um *payload* de seis quilogramas.



Figura 52 – Sistema manipulador cartesiano tartilope V2 (A) e Robô antropomórfico Motoman UP6 (B).

3.1.4 Sistemas de Medição e Monitoração

Uma vez que o processo de soldagem objeto de estudo é resultado da interação entre dois outros, é primordial a utilização de equipamentos capazes de fornecer dados necessários que permita analisar os fenômenos presentes durante a soldagem. Dito isso, um conjunto de dispositivos serviram de suporte com a finalidade de fornecer sinais elétricos, bem como permitir a análise do comportamento do arco voltaico e da poça de fusão característicos do Plasma-GMAW Serial.

Desta forma, foram utilizados três sistemas em conjunto de forma a sincronizar os dados provenientes de cada arco com os frames capturados pela câmera. O primeiro deles, o Sistema de Aquisição dados Portátil (SAP), é uma ferramenta para análise do processo de soldagem. Com ele é possível fazer a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás para até duas estações de soldagem, com tempo configurável de até 600 segundos e taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável que permite realizar aquisições de dados elétricos do processo, como a tensão, corrente, e velocidade de alimentação de arame. A Figura 53-A mostra este equipamento [51].

O SAP foi adaptado para fornecer o sinal analógico diretamente ao sistema de aquisição da câmera de alta velocidade, o MotionPro DAS (Figura 53- B), o qual realiza a amostragem e sincronia dos sinais com as imagens. Este equipamento, por sua vez, é capaz de realizar aquisições em até 16 canais e sua taxa de aquisição máxima é de 500 kHz. O terceiro sistema utilizado para aquisição foi o TC-1 e pode ser visualizado na Figura 53-C. Este é um equipamento analógico responsável por realizar o condicionamento de sinais de tensão e corrente do processo, provenientes de seus respectivos transdutores, e os fornece ao sistema de aquisição da câmera (MotionPro DAS).



Figura 53 – Sistemas de aquisição de dados (A- Sistema de aquisição de dados portátil (SAP); B- MotionPro DAS; C- TC-1).

Já para analisar o comportamento da transferência metálica, da poça de fusão e da interação dos arcos voltaicos, foi utilizado o recurso de filmagem em escala de tempo normal e em alta velocidade. Para filmagem em tempo real, foi utilizado a câmera *seelector ICAM*, do fabricante *hema electronic*, que permite filmar a uma taxa de até 30 quadros por segundo, com resolução máxima de 768 x 496 px, e tamanho de pixel de 10 μm , cuja a utilização de filtros analógicos e digitais permitem a filmagem do arco elétrico [52].



Figura 54 – Câmera para filmagem dos arcos elétricos em tempo real.

Já para a filmagem em alta velocidade foi utilizado a câmera de alta velocidade IDT Y4-S2. O modelo possui capacidade para a gravação de até 5100 quadros (*frames*) por segundo (fps) com a resolução de 1024 x 1024 px [53]. A inevitável concentração de luminosidade por toda a região de interesse oriunda dos arcos Plasma e GMAW, proporciona um efeito negativo na captura das imagens por esta câmera, já que alto grau de radiação dos arcos satura a imagem produzida pela câmera. Assim, como forma de contornar esse efeito, foi adicionado a filmagem um sistema de iluminação a laser. Trata-se de um laser classe 4, com comprimento de onda de $810 \pm 10 \text{ nm}$. Esse equipamento pode operar com pulsos de laser de maneira sincronizada com a câmera de alta velocidade e, nessas condições, oferece uma potência de 500 W. Os principais equipamentos necessários para filmagem de alta velocidade estão expostos na Figura 55.



Figura 55 – Principais equipamentos necessários para filmagem de alta velocidade (A- câmera de alta velocidade; B- Lente; C- Sistema de iluminação LASER)

Para medir o campo magnético presente na tocha de soldagem, foi utilizado um fluxômetro da marca Lake Shore, que pode medir densidade de fluxo magnético ou campo magnético em sistemas de corrente contínua (DC). O mesmo possui uma resolução de $\pm 1/300,000$ mT e frequência de resposta de 50 kHz, conforme Figura 56.

Model 480 Fluxmeter



Figura 56 – Fluxômetro utilizado para medir o campo magnético da tocha de soldagem.

3.2 Materiais

Visto que o objetivo do trabalho é obter maiores informações acerca das características e comportamento do processo híbrido perante as diferentes condições de trabalho, os testes foram conduzidos em materiais de comum uso na indústria de forma geral, e cujo valor agregado e disponibilidade são mais convenientes, sendo assim, foi escolhido a liga de aço SAE 1020, e o arame de adição utilizado foi o arame ER 70S-6, de diâmetro 1,2 mm.

Uma vez que existem dois arcos coexistindo em uma mesma região, o volume de material líquido gerado na poça de fusão é relativamente alto. Partindo dessa afirmativa, foi adicionado para as soldagens de união o mata-junta (*backing*) com o objetivo de acomodar o material líquido, permitindo assim a formação de uma raiz uniforme sem eventuais descontinuidades. Para efeito de comparação, e para gerar uma maior amostragem de dados, três tipos de *backing* foram utilizados, cerâmico, cobre e fibra de vidro.

Dentre as principais diferenças entre os tipos de *backing* pode-se citar a sua adaptabilidade, rigidez, e condutividade térmica. O *backing* cerâmico é largamente utilizado na indústria, devido ao seu baixo custo e resultados satisfatórios proporcionados. É construído a partir de pequenas seções rígidas que são unidas por uma fita adesiva de alumínio, permitindo assim moldar o *backing* à geometria da peça.

Já o *backing* de fibra de vidro (*fiberglass*) tem como principal característica sua flexibilidade, o que possibilita ajustar o material à junta, moldando a raiz da soldagem conforme o desejado, ao contrário dos *backings* rígidos, ele absorve variações de high-low da junta, desalinhamento e empenamento da chapa [54].

O *backing* de cobre, ao contrário dos outros, possui elevada condutividade térmica, o que é um fator desejado para favorecer o resfriamento da solda. No entanto, por ser um metal, geralmente ele necessita de refrigeração, caso contrário ele pode fundir durante o processo causando contaminação ao cordão de solda. Além disso, o formato dele é integralmente rígido, não sendo adaptável a variações geométricas da junta a ser soldada aquém da planejada [55]. A ilustração para os tipos de *backing* apresentados podem ser visualizados na Figura 57.

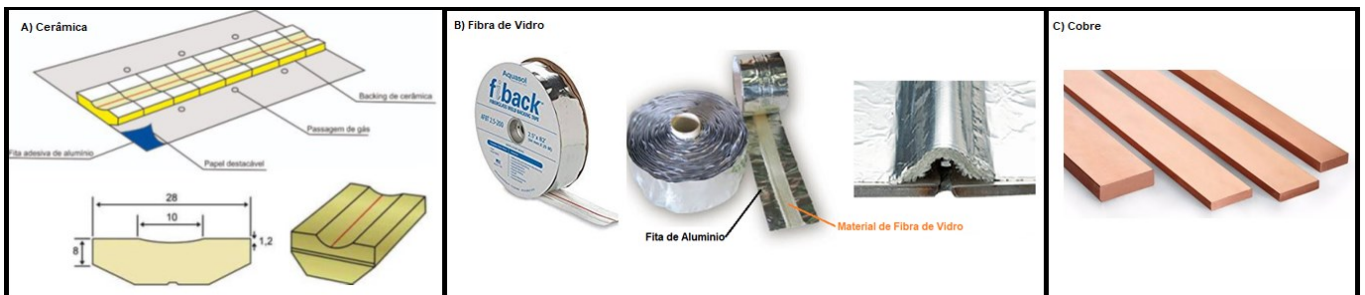


Figura 57 – Ilustração dos modelos de *Backing* utilizados nos ensaios (A) cerâmico (B) fibra de vidro (C) cobre.

3.3 Métodos

3.3.1 Calibração do Sistema de Medição

Sendo um dos objetivos desse trabalho a investigação do comportamento e interação elétrica de ambos os arcos presentes no processo híbrido, fez-se necessário assimilar um sistema de medição robusto e preciso o suficiente para medir os sinais de tensão e corrente impostos pelas fontes de soldagem, e que trabalhasse de forma sincronizada com as filmagens em alta velocidade.

Assim sendo os equipamentos apresentados SAP e TC1 foram integrados ao MotionPro DAS para fornecer os sinais elétricos do processo. A Figura 58 mostra a configuração estabelecida nas entradas analógicas do MotionPro DAS a partir dos instrumentos utilizados..

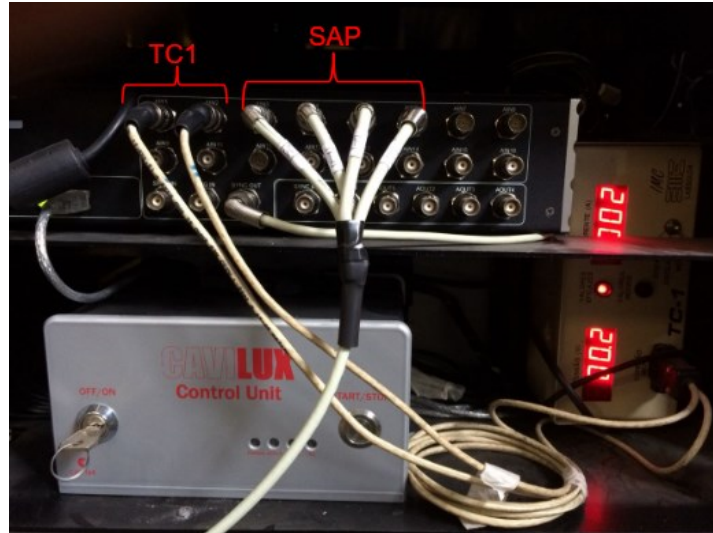


Figura 58 – Configuração entre os instrumentos utilizados para aquisição dos sinais elétricos

Após a integração, foi necessário a realização de uma calibração para observar o comportamento do SAP e do TC1 e do sistema de medição atuando de forma sincronizada. Para isso, foi feito um ensaio preliminar aquisitando a corrente e tensão plasma com um osciloscópio, nesse momento a fonte GMAW permaneceu desligada. Os parâmetros de corrente de plasma (I_{plasma}), campo magnético ajustado na fonte (B), gás de plasma (G_{pl}) e velocidade de soldagem (V_s) utilizados nesse ensaio, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para ensaio de calibração.

I_{plasma} (A)	B (%)	G_{pl} (l/min)	V_s (cm/min)
150	40	3,0	45

De modo a realizar uma comparação confiável entre os valores medidos, foram realizadas aquisições de corrente e tensão no mesmo ponto em três canais diferentes simultaneamente, para posterior comparação entre os valores medidos. O esquemático de medição é mostrado na Figura 59, vale ressaltar que para esse caso foi medido a corrente do plasma juntamente com a corrente do arco piloto.

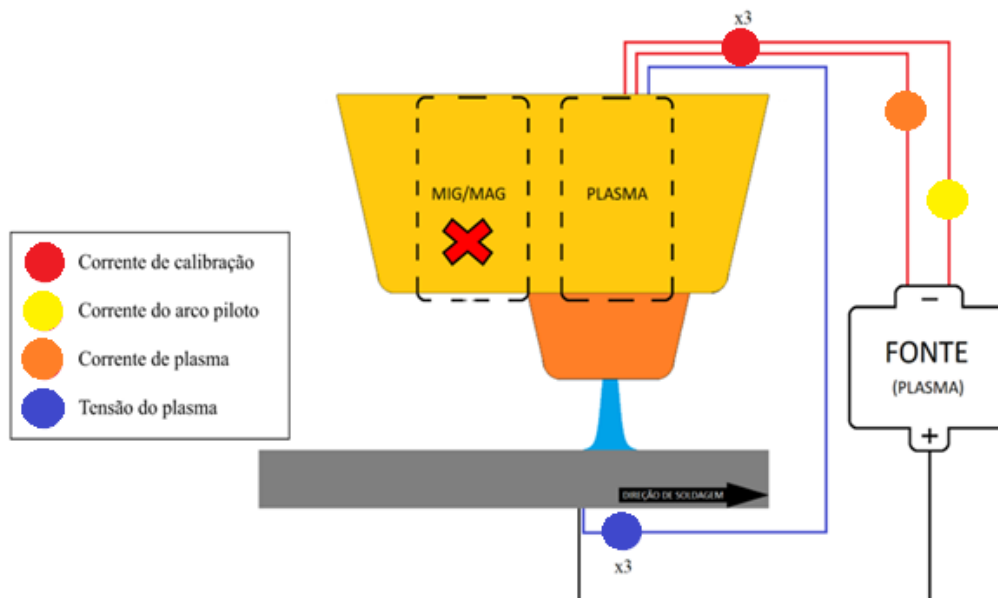


Figura 59 – Esquemático de tomada dos sinais elétricos para o ensaio de calibração.

Sabe-se que em sistemas de medição, transdutores convertem uma informação de algum fenômeno físico captado por um sensor em uma grandeza mensurável. Nesse ensaio foram utilizados transdutores de corrente (amperímetros de efeito Hall) e a medição da tensão foi feita de forma direta pelos sistemas de medição. Os respectivos sinais passam pelo sistema de adequação à faixa de entrada de sinais MotionPro ($\pm 10V$) para serem amostrados pelo equipamento. Todas as medidas são amostradas como um sinal de tensão (V) para posterior conversão na unidade de grandeza desejada aplicando-se um fator de conversão (ganhos ou perdas) aos valores medidos.

Após esta aquisição inicial é realizado a conversão nas grandezas desejadas e aplicado possíveis ganhos ou perdas nos valores obtidos para finalizar a calibração. A correspondência dos valores resultantes entre si, e os valores teóricos indicará se o sistema está devidamente calibrado para a aplicação em questão.

3.3.2 Interação Física entre os Arcos Elétricos

Para a melhor caracterização da dinâmica do processo Plasma-GMAW, em sua gama de possibilidades, uma série de testes foram propostos de forma a analisar a interação entre os arcos Plasma e GMAW, através da monitoração dos sinais elétricos do processo, aliado com as filmagens do arco.

No entanto, antes dos testes, faz-se necessário um melhor entendimento do processo em termos de caminho da corrente percorrido, e das forças eletromagnéticas atuantes no sistema.

Para isso, a partir da expertise adquirida e do estudo do processo e referências bibliográficas foi proposto um modelo elétrico para o processo, para dar suporte as análises.

Visto que a premissa do processo é a alta penetração, e que o processo GMAW é responsável em maior parte pelo preenchimento, enquanto o processo plasma é puramente responsável pela fusão inicial da peça, para esta etapa, foi fixado a tensão e corrente GMAW, em patamar suficiente para que ocorresse a transferência pelo modo *spray*, e variados os parâmetros de Plasma conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para verificar a interação entre os arcos nesta etapa.

Ensaio	Gás		U-GMAW (V)	I-GMAW (A)	Va (m/min)
	I-plasma (A)	Plasma (l/min)			
1.1	100				
1.2	150				
1.3	200	3	32	350	13
1.4	250				
1.5	300				

3.3.3 Estudo do Campo Magnético Externo

Visto que uma das características primordiais quando mencionado o equipamento de trabalho em questão é o campo magnético externo, que é supostamente aplicado para a devida manutenção de ambos os arcos atuantes, foram realizados alguns testes para tentar determinar e quantificar sua influência no processo.

Antes de partir para os testes práticos para testar a eficiência do campo magnético, um teste simples foi feito para verificar se a intensidade do campo presente na tocha é suficiente para movimentar uma bússola. Para isso, a tocha foi colocada em modo teste (campo magnético ativado) e uma bússola posicionado distante à tocha, a mesma foi aproximada em direção a tocha Figura 60.

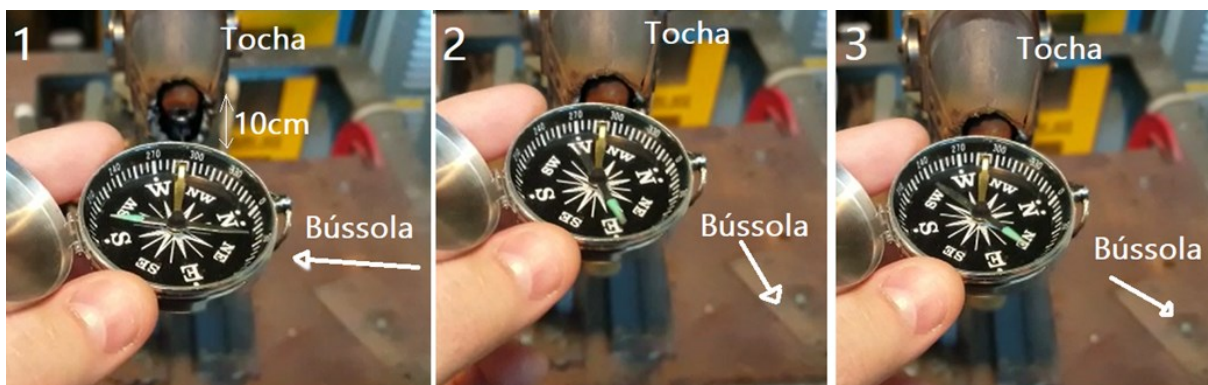


Figura 60 – Teste realizando a aproximação da bússola à tocha, durante o modo teste do campo magnético.

Conforme teste realizado, foi verificado que a partir de aproximadamente 10 cm de proximidade com a tocha, o campo magnético aplicado pela tocha exercia influência no campo magnético da bússola, provando sua existência.

Em seguida foi utilizado um fluxômetro de campo para determinar a intensidade do campo magnético. Para realizar a medida do campo magnético, o sensor foi posicionado na periferia do bocal da tocha em contato com o condutor ferromagnético que transporta o campo magnético, conforme Figura 61.



Figura 61 – Medição do campo magnético presente no bocal da tocha no modo teste.

A partir da intensidade do campo magnético, foi realizado uma modelagem quantitativa simplificada das possíveis interações eletromagnéticas entre os arcos elétricos e o campo magnético externo, para um melhor entendimento do comportamento dos arcos elétricos.

Segundo o fabricante, a existência do campo magnético externo é preponderante para o funcionamento do processo e o mesmo possui um ajuste percentual que varia de 2 a 100 %. Apesar de o equipamento se tratar do tipo *heavy duty* a tocha de soldagem é do tipo *medium duty*, ou seja, o equipamento pode gerar até 360 A, porém é recomendável que a tocha trabalhe até uma corrente de 200 A. Ao mesmo tempo, é possível verificar conforme Figura 62 que para esse tipo de tocha é recomendável um máximo de 40 % no ajuste do campo magnético.

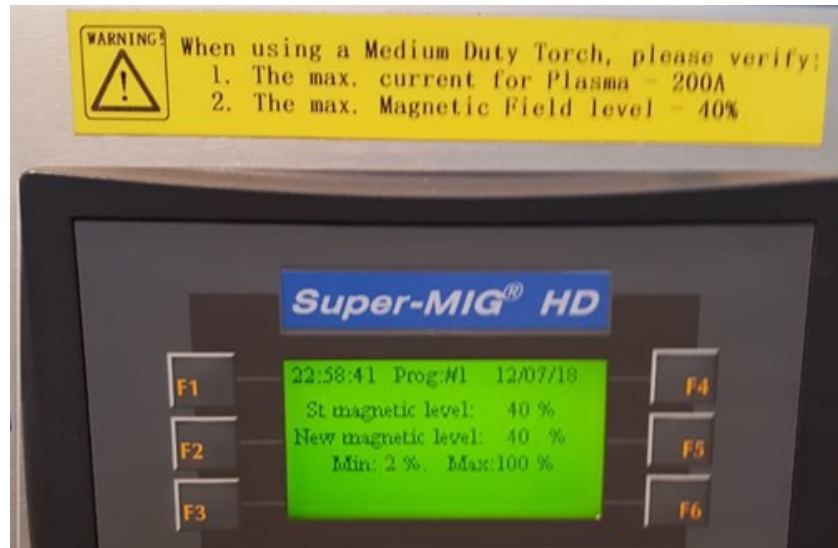


Figura 62 – Exibição do display da fonte SUPER-GMAW no modo de ajuste do programa de campo magnético.

Visto que de acordo com os manuais apresentados, os valores limites sugeridos são para trabalhos longos. E os trabalhos realizados para efeito dos testes tem curta duração e grande duração de intervalo entre testes, garantindo pleno arrefecimento da tocha, foi permitido para os testes extrapolar os valores máximos sugeridos, para tentar atingir maior contraste nos resultados. Dessa forma, foram realizados testes utilizando 2, 40 e 100% no ajuste de campo magnético.

Ainda considerando os ensaios propostos para verificação da eficácia do campo magnético, foi utilizado o processo GMAW do tipo pulsado, com uma alta amplitude entre a corrente de base e de pulso. A maior variação da corrente imposta pelo arco GMAW deve resultar em uma maior variação na compressão e expansão dos arcos elétricos durante a soldagem, evidenciando possivelmente uma maior atuação do campo magnético externo. A matriz de ensaios é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para os ensaios do campo magnético

Ensaio	Ip(A)	tp(ms)	Ib(A)	tb(ms)	Va(m/min)	Iplasma(A)	Gás plasma	
							(L/min)	B (%)
2.1								2
2.2	550	1,7	70	4,3	8	150	3	40
2.3								100

3.3.4 Estudo da Transferência Metálica

Em virtude de não existir uma base de dados que possa fornecer informações a respeito das particularidades apresentadas na transferência metálica do processo Plasma-GMAW serial,

foi decidido, a partir da expertise obtida ao longo dos testes estudar os principais tipos de transferência metálica recorrentes no processo.

Na medida que o objetivo do processo não é o uso de baixa densidade de energia, a transferência metálica por curto-circuito não foi muito explorada, sendo que foram selecionados para os ensaios condições em que o processo GMAW mantém uma energia mais alta, e é variado a energia imposta no plasma e também a situação onde o GMAW mantém a energia mais baixa, e é variado a corrente de plasma, a matriz de ensaios pode ser verificada na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para verificação da transferência metálica.

Ensaio	Iplasma (A)	Gás Plasma (l/min)	U-GMAW (V)	Va (m/min)
3.1	100			
3.2	200		32	
3.3	300	3		12
3.4	200		26	
3.5	300			

3.3.5 Estudo da Dinâmica do Processo Híbrido na Poça de Fusão

A fabricante do equipamento, em sua publicidade, atribui constantemente ao arco plasma a capacidade de penetração enquanto que o arco GMAW atuaria principalmente como preenchimento. Essa abordagem é questionável. Uma vez que é verificado diversas possibilidades para a parametrização do processo híbrido, é esperado que possa haver mais de uma forma de atuação de ambos os arcos, não se limitando as descritas pelo fabricante.

Dessa forma, os testes apresentados na Tabela 5 foram realizados, e a dinâmica da poça de fusão foi analisada através de filmagens do arco.

Tabela 5. Parâmetros utilizados para verificação da poça de fusão.

Ensaio	Iplasma (A)	Gás Plasma (l/min)	U-GMAW (V)	DBPP (mm)	Va (m/min)
4.1	100	3		5	
4.2	200	4		5	
4.3	300	5	32	5	12
4.4	200	3		7	
4.5	300	3		7	

3.3.6 Estudo da Morfologia do Cordão de Solda de acordo com os Parâmetros de Plasma

Concebendo a teoria de que os parâmetros de plasma têm grande influência no controle da geometria do cordão de solda, a exploração dos mesmos é um dos principais objetos de estudo no processo Plasma-GMAW Serial.

Suportado pela bibliografia que o processo plasma é principalmente influenciado pela corrente imposta no seu sistema, e pela vazão de gás de plasma, foi realizado uma DOE (*design of Experiment*) dos mesmos, que nada mais é que uma combinação fatorial dos parâmetros que são objeto de análise. Os parâmetros foram selecionados com base nas aplicações máximas e mínimas de corrente e gás de plasma permitidas pela fonte de soldagem, mantendo um degrau (*step*) entre eles, suficiente para poder ser percebido alterações no processo de forma geral. Para esses ensaios a tensão GMAW foi mantida 32 V, orifício do bico constritor de 3,2mm, recuo do eletrodo 2mm, Velocidade de alimentação de arame de 13m/min, velocidade de soldagem 45cm/min, gás de proteção GMAW 92%Ar-8%CO₂, Gás de plasma e de proteção Ar. Os ensaios foram conduzidos sobre chapa, de espessura de 1/2" na posição plana. A bateria de testes variando corrente e gás de plasma podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6. DOE realizada para os parâmetros de plasma variando I_p de 100 a 300 A e Gás de plasma 3 a 7 l/min.

Gás Plasma (l/min)	3	4	5	6	7
I _{plasma} (A)					
100	x	x	x	x	x
150	x	x	x	x	x
200	x	x	x	x	x
250	x	x	x	x	x
300	x	x	x	x	x

Em seguida foram feitos os cortes transversais dos corpos de prova na região intermediária da solda com a serra fita, e realizado as análises macrográficas das mesmas após lixamento até a lixa de 1200 e polimento em alumina, conforme a Figura 63.



Figura 63 – Elementos analisados nas macrografias das soldas realizadas.

3.3.7 Ensaios em soldagem de União

Após o estudo aprofundado das características elétricas e físicas do processo, é proposto a aplicação do mesmo, em processos simples, buscando a validação dos resultados encontrados e também o enriquecimento da gama de possíveis aplicações para o mesmo.

Devido a elevada energia imposta pelo processo Plasma-GMAW, o uso de *backing* faz-se necessário para as soldagens propostas nesse capítulo. Logo, de forma a verificar quais tipos de *backing* se adaptam melhor ao processo, foram testados três tipos: cerâmico, fibra de vidro e cobre. A configuração proposta para realizar esse tipo de união está apresentada na Figura 64. Os principais parâmetros utilizados para estes ensaios podem ser visualizados na Tabela 7.

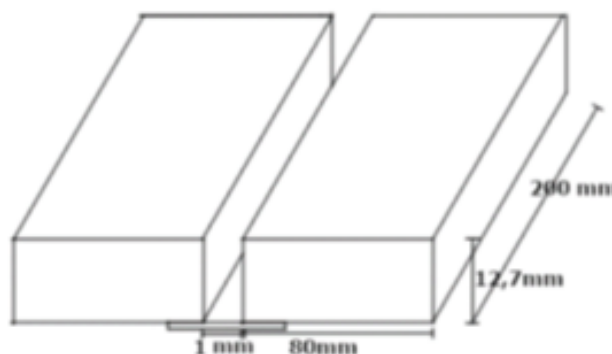


Figura 64 – Geometria da junta de topo utilizada para soldagem com diferentes tipos de *backing*.

Tabela 7. Parâmetros de soldagem para junta de topo e chapa de ½” conforme Figura 64

	GMAW	Plasma
Corrente Média GMAW	290 A	200 A
Gás de Proteção	15 L/min	18 L/min
Tensão Média	35 V	20 V
Gás de Plasma		4.0 L/min
Velocidade de Arame	12 m/min	
Velocidade de Soldagem	45 cm/min	
Distancia bico peça	17 mm	5 mm
Diâmetro do bocal constritor		3,2mm
Recuo do Eletrodo		2 mm

Visto que uma das propostas para o processo Plasma-GMAW, é a substituição do arco submerso (SAW), foi escolhido a aplicação da soldagem circunferencial de tubos de paredes espessas, visto que essa é uma aplicação muito comum do processo SAW na indústria [56].

Pesquisas mostraram que a soldagem por arco submerso pode chegar em média a 50 cm/min de velocidade de soldagem, e que para um material de ½” (12,7 mm) de espessura,

mais que um passe de soldagem é necessário. Além disso, é requerido uma extensa preparação de chanfro, conforme pode ser visualizado na Figura 65-A [56].

Caso seja possível aplicar os parâmetros mencionados na Tabela 7 para esse tipo de soldagem, porém em passe único, já é um enorme ganho em relação ao processo SAW, visto que o mesmo necessita ao menos dois passes para executar esse tipo de soldagem.

Para realizar a soldagem, a junta proposta para o processo plasma-GMAW foi proposta conforme Figura 65-B. O tubo foi fixado em uma placa rotativa, enquanto o robô antropomórfico foi posicionado de forma a realizar a soldagem de topo da junta (Figura 66).

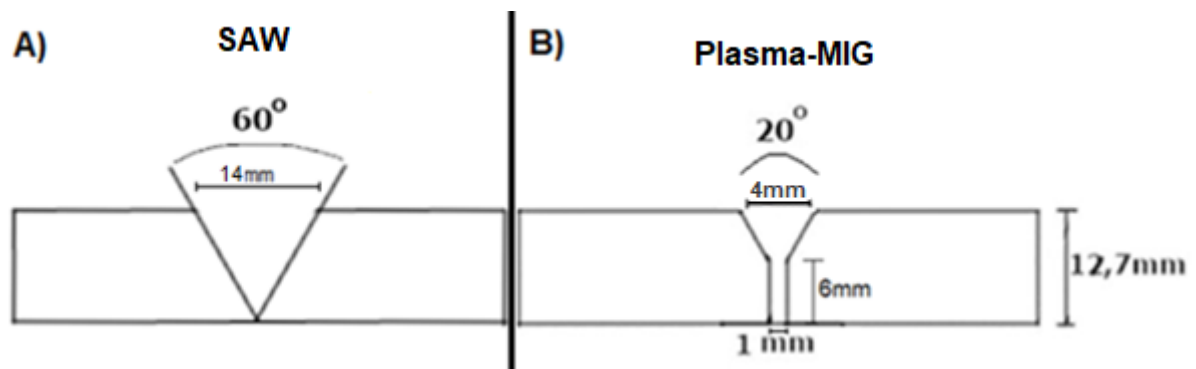


Figura 65 – Junta utilizada para posterior soldagem de tubo com o processo Plasma-GMAW, em comparação a juntas comumente soldada pelo processo SAW.

O material do tubo soldado é um API X-70, com 15” (381mm) de diâmetro e parede de 12,7 mm, o material de adição utilizado foi um arame AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro. E nesse caso foram utilizados dois tipos de *backing* para efeito comparativo, de fibra de vidro e cerâmico, não foi possível a utilização do *backing* de cobre, pois ele é rígido, e não se adapta a circunferência do tubo. Demais parâmetros utilizados podem ser vistos na Figura 66.



Figura 66 – Bancada de ensaios para soldagem em Tubo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Calibração do Sistema de Medição

Para o ensaio de calibração, foi medido o sinal proveniente dos transdutores durante a soldagem plasma, com os três canais de medição propostos (TC1, CH1 e CH2) medindo o mesmo ponto. O gráfico da Figura 67 apresenta 100ms da aquisição realizada, anterior a aplicação dos ganhos.

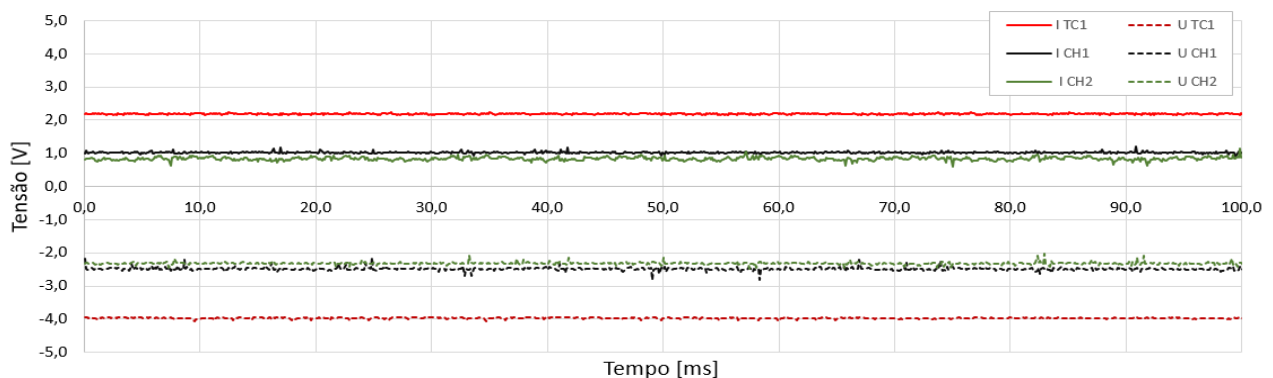


Figura 67 – Aquisição de dados provenientes do SAP e do TC1

É possível perceber que os sinais se mantêm constante ao longo do tempo, o que é esperado, visto que foi programado uma corrente fixa para o arco plasma. Nota-se também, que o sinal do TC1 está afastado em relação aos sinais provenientes do SAP, o que é natural visto que se tratam de sistemas de medição diferentes, podendo apresentar os sinais diferentes após a adequação realizada pelo MotionPro à faixa de ($\pm 10V$).

Nesse contexto, ainda é possível verificar uma pequena diferença entre os sinais oriundos do SAP (CH1 e CH2), o que também pode ser explicado devido a diferença dos componentes eletrônicos presentes em cada canal e a desigualdade nos modelos de transdutores utilizados.

Após a aquisição dos sinais, os mesmos foram convertidos para as grandezas físicas desejadas aplicando-se os ganhos e ajustes necessários, conforme ilustra a Figura 68.

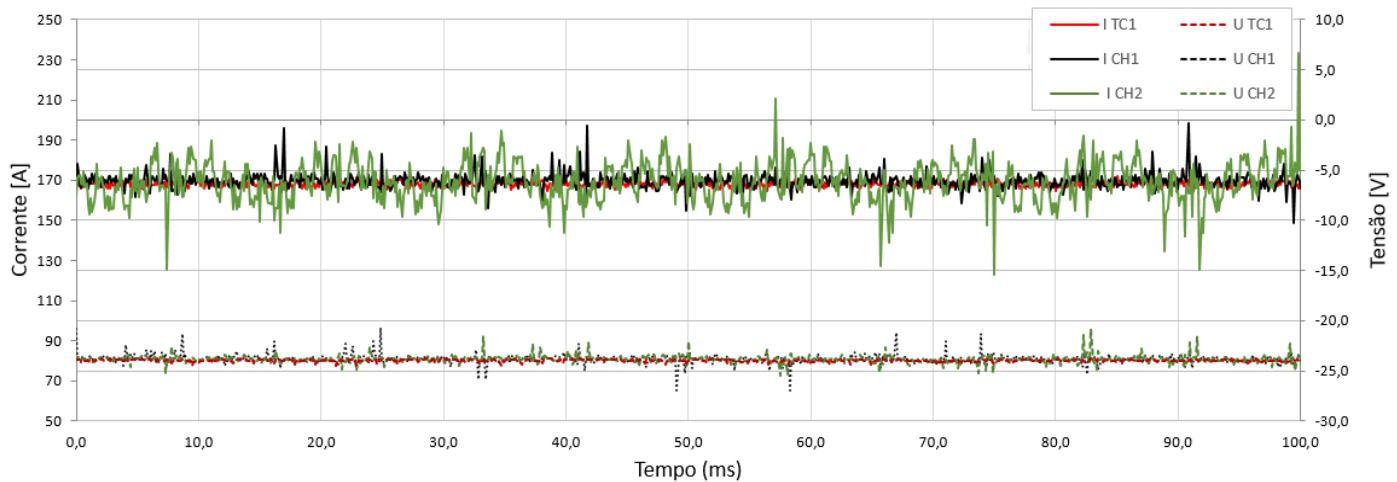


Figura 68 – Aquisição de dados provenientes do SAP e do TC1 ajustados para as grandezas físicas correspondentes.

É importante salientar que as adequações dos sinais oriundos do SAP às grandezas correspondentes geraram um ruído de alta frequência. Isso se acontece devido a conversão analógico-digital deste equipamento, a integração do SAP com o MotionPro não eliminou os sinais digitais de alta frequência do SAP, o que é causa provável do ruído gerado.

O TC1, pelo contrário, por ser um equipamento totalmente analógico, não apresentou ruído exacerbado, conforme Figura 69. Conquanto, visto que os valores médios dos sinais medidos pelo SAP convergem para aqueles mesmos medidos pelo TC1, o ruído não prejudica a medição de forma geral.

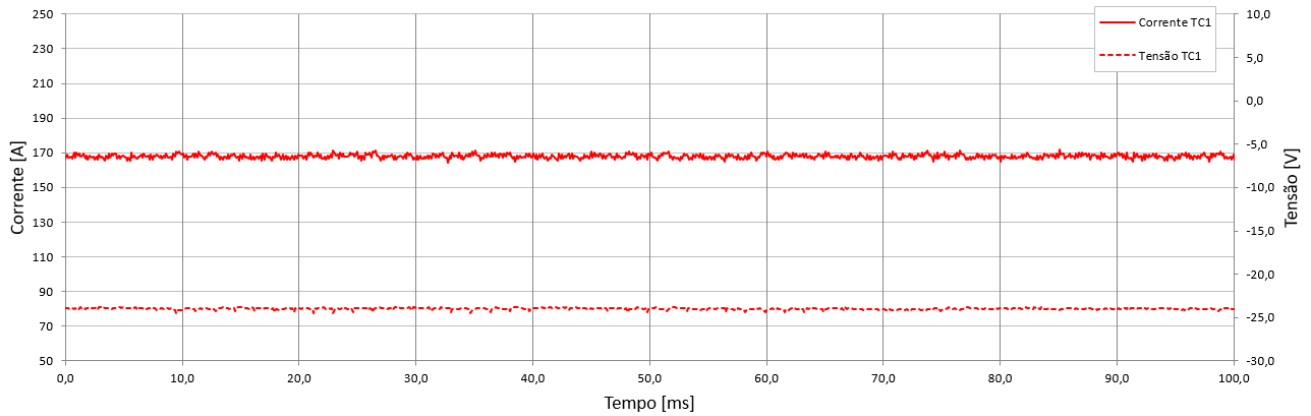


Figura 69 – Aquisição de dados provenientes do TC1 ajustados para as grandezas físicas correspondentes.

Em suma, pode-se considerar o sistema apto para a realização das medições uma vez que:

- A corrente imposta na fonte mais a corrente do arco piloto totaliza 170 A, muito próxima à corrente resultante nos três canais de medição;
- Há uma sobreposição dos sinais medidos nos três canais, indicando grande aderência do sinal medido, à grandeza ajustada.

4.2 Interação Física entre os Arcos Elétricos

4.2.1 Modelagem Elétrica para o Processo Híbrido e efeitos elétricos da hibridização

Em teoria, os arcos Plasma e GMAW durante o processo híbrido, são tratados de forma isolada, pois devido à presença de duas fontes de soldagem, e de dois circuitos elétricos, admite-se que não há uma interferência tão direta da atuação de uma fonte nas características elétricas do vizinho. Porém, na prática a partir das filmagens do arco elétrico, é verificado que na região central do arco, há um acoplamento elétrico entre eles.

Em diversos momentos do trabalho, durante a observação do arco elétrico a partir das filmagens, foi possível evidenciar uma porção do arco elétrico plasma sendo desviada em direção ao arco GMAW, sustentando o suposto fato da passagem de corrente entre as duas tochas. Um exemplo disso é mostrado na Figura 70-A, para três diferentes parâmetros de soldagem, onde essa região intermediária aos dois arcos é verificada. A partir da alteração de alguns parâmetros simples de imagem (brilho, contraste, balanço de cinza, saturação, exposição), esse acoplamento entre os arcos elétricos ficam ainda mais evidentes, como pode ser verificado na Figura 70-B.

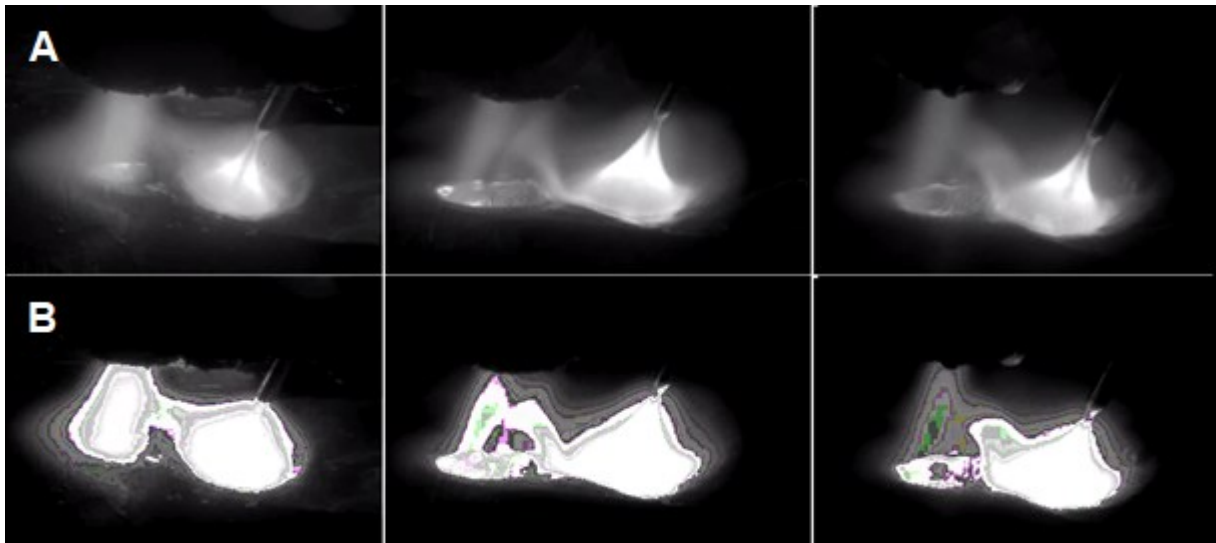


Figura 70 – Filmagem do arco elétrico (A) sem filtros digitais (B) a partir da aplicação de filtros digitais.

Em primeira hipótese, pode-se assumir que esse acoplamento entre os arcos elétricos se trata da junção dos arcos em sua área de atuação, semelhante ao que acontece no processo TIG-Duplo Eletrodo (TIG-DE). Porém, essa afirmação não faz sentido, uma vez que no processo TIG-DE, o sentido da corrente de ambos os arcos aponta na mesma direção.

Visto que nesse caso, as correntes de cada processo caminham em sentidos opostos, esse acoplamento não poderia ser uma junção dos arcos elétricos, mas um caminho alternativo para a corrente. Dessa forma, assumindo o processo de soldagem como uma estrutura de resistências, além dos arcos Plasma e GMAW atuarem individualmente, há uma intersecção entre os arcos Plasma e GMAW, conforme Figura 71.

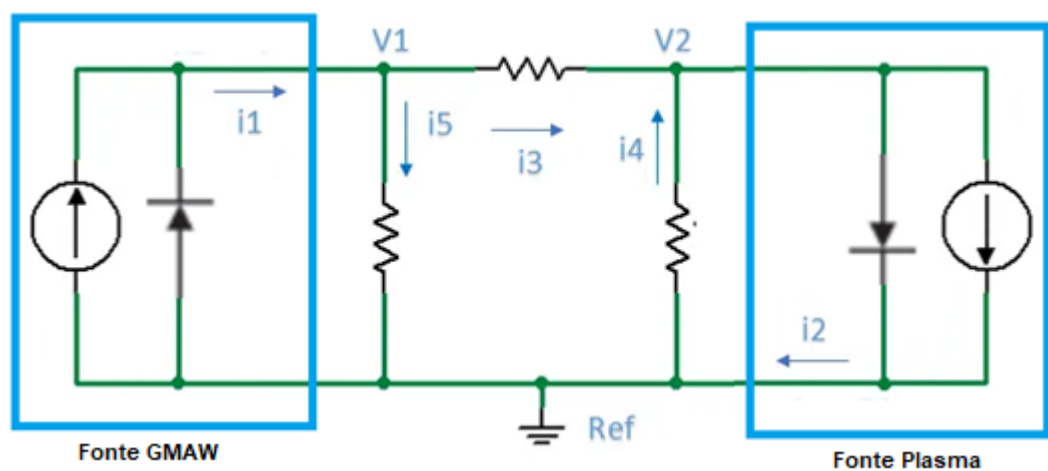


Figura 71 – Representação do modelo elétrico do processo Plasma-GMAW serial.

4.2.2 *Características Elétricas do Processo Híbrido*

Como sugerido por alguns autores, há a possibilidade de passagem de corrente entre tochas, e alguns aspectos do trabalho levaram a crer que esse fenômeno é relevante para o processo híbrido. Dessa forma, alguns testes foram propostos de forma a verificar a resposta elétrica do sistema mediante diferentes parametrizações. A monitoração dos sinais elétricos do processo aliado as filmagens do arco foi realizada variando a corrente de plasma e mantendo a corrente GMAW fixa, estes ensaios podem ser verificados na Figura 72.

Ao analisar as filmagens apresentadas na Figura 72, pode-se visualizar que a porção do arco Plasma que é desviado em direção ao arco GMAW é muito mais relevante para correntes de Plasma de até 200 A. A partir desse ponto, não há mais divisão visível do arco plasma, sugerindo que há uma menor hibridização dos arcos, e a corrente mantém preferencialmente o sentido tradicional.

Nos oscilogramas de corrente e tensão apresentados, pode-se verificar um comportamento linear para todos os parâmetros observados. Isso é natural que ocorra, uma vez que o plasma está atuando no modo de controle de corrente, mantendo a mesma constante, e o GMAW está atuando no modo controle de tensão, que tende a manter a corrente constante também visto que a transferência predominante é no modo spray.

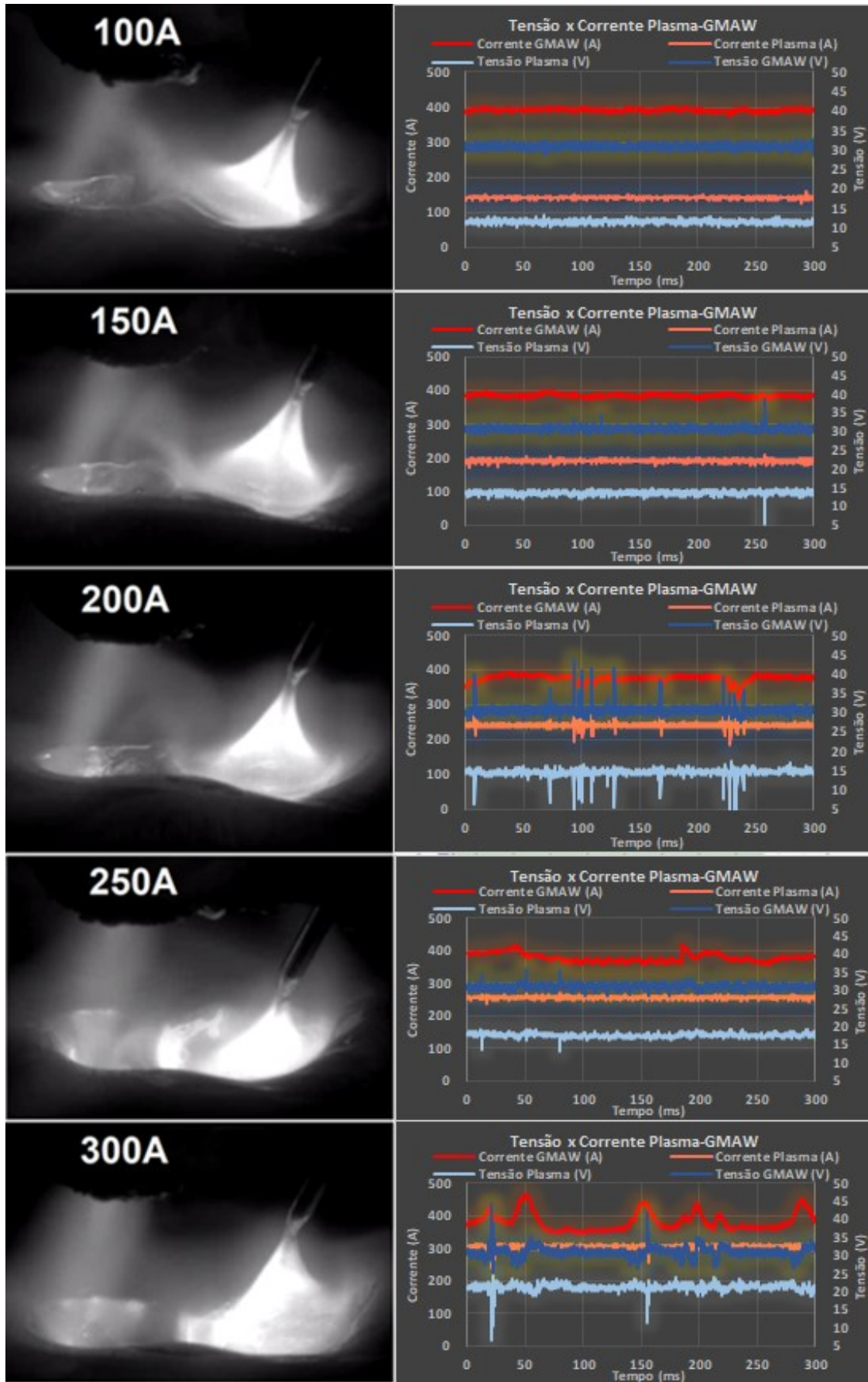


Figura 72 – Filmagens dos Arcos elétricos variando a corrente de plasma ajustada na fonte e respectivos oscilogramas de corrente e tensão.

Durante os ensaios, foi verificado que a fonte Plasma é capaz de gerar a corrente imposta na fonte, quando atuando apenas o arco plasma. Porém, quando há a atuação simultânea do processo GMAW, há uma brusca alteração nos parâmetros de plasma. Na prática, é possível separar em quatro etapas o comportamento da corrente e tensão de ambos os processos em seu início, conforme Figura 73, onde: o arco Plasma é aberto, e sua corrente e tensão sobem até atingir um patamar que é pré-estabelecido na fonte (1); o patamar de corrente de plasma é atingido e o arco elétrico é estabilizado (2); o arco GMAW é aberto, ocasionando uma pequena instabilidade nos parâmetros elétricos do sistema (3); o arco GMAW é estabilizado, sendo que nessa etapa a corrente de plasma aumenta em relação ao seu patamar original, enquanto que a tensão plasma cai drasticamente (4).

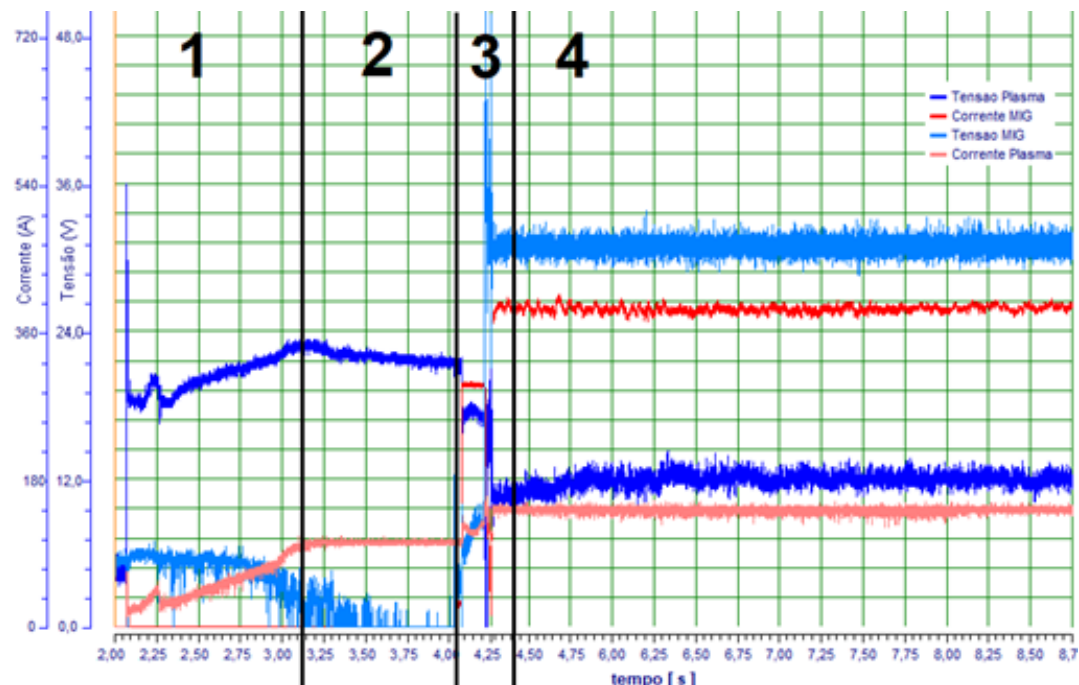


Figura 73 – Oscilogramas de corrente e tensão dos processos Plasma e GMAW elucidando o comportamento gerado no início de ambos os processos.

É esperado que durante o arco híbrido, os processos individuais possam se modificar em termos elétricos, pois as alterações provocadas pela sobreposição dos arcos elétricos alteram drasticamente as características dinâmico-ativas do arco elétrico. No entanto, a resposta obtida foi inesperada, uma vez que durante o arco híbrido, o Plasma não alterou somente a tensão, mas também sua corrente.

Isso não deveria ocorrer, pois o processo Plasma trabalha como modo controle de corrente, logo ele deveria ser capaz de manter a corrente programada constante, independente de interferências externas. O fato de a corrente ser alterada durante o arco híbrido, acaba corroborando com a teoria de outros autores, de que há a passagem de corrente entre tochas.

Com base nesse comportamento, foi verificado que de uma forma geral, a corrente de plasma ajustada na fonte é menor do que a corrente medida no cabo de alimentação plasma. Os respectivos valores, assim como suas diferenças são exibidos na Tabela 8.

Tabela 8. Medições de corrente realizadas para os diferentes ensaios e diferença do ajustado.

Ensaio	Corrente de Plasma Ajustada na Fonte (A)	Corrente Média GMAW (A)	Corrente de Plasma medida (A)	Diferença (Medida - Ajustada)
1	100	390	143	43
2	150	384	193	43
3	200	379	244	44
4	250	369	260	10
5	300	377	307	7

Corroborando com as filmagens do arco elétrico, cujos maiores desvios do arco plasma em direção ao GMAW ocorreram para correntes aplicadas inferiores a 200 A, as maiores diferenças entre corrente ajustada e medida, também foram para correntes inferiores a 200 A, provando a possível correlação entre estes sinais elétricos e os ensaios visuais. A variação da corrente no processo GMAW por sua vez foi relativamente baixa, o que indica que essa não é diretamente afetada pela variação da corrente de plasma.

Em um primeiro momento, o simples fato de haver uma diferença entre as correntes medidas e ajustada na fonte não indica uma correlação direta com a passagem de corrente entre as duas tochas. Isso se trata de um comportamento irregular, pois a fonte plasma deveria ser capaz de estabelecer a corrente pré-ajustada.

Ao observar a evolução da tensão plasma para esses testes, é verificado uma mudança de comportamento a partir da corrente de 200 A. A Tabela 9 mostra, que conforme a corrente imposta aumenta de 100 até 200 A, o incremento na tensão é linear, e na ordem de 1,5 V, porém, ao aumentar a corrente para 250, e 300 A, o incremento aumenta para ordem de 3,0 V. Ou seja, há uma transição no comportamento da tensão Plasma, que é sustentado pela análise das filmagens do arco.

Tabela 9. Dados retirados dos ensaios elucidando o incremento da tensão com a mudança da corrente

Ensaio	Corrente de Plasma Ajustada na Fonte (A)	Corrente de Plasma medida (A)	Tensão Plasma (V)	Incremento na Tensão (V)
5.1	100	143	11,9	
5.2	150	193	13,5	+1,7
5.3	200	244	14,9	+1,4
5.4	250	260	17,9	+3,0
5.5	300	307	21,3	+3,4

Se for levado em consideração a corrente medida, é verificado que do ensaio 3, para o ensaio 4 da Tabela 9, a variação de corrente de saída foi de apenas 16 A, enquanto que a variação de tensão foi de 3,0 V, o que representa uma forte incongruência da tensão em relação a corrente comparado aos demais ensaios.

Ao examinar uma comparação da tensão com o aumento da corrente durante a soldagem Plasma (sem arcos sobrepostos), para os mesmos demais parâmetros, é verificado que o comportamento da tensão plasma deveria ser linear ao longo da mesma faixa de corrente (100 a 300 A), ou seja, com um incremento também linear, e constante (Figura 74). O fato de durante a soldagem híbrida haver um aumento desproporcional da tensão de plasma na faixa de corrente de 200 a 250 A, enquanto a corrente medida varia muito pouco, pode ser atribuído a uma possível redução da contribuição da fonte GMAW nesse ponto, ou uma alteração no caminho percorrido pela corrente durante o processo.

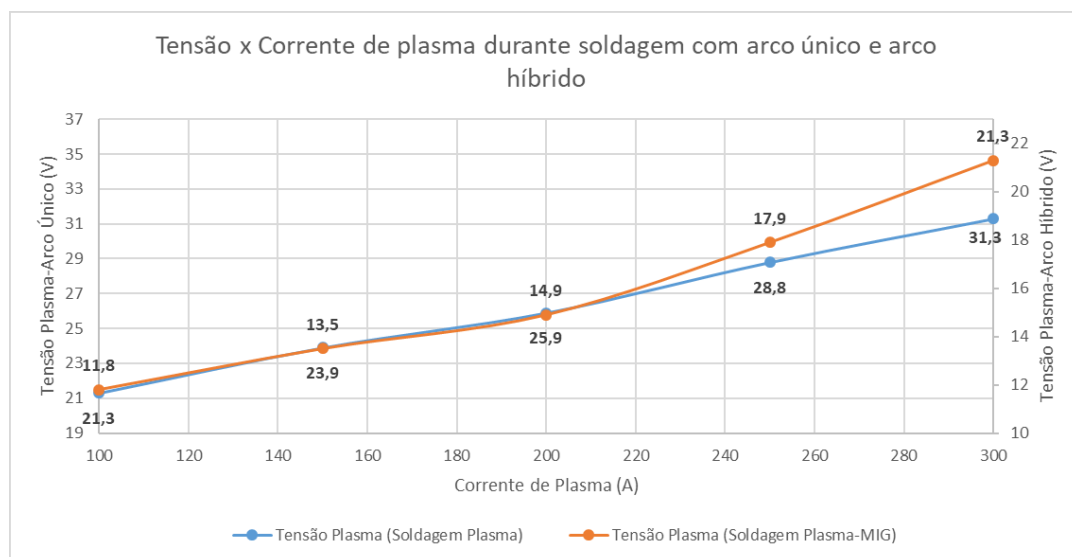


Figura 74 – Comportamento da tensão plasma para diferentes correntes de soldagem durante o processo Plasma-GMAW (laranja) e processo Plasma (Azul).

Essa observação corrobora com as filmagens apresentadas na Figura 72, onde é verificado que a porção do arco plasma que deflete em direção ao GMAW reduz significativamente

ao variar a corrente de plasma de 200 A para 250 A.

Em síntese, os dados analisados, levam a crer que há a passagem de corrente entre as tochas GMAW e Plasma, porém não é possível afirmar o caminho completo da corrente pois não foi medido a corrente no sistema de controle das fontes de soldagem (PWM).

Esse estudo, corrobora com dados apresentados na tese de FAGUNDES [30], que durante o processo Plasma-GMAW pulsado, encontrou também uma dispersão entre os valores programados e medidos, conforme Tabela 10.

Tabela 10. Correntes médias apresentadas no processo Plasma-GMAW pulsado em estudos realizados por Fagundes [30].

Ensaio	Corrente de Plasma Ajustada na Fonte (A)	Corrente média GMAW (A)	Corrente de plasma medida (A)	Diferença (Medida – ajustada)
6.1	50	203	109	59
6.2	100	204	141	41
6.3	150	206	173	23

A partir da comparação entre os resultados apresentados, é possível afirmar que a diferença apresentada tem forte relação com a desigualdade da corrente absoluta imposta nos processos Plasma e GMAW. Sendo que em ambos os casos, a medida que a corrente de plasma se aproxima da corrente GMAW média do processo, essa diferença na corrente programada pela aquisitada é reduzida.

4.2.3 Modelagem das Forças Magnéticas Atuantes no Sistema

Como é de conhecimento comum, a passagem da corrente em um meio, gera um campo magnético. Assumindo o esquema da Figura 75, onde apenas as correntes são contempladas, podemos afirmar, que a corrente GMAW (I_{m2}) gera um campo magnético H_m na região do plasma, e a corrente plasma (I_{p2}) gera um campo magnético H_p na região do GMAW. Esses campos vão gerar vetores força magnética F_{-Im} e F_{-Ip} respectivamente, que terão sentidos opostos, de forma a se repelir. Como o aspecto construtivo da fonte, existe um campo externo H_b , que tem por função gerar forças contrárias (F_{b-Im} e F_{b-Ip}) as forças de repulsão entre os arcos. O esquema completo está contemplado na Figura 75.

Vale ressaltar, que esse esquema desconsidera o campo e força magnética gerados por I_{mp} , pois acredita-se que mesmo para os valores máximos atingidos em I_{mp} , o mesmo não cria um campo magnético relevante na região do Plasma e do GMAW. Relembrando a lei de *Biot-Savart* apresentada na equação (1), a força magnética dependerá do seno que o vetor força está

posicionado em relação ao vetor corrente, logo, visto que na região do Plasma e do GMAW, o vetor força magnética faz um ângulo muito próximo de 0° com I_{mp} , o campo gerado nessa região pode ser desconsiderado.

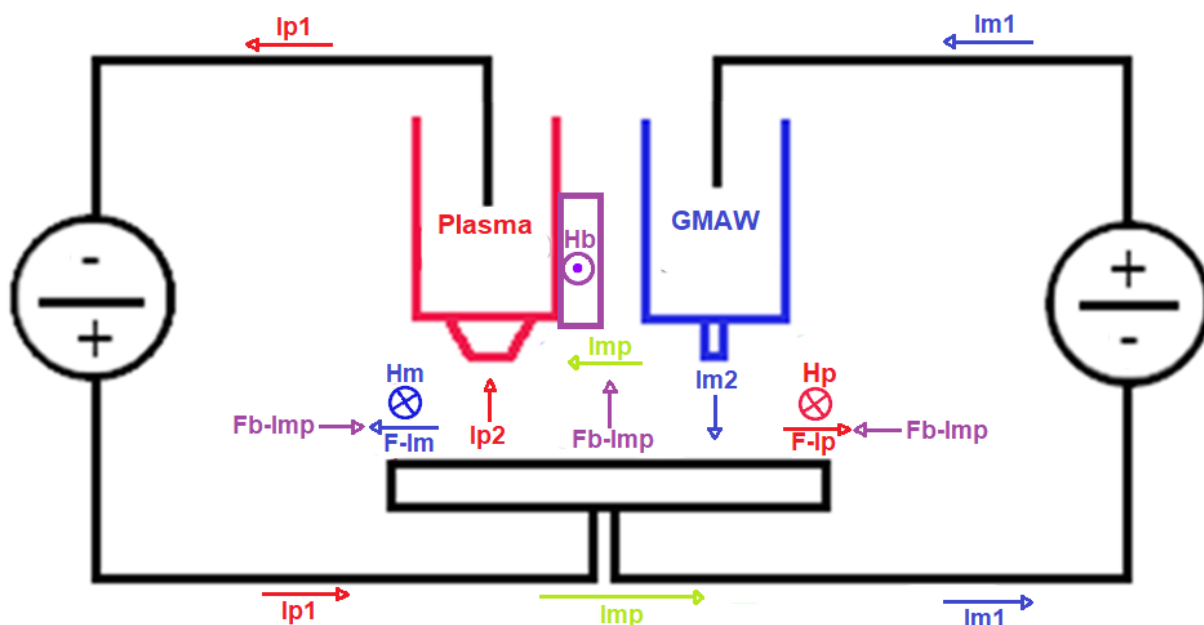


Figura 75 – Esquema dos campos magnéticos e forças magnéticas atuantes no processo Plasma-GMAW serial.

Ainda com base no diagrama da Figura 75, ao considerar o sentido de H_b , e a presença de I_{mp} , podemos afirmar que o mesmo gera um vetor força magnética (F_b-I_{mp}) que atua perpendicular à corrente I_{mp} , forçando-a para cima. Isso justificaria o comportamento do arco plasma para baixas correntes de plasma, pois ao invés de as linhas de força apresentarem uma transição sutil na porção central do arco plasma (Figura 76-A), é evidenciado nas análises visuais do arco, uma transição brusca na porção da corrente que é desviada em direção ao GMAW (Figura 76- B), possível consequência da força exercida pelo campo H_b .

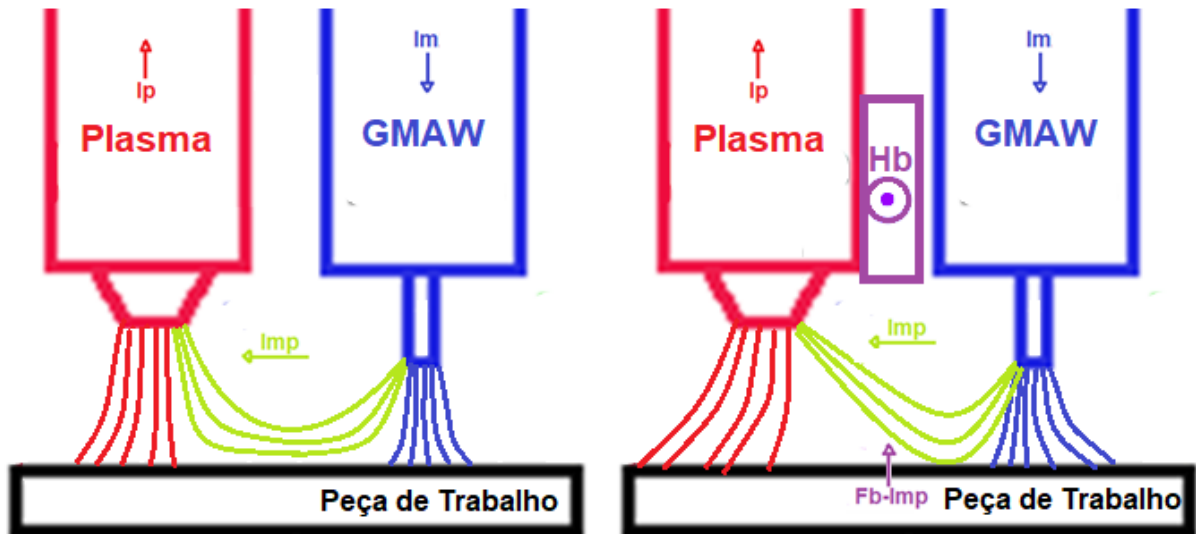


Figura 76 – Esquema de atuação de Hb em Imp proposto.

4.2.4 Deflexão dos Arcos Elétricos

A geometria e direção tomada pelo arco elétrico será governada principalmente pelas forças magnéticas atuantes no sistema. Dentre as forças magnéticas, podemos citar a força de repulsão entre os arcos, que foi apresentada na Figura 75. E a força eletromagnética gerada pelo próprio arco sobre ele mesmo (Força de *Lorentz*).

É natural, que quanto maior a corrente de soldagem, maior será a força de *Lorentz*, e visto que essa aponta para o centro do arco elétrico, perpendicular ao sentido da corrente, se movimentando ao longo da coluna do arco na direção do transporte de carga, podemos dizer que maior também será a rigidez do arco.

Pelo contrário, quanto maiores as correntes dos arcos elétricos, maior será a força magnética de repulsão, uma vez que conforme apresentado na equação (4), ela será diretamente proporcional a corrente do arco GMAW, corrente do arco Plasma, comprimento do arco e inversamente proporcional a distância entre os arcos.

Com base nisso, é possível realizar a análise do comportamento do arco GMAW perante o aumento da corrente de Plasma (I_p). Conforme Figura 77, é possível verificar que o comprimento da coluna do arco GMAW, nesse caso, permaneceu praticamente constante. Logo, a variação da força magnética exercida sobre o arco GMAW será dependente somente da corrente de plasma imposta, conforme apresentado anteriormente na equação (3).

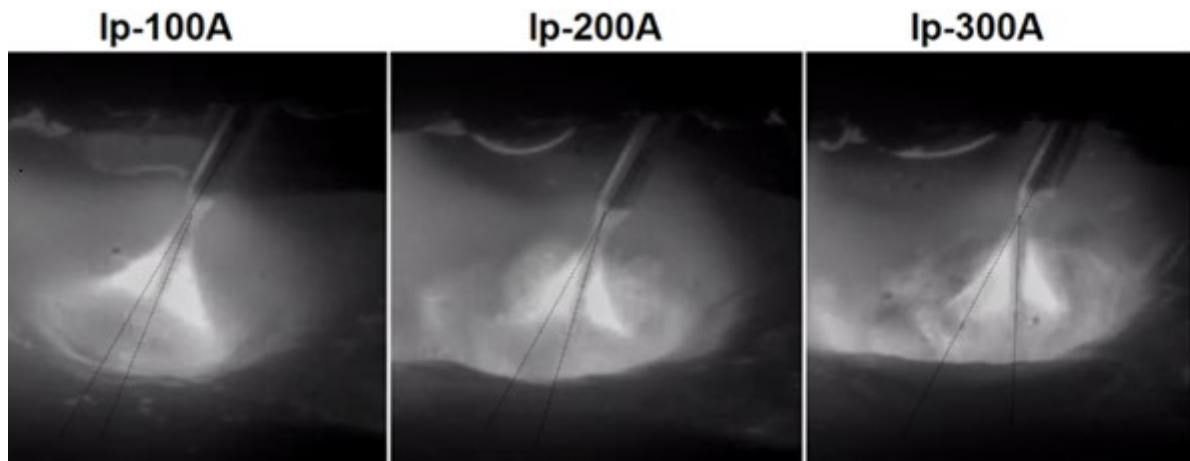


Figura 77 – Ilustração da compressão do arco GMAW com o aumento da corrente de Plasma.

É visível, que com o aumento de I_p , o centro do arco GMAW assim como o filamento metálico que é transferido para a peça são deslocados para a direita, formando cada vez menor que 180° em relação ao arame, e ao mesmo tempo em que o arco é deslocado, ele sofre uma leve compressão. Isso ocorre, pois, enquanto o arco plasma exerce uma força de repulsão, essa força de repulsão ao mesmo tempo em que empurra o arco GMAW para a direita, aumenta a resultante nas linhas de força magnética auto induzida pelo arco GMAW (força de *Lorentz*), resultando na compressão do arco.

O arco plasma, por sua vez, devido ao seu maior comprimento em relação ao arco GMAW, está sujeito a uma maior força de repulsão (4). Ainda se tratando de comprimento do arco, pode ser verificado na Figura 78 que o aumento na distância entre o bico plasma e a peça (DBPP), aumenta drasticamente a deflexão do arco plasma. Ao ponto em que o aumento da corrente de plasma, aumenta a rigidez do arco elétrico, e automaticamente reduz a deflexão do mesmo. A medida da deflexão dos arcos em relação a peça, foi realizada traçando uma linha perpendicular a peça, na região central do arco plasma, e outra linha que atravessa o centro da porção principal do arco plasma e medido o ângulo resultante dessas retas concorrentes.

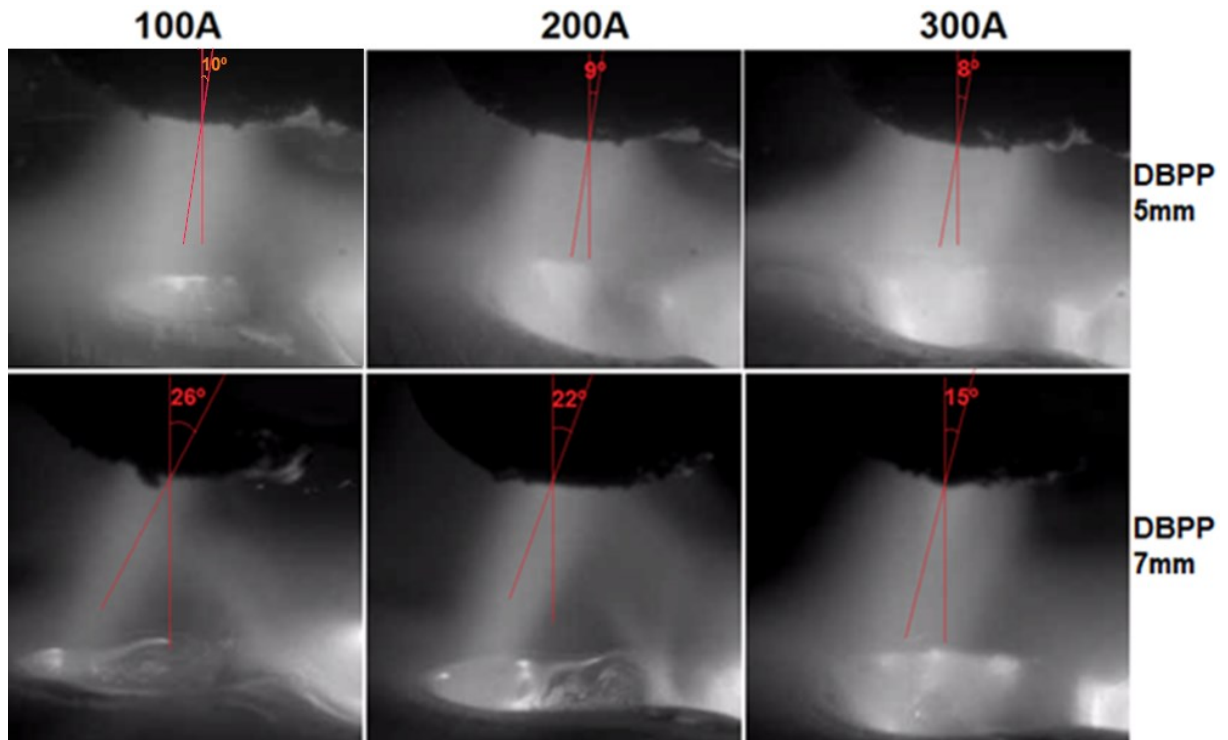


Figura 78 – Deflexão do arco plasma para três diferentes níveis de corrente de plasma e duas diferentes distâncias entre o eletrodo e a peça (DBPP).

Apesar do grande aumento relativo da deflexão apresentada aumentando o afastamento do bico constritor plasma e a peça (DBPP) de 5 para 7 mm, ao extrapolar a DBPP para 10 mm foi verificado que a deflexão no arco, e a porção do arco desviado em relação ao GMAW não foram significativamente aumentados (Figura 79), sugerindo que após certo ponto essa característica entra em regime.

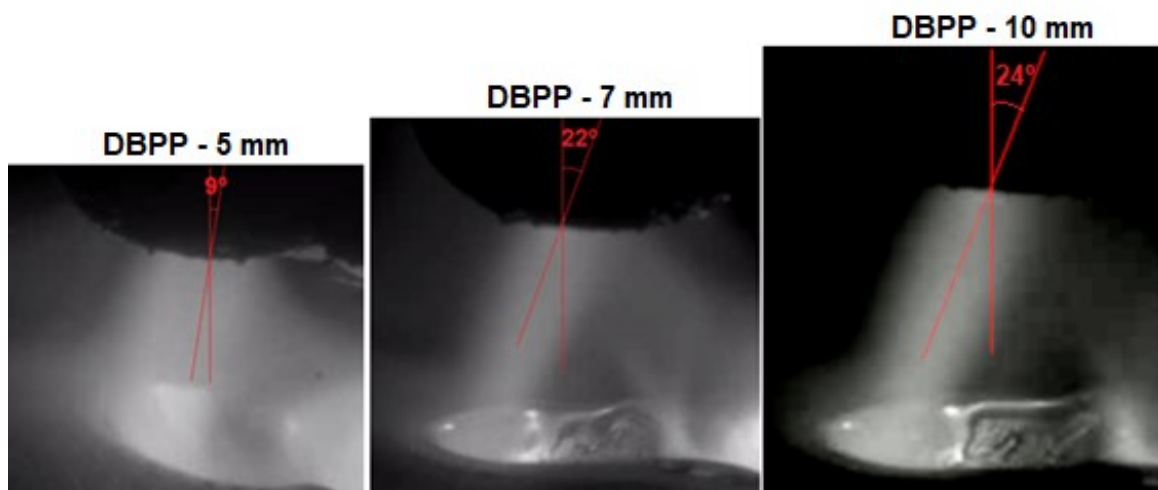


Figura 79 – Deflexão do arco plasma para três diferentes níveis distância entre o eletrodo Plasma e a peça (DBPP), Ip-200A.

4.3 Atuação do Campo Magnético Externo

Durante os trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA a respeito do equipamento Plasma-GMAW, principalmente com relação as filmagens do mesmo, foi constantemente observado a elevada repulsão do arco plasma em relação ao arco GMAW.

Mesmo na observação visual do processo, já é possível verificar que há um desvio do arco plasma na direção oposta do arco GMAW. Esse desvio foi confirmado e quantificado a partir das filmagens do arco.

Tal fenômeno, leva a questionar a eficiência do campo magnético externo, que deveria atuar de forma a corrigir a repulsão dos arcos elétricos, conforme mostrado no esquema elétrico de forças da Figura 75. Dito isso, o presente trabalho pôs em questionamento a funcionalidade e dimensionamento do campo magnético externo.

Para tentar quantificar se o dimensionamento do campo magnético é suficiente, será feito os cálculos simplificados da força de repulsão entre os arcos elétricos e da força exercida pelo campo magnético, que foi medido conforme Figura 61.

Para encontrar a força de repulsão exercida pelos arcos, basta aplicar a equação (4). Mencionada na revisão e assumindo I_1 e I_2 , 300 e 200 A respectivamente, e D 12mm, obtemos uma força magnética de aproximadamente **1 N por metro** de arco (L_a).

Com o auxílio de um fluxômetro de campo magnético, foi medido o valor de intensidade de campo magnético gerado próximo ao ferro-condutor no bocal da tocha de 4,66 mT em seu modo teste (Figura 61). Sabendo que de acordo com as leis do magnetismo, a intensidade de campo próximo a região do plasma será na mesma ordem da medida próximo ao ferro condutor, podemos calcular a força exercida pelo campo magnético nessa região segundo a equação (3).

$$F_2 = I_2 \cdot L_{a2} \cdot B_1 \quad (3)$$

Assumindo I_2 a corrente de Plasma (200 A), e B_1 , 4,66 mT, obtemos uma força de **0,932 N por metro** de arco (L_a).

É claro que esses cálculos são extremamente simplificados, não levando em conta o comportamento dinâmico do sistema, porém, eles servem de base para afirmar que o campo magnético externo está devidamente dimensionado, pois ele produz uma força magnética na região do plasma semelhante à força de repulsão exercida pelos arcos, para parâmetros de comum uso.

Com base nisso, foi proposto a soldagem variando a intensidade de campo magnético

regulada na fonte entre seu mínimo e máximo (2 e 100%), para verificar a influência do mesmo na prática. Para tentar facilitar a visualização dos resultados, foi proposto utilizar nessa etapa o processo GMAW pulsado em conjunto com o processo plasma, pois a oscilação da corrente GMAW entre a base e pulso, deveria exacerbar a atuação do campo magnético externo.

No ensaio apresentado na Figura 80, era esperado verificar o contraste da atuação do campo magnético externo, durante o pulso GMAW, onde a deflexão do arco plasma é mais intensa devido à grande variação da força magnética exercida pelo arco GMAW. Porém, a sincronização dos momentos onde se inicia a o pulso (2), termina o pulso (3) e se retoma a base (4,5), permite verificar que os arcos elétricos GMAW e Plasma se comportam de maneira extremamente similar, com deflexões em seus arcos de mesmo grau, para os mesmos momentos elétricos.

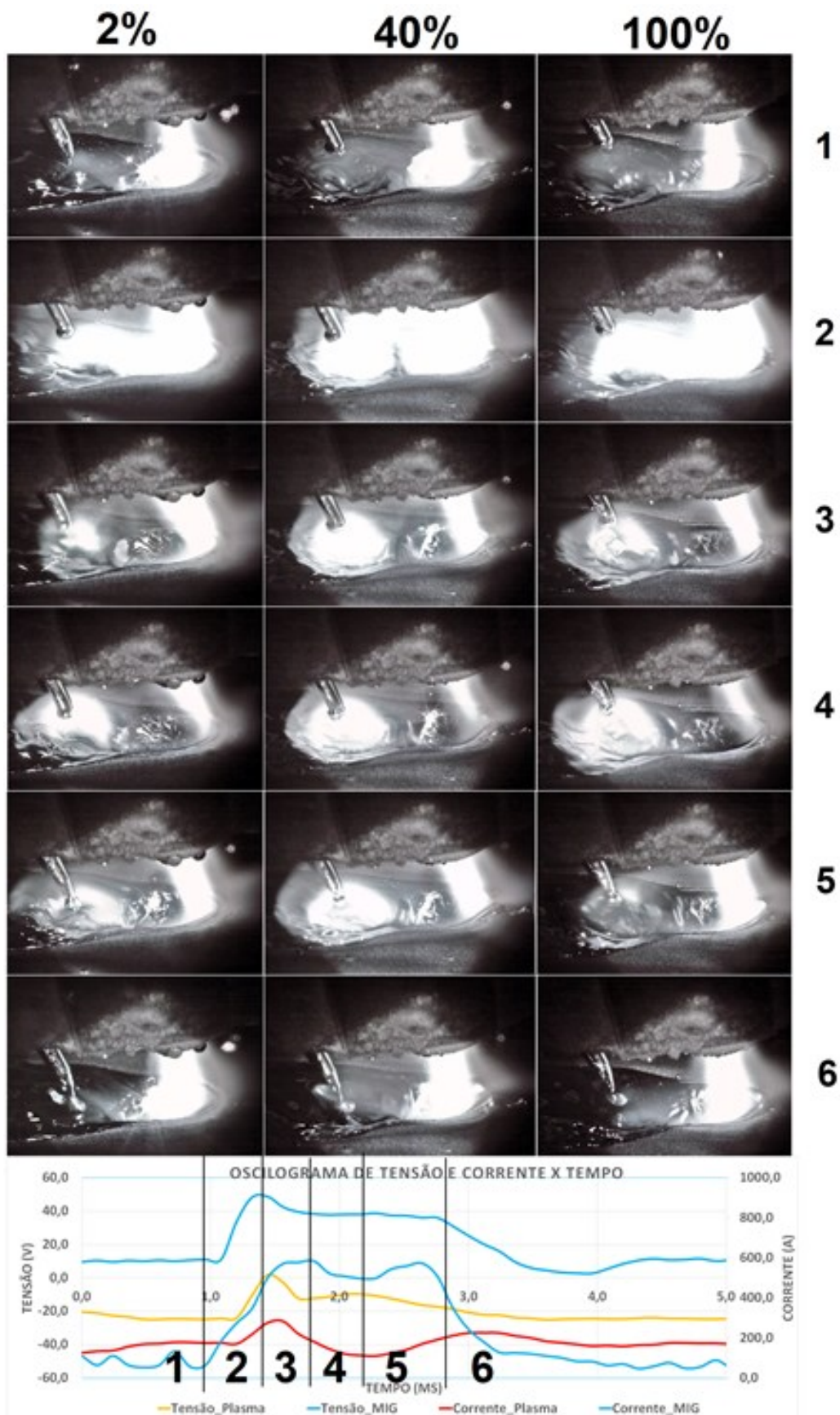


Figura 80 – Filmagens em alta velocidade do arco elétrico para três diferentes ajustes de campo magnético (2, 40 e 100%). Quadros sincronizados conforme posição indicada pelo oscilograma de corrente e tensão.

Visto que não foi possível verificar a influência do campo magnético externo nas filagens de alta velocidade, foram analisados os oscilogramas de corrente e tensão, esperando que nesses, aparecesse uma resposta elétrica para o sistema perante a imposição de diferentes intensidades de campo magnético. Porém, como pode ser observado na sobreposição das curvas de corrente e tensão apresentado na Figura 81, o comportamento elétrico de ambos os arcos são extremamente similares para os três diferentes parâmetros propostos.

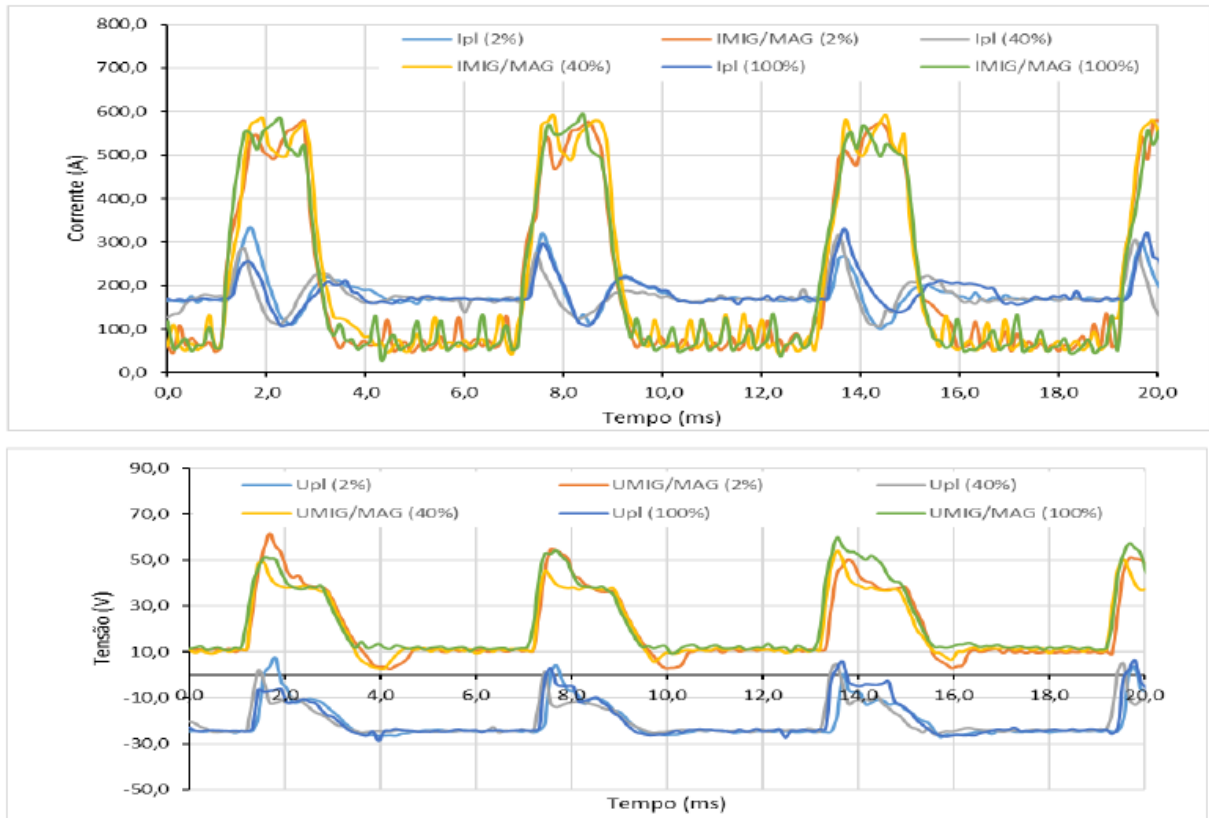


Figura 81 – Sobreposição das curvas de corrente e tensão dos processos Plasma e GMAW para três diferentes intensidades de campo magnético (2%, 40% e 100%) [30].

O fabricante do equipamento, afirma que a presença do campo magnético externo, gerado pelas bobinas e conduzido pelo bocal da tocha, é essencial para realizar a soldagem, do contrário não seria possível o funcionamento correto do equipamento. Porém, os dados explorados até então, mostraram que a variação do ajuste desse parâmetro não levou a alteração alguma nos resultados obtidos, colocando ainda mais em dúvida sua eficácia.

De forma a clarificar se a soldagem seria realmente impossível sem a presença do suposto campo magnético, um último teste foi proposto. Nesse teste, foi retirado o bocal que seria o suposto condutor do campo magnético, e realizado a soldagem normalmente com os arcos GMAW e Plasma alinhados, porém sem o ferro-condutor que fornece o campo magnético no centro dos arcos.

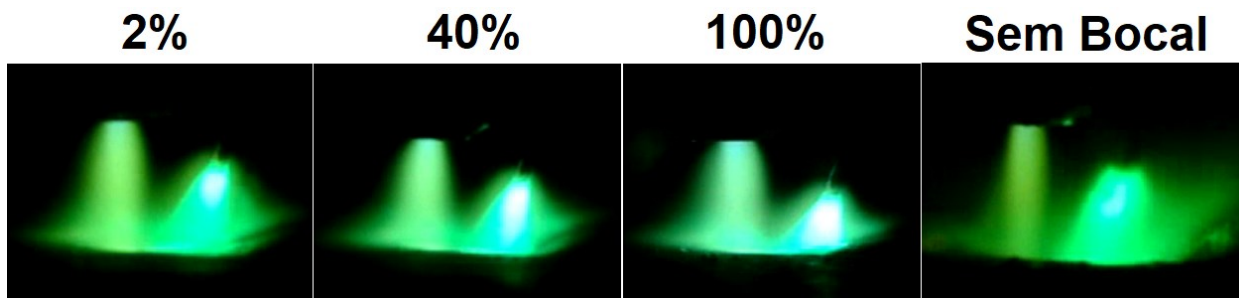


Figura 82 – Filmagem do arco em tempo real para três diferentes intensidades de campo magnético (2, 40 e 100%) e sem a presença do campo magnético (sem bocal).

A primeira conclusão que é possível conceber, a partir da análise da Figura 82, é de que, não considerando o impacto produzido na solda, é possível realizar a soldagem sem o campo magnético. A informação prévia que era de conhecimento sobre o equipamento, é que a deflexão entre os arcos seria tamanha que não possibilitaria a manutenção dos arcos elétricos. Porém, é verificado nas filmagens do arco elétrico, que mesmo sem a presença do campo magnético externo, os arcos conseguem manter sua atuação na poça de fusão, possibilitando a soldagem.

É natural que a soldagem sem o bocal de proteção tenha apresentado uma leve turbulência, uma vez que sua ausência não acarreta somente na retirada do campo magnético, mas no bocal que conduz os gases de soldagem na área de interesse da solda. Porém, mesmo considerando que a soldagem foi realizada em condições não ideais, o resultado verificado nos arcos elétricos foi muito semelhante.

Logo, estima-se que apesar de bem dimensionado, o campo magnético não está atuando corretamente. A hipótese proposta é de que ele é desviado pela peça sendo soldada ou ele está em conflito com a corrente que está passando entre tochas, visto que se considerado o campo magnético produzido pela mesma (I_{mp}), ele geraria na região acima dele, um vetor contrário ao campo magnético externo (H_{mp}), anulando ou enfraquecendo o mesmo, como pode ser visualizado Figura 83.

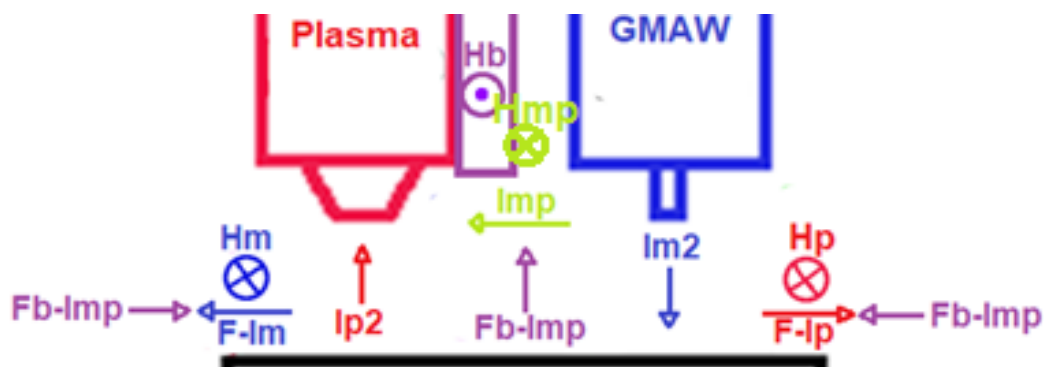


Figura 83 – Representação esquemática das forças magnéticas no processo Plasma-GMAW serial, considerando que I_{mp} gera um vetor campo magnético H_{mp} .

4.4 Tipos de Transferência Metálica no Processo Plasma-GMAW Serial

4.4.1 Transferência Metálica por Contato

Haja vista que o processo Plasma-GMAW tem o principal objetivo a soldagem visando alta penetração, a priori, o modo de transferência metálica por curto-circuito não foi largamente explorado. Durante os testes práticos, foi verificado que quando a tensão do processo GMAW é demasiadamente baixa, de forma a se tentar obter uma transferência por curto-circuito, há uma maior instabilidade no processo e a ocorrência de transferências metálicas explosivas. Nesse modo, o arame fica em maior parte submerso na poça de fusão, semelhante ao processo GTAW com alimentação automática de arame.

De forma a buscar visualizar a transferência metálica por contato, de forma estável, foi partido da condição de “arame enterrado”, e elevado a tensão aplicada na fonte GMAW que o processo mostrasse características de transferência por contato, e principalmente, permanecesse visualmente estável. O oscilograma do resultado desse ensaio é mostrado na Figura 84.

Nesse estado, a transferência metálica predominante se assemelha ao modo de transferência globular. Além disso, é observado que a corrente do processo GMAW apresenta menor oscilação do que ocorreria em um processo globular convencional e se encontra em patamares elevados, muito próximo a corrente de transição.

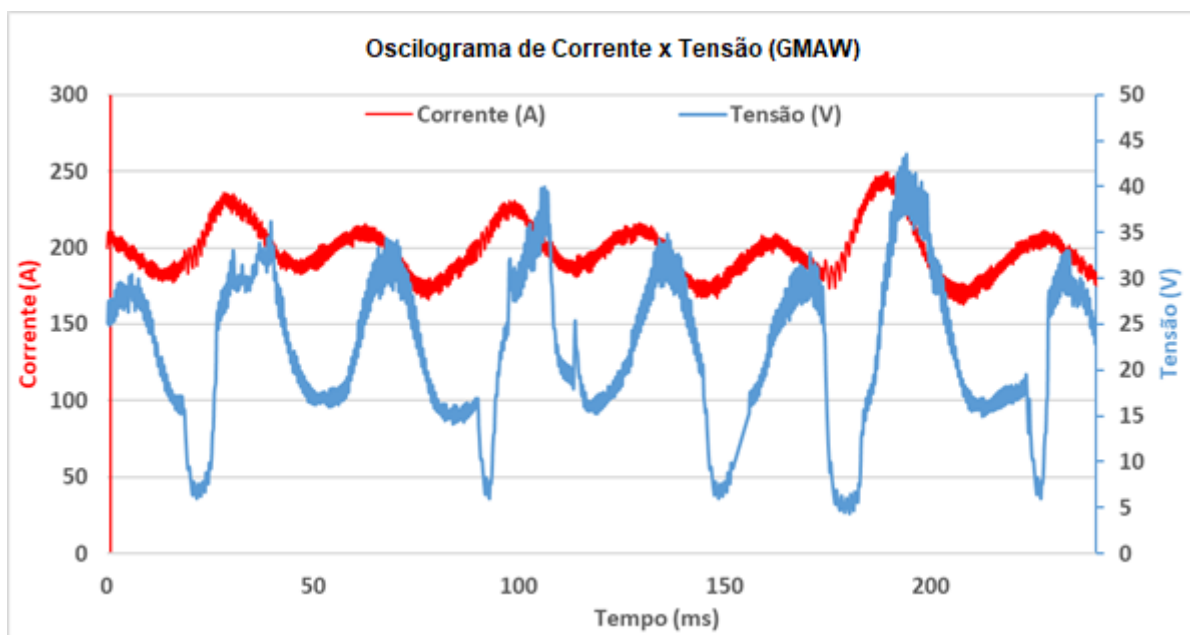


Figura 84 – Oscilograma de corrente e tensão para transferência Metálica por Curto-circuito no Processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 210 A; UGMAW: 26 V; I_p 200 A; U_p : 15 V; V_a : 12 m/min).

Na prática, é verificado que para esses níveis de corrente, a transferência metálica deveria ocorrer pelo modo goticular, porém isso não ocorre, pois antes que a gota possa ser ejetada do arame, o arco plasma pressiona a gota contra a poça de fusão, devido sua força magnética repulsiva no arco GMAW, forçando a transferência da mesma. O esquema da transferência metálica pode ser visualizado passo a passo na Figura 85, onde (1) inicia a formação da gota, (2) inicia o estrangulamento da gota, (3,4) a gota encosta na poça de fusão enquanto o estrangulamento é acentuado, (5) ocorre a transferência da gota e a reabertura do arco elétrico e (6) inicia a formação de uma nova gota.

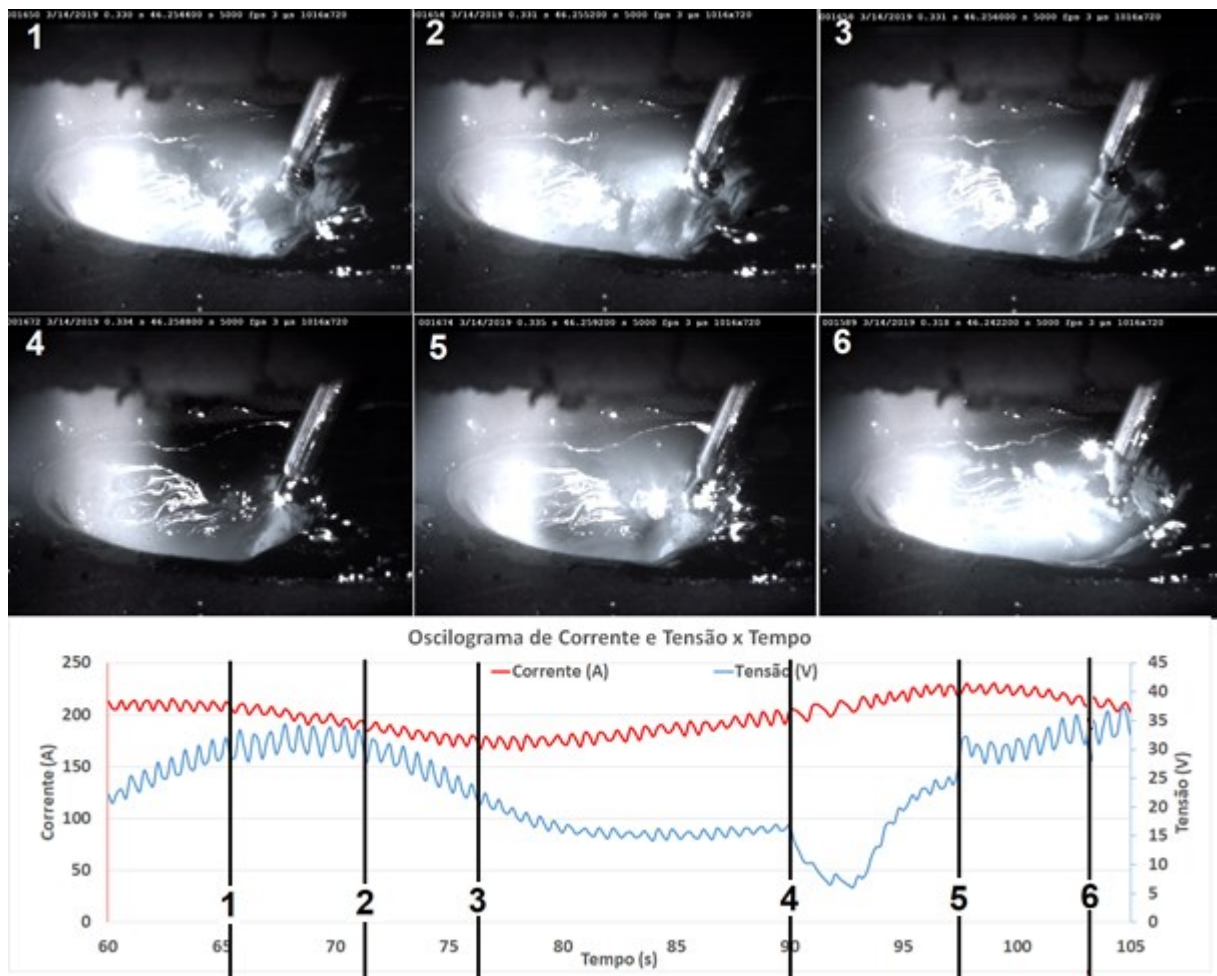


Figura 85 – Transferência Metálica por Curto-circuito para o Processo Plasma-GMAW Serial e oscilograma de tensão e corrente para o processo GMAW.

Um fato a ser destacado nesse ensaio, é que nem todas as gotas foram transferidas por contato. Como pode ser visualizado na Figura 84, há alguns pontos em que a tensão cai, mas não se aproxima de zero, permanecendo em torno de 17 V antes de subir novamente. Nesses pontos, foi observado uma leve oscilação da interface entre os arcos, e durante essa oscilação, ao invés de a pressão na gota ser exercida em direção a poça de fusão, a gota é puxada em direção ao plasma. Esse acontecimento é ilustrado na Figura 86.

Esse fenômeno poderia se tratar de um efeito aleatório, devido à instabilidade *pinch* e a própria não linearidade das forças eletromagnéticas presentes no sistema, porém, devido a singularidade de esse processo apresentar a passagem de corrente entre tochas, acredita-se que esse é o motivo pelo qual a gota muda de direção tão drasticamente. Em algum momento a força de arraste exercida por Imp mudou a resultante das forças atuantes sobre a gota, deixando de ser em direção a poça, passando a ser em direção ao plasma.

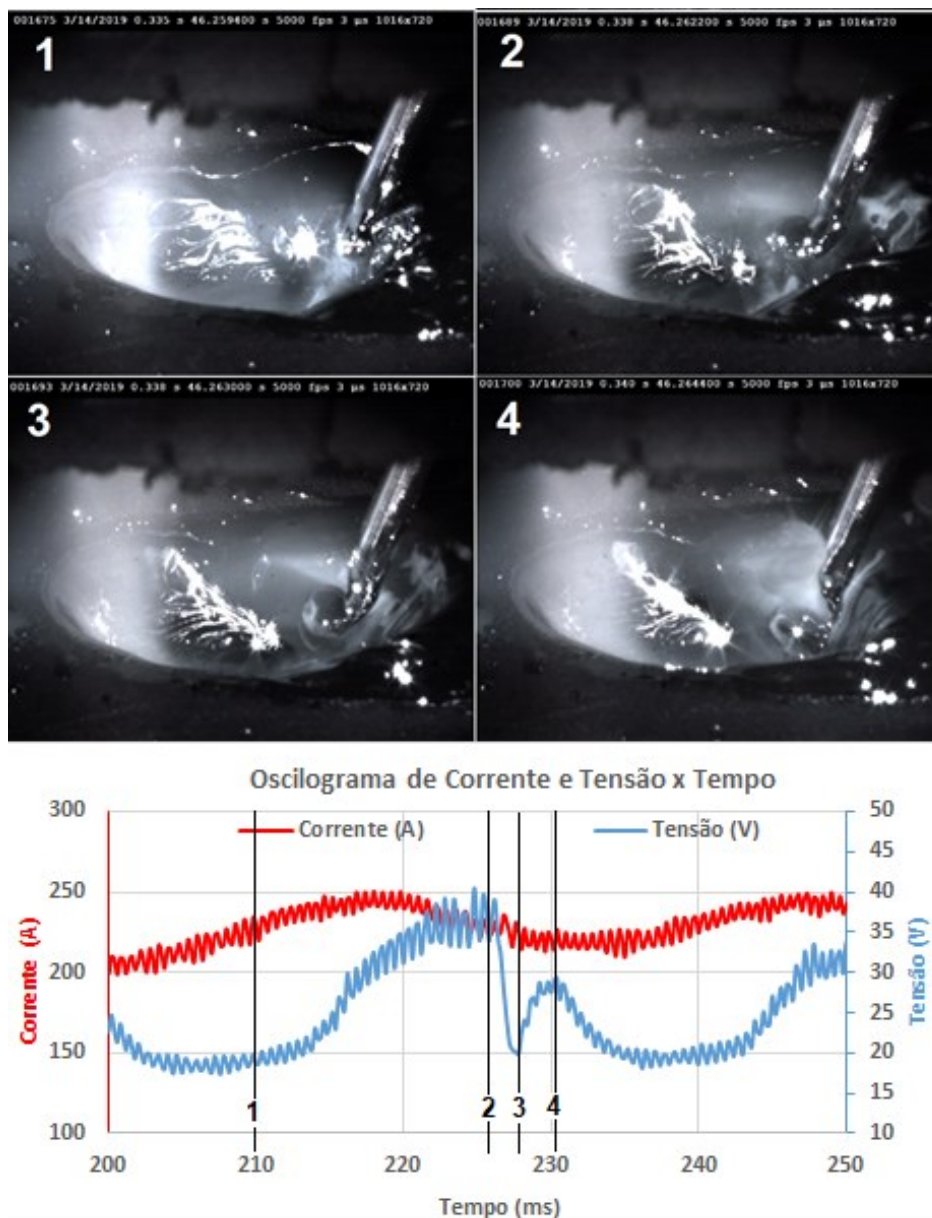


Figura 86 – Ocorrência de transferência por voo livre, elucidando efeito da gota sendo puxada em direção ao arco plasma.

4.4.2 *Transferência Pulsada*

No caso da aplicação do processo híbrido utilizando a onda de corrente pulsada no processo GMAW, não ocorreu mudança significativa na transferência metálica em si, a mesma apresentou características semelhantes caso o processo fosse o GMAW-MAG puro, no entanto pode-se perceber uma série de efeitos com relação a interação física entre os arcos e o comportamento elétrico processo.

O esquema ilustrado na Figura 87, mostra que na etapa de base do processo GMAW (1) o arco plasma se encontra muito pouco defletido e quando ocorre o início do pulso (2,3) uma grande nuvem de plasma ionizado é formada na interface entre os arcos elétricos, a tensão GMAW sobe a patamares muito elevados, enquanto que a tensão plasma cai próximo à zero e a corrente de plasma tem uma leve subida. Após a estabilização do pulso (4,5) a nuvem de elétrons previamente formada se dissipa rapidamente, e é possível verificar que nesse momento o arco plasma apresenta grande deflexão em relação ao arco GMAW, a corrente e tensão de plasma tentam retornar aos patamares originais. Com a completa estabilização da etapa de pulso (6,7) o arco plasma retorna ao patamar de corrente e tensão. Durante o fim do pulso (8) a corrente e tensão plasma já estão estabilizados, nessa etapa cai a corrente e conseqüentemente a luminosidade do arco GMAW, ao ponto que o arco plasma reduz sua deflexão até voltar a posição original (9).

A análise perceptível a partir da Figura 87, é que quando há a perturbação dos sinais elétricos após o início do pulso GMAW (2-3), o plasma tem sua corrente elevada e ao mesmo tempo sua tensão cai próximo a zero, muitas vezes até ser invertido de polaridade. Essa inversão de polaridade é indicativa que o a fonte plasma cessou o fornecimento de corrente para o processo, e passou a se comportar como carga para a passagem de corrente fornecida pela fonte GMAW. Essa tese é suportada pelo estudo desenvolvido por BERNARDI et al [40], conforme apresentado no item 2.4.2.

Ainda durante o início pulso de corrente GMAW (4) a tensão volta a aumentar, sinalizando que a fonte voltou a chavear, enquanto a corrente plasma apresenta um comportamento oscilatório na sequência (4-5-6-7).

A deflexão do arco plasma é esperada, pois a elevação da corrente GMAW gera uma força magnética de repulsão muito mais intensa no arco plasma, no entanto, não é esperado tamanha variação na corrente.

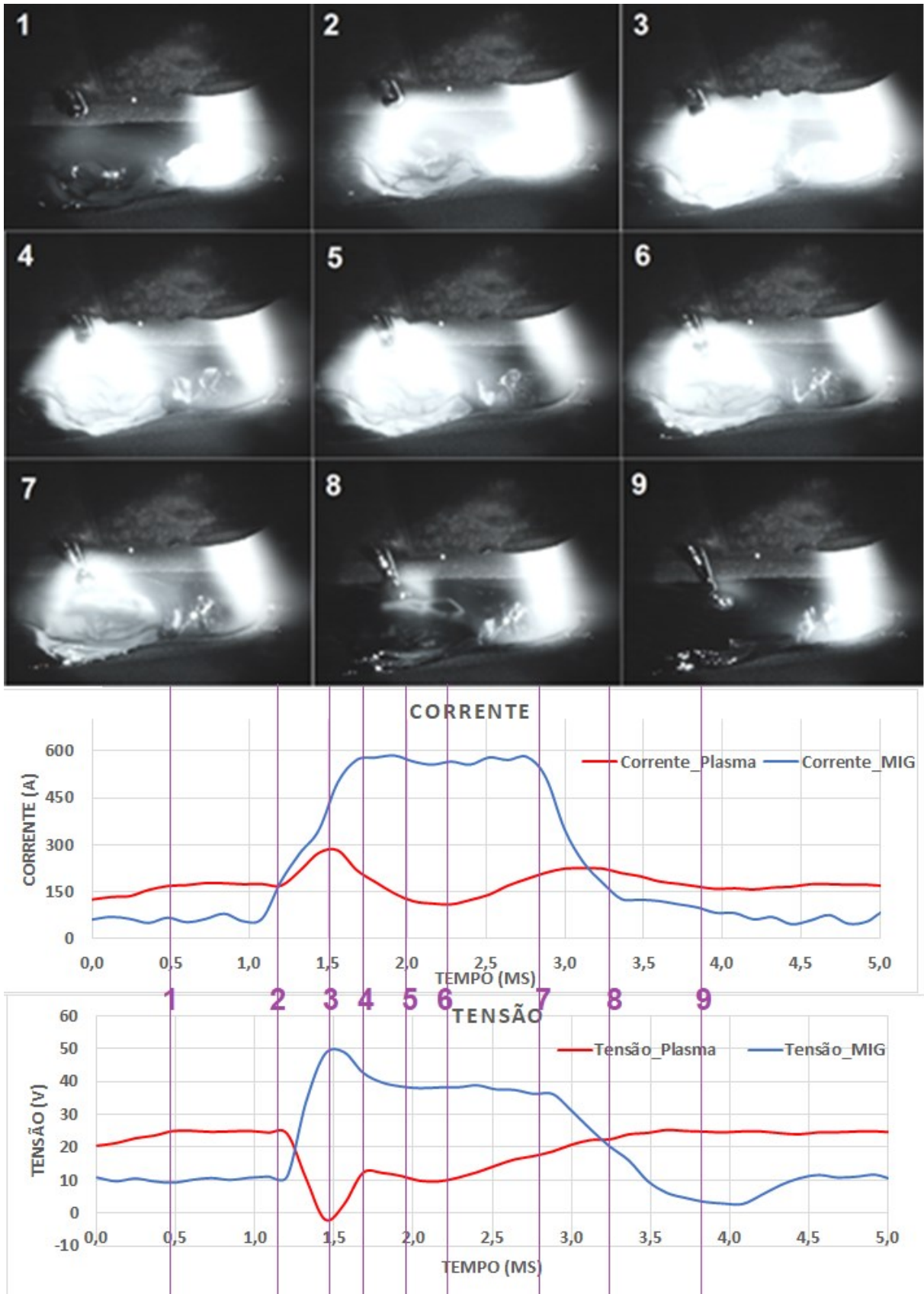


Figura 87 – Transferência Metálica Pulsada no Processo Plasma-GMAW Serial.

O comportamento oscilatório da corrente de Plasma após o pulso MIG, semelhante a um efeito mola, é natural em fontes de soldagem que utilizam o controle por PWM, e o tempo que a corrente de plasma demora para retornar ao patamar estável pode ser denominado tempo de acomodação do sistema. Ainda, é possível verificar que a acomodação se dá apenas após o final do pulso, não sendo possível determinar se um pulso mais longo, ocasionaria uma resposta diferente aos sinais elétricos de forma geral. Esse elevado tempo de resposta pode ser explicado devido à alimentação da corrente de plasma se dar por duas fontes associadas em paralelo. Isso resulta em um aumento na sua indutância e automaticamente um tempo de resposta menor.

A vista disso, como forma de avaliar o sistema de controle da fonte plasma quanto a rejeição de perturbações nos sinais elétricos, um teste foi realizado aplicando pulso longo o suficiente (10ms) para que houvesse a estabilização da corrente de plasma, os demais parâmetros foram mantidos, conforme Figura 88.

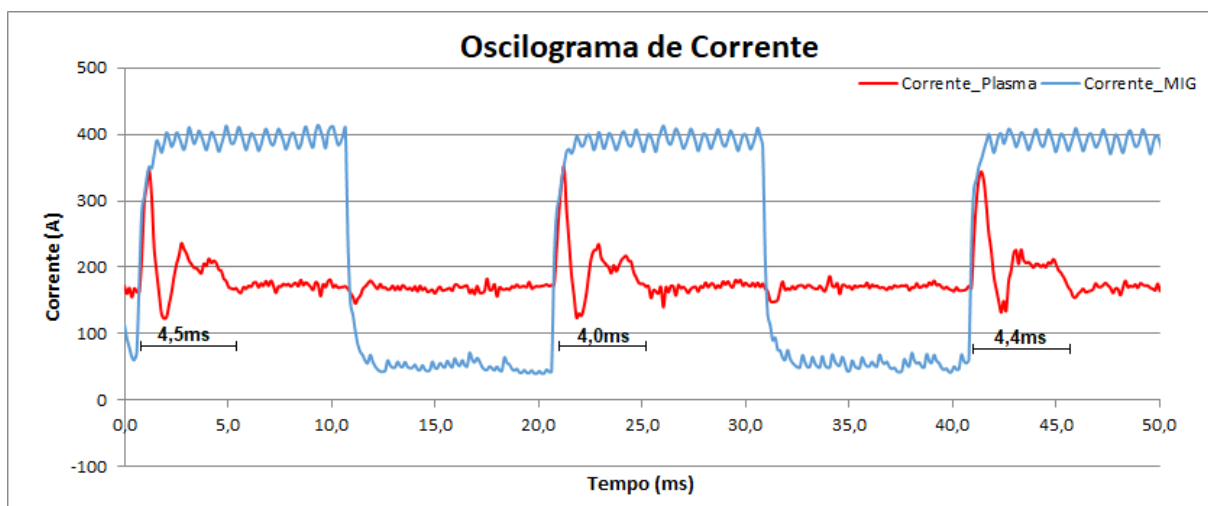


Figura 88 – Teste com pulso longo para verificar a acomodação da corrente plasma perante a perturbação do sistema.

Foi verificado que a fonte plasma é capaz de estabelecer o controle da corrente perante as perturbações no sistema apresentadas e que o tempo de acomodação do sistema, ou seja, o tempo para o sistema de controle alcançar uma faixa de $\pm 5\%$ da referência, foi medido em 4,3 ms. Na prática, isso significa que para pulsos de corrente no arco GMAW menores que 4,3 ms, o valor da corrente de plasma se encontrará fora do equilíbrio.

Apesar de ter sido clarificado o comportamento oscilatório do processo plasma após a perturbação elétrica ocorrida, a causa da perturbação é um grande objeto de questionamento.

Pode ser observado, que quando o pulso GMAW é iniciado (2,3), a corrente Plasma é elevada, enquanto que sua tensão é reduzida de forma que se aproxima de zero. Segundo a lei de Ohm, onde $U = R \cdot I$, para que fosse possível a tensão cair próximo a zero e mesmo assim a

corrente continuar subindo, a impedância do sistema também teria que cair próximo a zero. Mesmo com os fenômenos que contribuem para a condução elétrica do plasma sendo potencializados (vaporização metálica, maior superfície de emissão, maior quantidade de gás ionizado, etc.), é extremamente improvável que a impedância elétrica tenha caído tanto em decorrência do simples pulso do processo GMAW.

Sendo assim, resta a hipótese de que durante o início do pulso GMAW, a uma elevação momentânea na passagem de corrente entre as duas tochas, sendo que o processo GMAW transfere uma grande quantidade de corrente para o arco plasma. Como resultado, a fonte plasma detecta que a corrente está demasiadamente alta, e cessa o chaveamento. A observação do oscilograma de tensão GMAW corrobora esse fato, visto que quando há o início do pulso GMAW, a tensão GMAW é elevada drasticamente, até a ordem de 50 V (3,4), que é uma tensão muito elevada para os níveis de corrente do processo GMAW. Esse indicativo de tensão muito elevada, quer dizer que o processo GMAW está com extrema dificuldade para estabelecer a corrente de pulso no arco GMAW, ou seja, sua impedância está demasiadamente elevada, o que é de se esperar visto que nesse ponto a fonte GMAW está fornecendo corrente para ambos os processos. Também é verificado que a partir do momento que o controle da fonte Plasma entra em atuação, a tensão GMAW é reduzida, ainda durante o início do pulso (4,5), permitindo que os sinais elétricos se estabilizem.

Ainda acerca do comportamento do processo Plasma-GMAW (pulsado), outro aspecto observado durante os ensaios, foi o comportamento da tensão do processo GMAW durante o arco híbrido comparado com a sua tensão quando aplicado sozinho. Apesar da imposição da corrente no processo ser absolutamente a mesma, como pode ser visualizado na Figura 89, as tensões resultantes apresentam grande discrepância. Durante a base, a tensão GMAW resultante no processo híbrido é menor, e durante o pulso, a tensão GMAW no processo híbrido é maior, quando comparado ao processo GMAW pulsado atuando sozinho.

O pico de tensão apresentado no início do pulso GMAW, foi verificado como possível momento em que a fonte GMAW fornece corrente para fonte plasma. Porém, após a “estabilização” que ocorre depois dessa anomalia, a tensão GMAW deveria retornar a patamares menores, semelhante à apresentada no GMAW *only*. A justificativa para a tensão se manter ainda assim elevada, é que como apresentado nos capítulos anteriores, quanto maior a corrente GMAW em relação a corrente plasma, maior é a hibridização dos arcos elétricos, e assim, maior será a dispersão na tensão de saída dos processos.

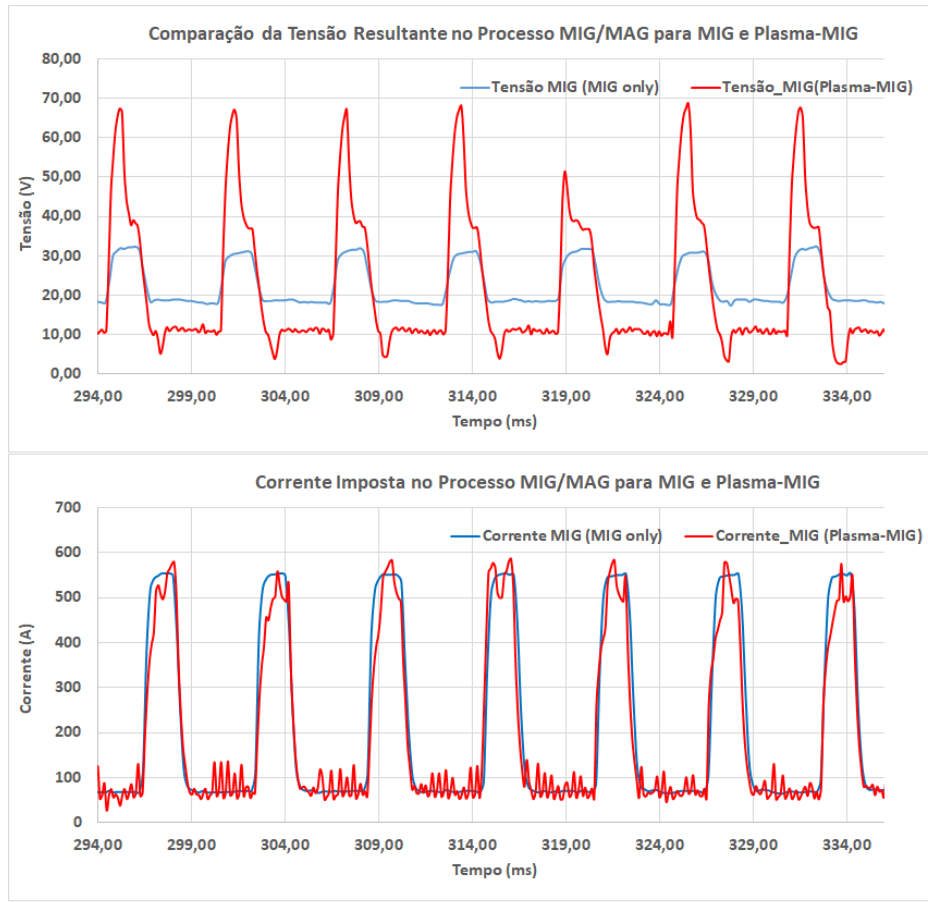


Figura 89 – Comparação dos oscilograma de corrente e tensão para o processo GMAW durante o processo híbrido (vermelho) e operando sozinho (azul).

Durante a base, com a menor imposição de corrente do processo GMAW, é menos provável a transferência de corrente entre tochas, e além disso, o processo GMAW se beneficia da atuação do arco Plasma em termos de melhorar a condutividade elétrica na região GMAW (vaporização metálica, maior aquecimento, gás mais ionizado, etc.), resultando na menor tensão do processo.

4.4.3 Transferência Goticular

A amostragem contida nesse trabalho, indica que a principal forma de transferência metálica, quando GMAW está em controle de tensão, é a goticular com alongamento. A mesma pode ser obtida de duas formas, aplicando elevadas correntes de plasma ou aplicando maiores tensões no processo GMAW.

Partindo do ensaio apresentado no item 4.4.1, mantendo a tensão imposta na fonte GMAW constante e elevando a corrente de plasma, foi observado que a corrente GMAW foi indiretamente elevada. Isso ocorreu, provavelmente, pois o elevado calor emanado pelo arco

plasma contribuiu para a fusão do eletrodo GMAW aumentando *stick-out* do mesmo, e favorecendo a transferência pelo modo goticular com alongamento, além de outros fenômenos que acabam favorecendo a condutividade elétrica do plasma (maior aquecimento, vaporização metálica, etc).

A contribuição do arco plasma na fusão do eletrodo é melhor percebida na filmagem em alta velocidade, onde é possível verificar que o eletrodo-aramé GMAW entra na cratera formada pelo plasma e sua porção superior é fundida semelhante ao que ocorre no processo GTAW com alimentação de arame, se assemelhando a uma transferência metálica por ponte, sendo que a atuação do arco elétrico GMAW se concentra na porção intermediária-inferior do eletrodo, cuja região é identificada a transferência goticular, conforme pode ser visualizado na Figura 90.

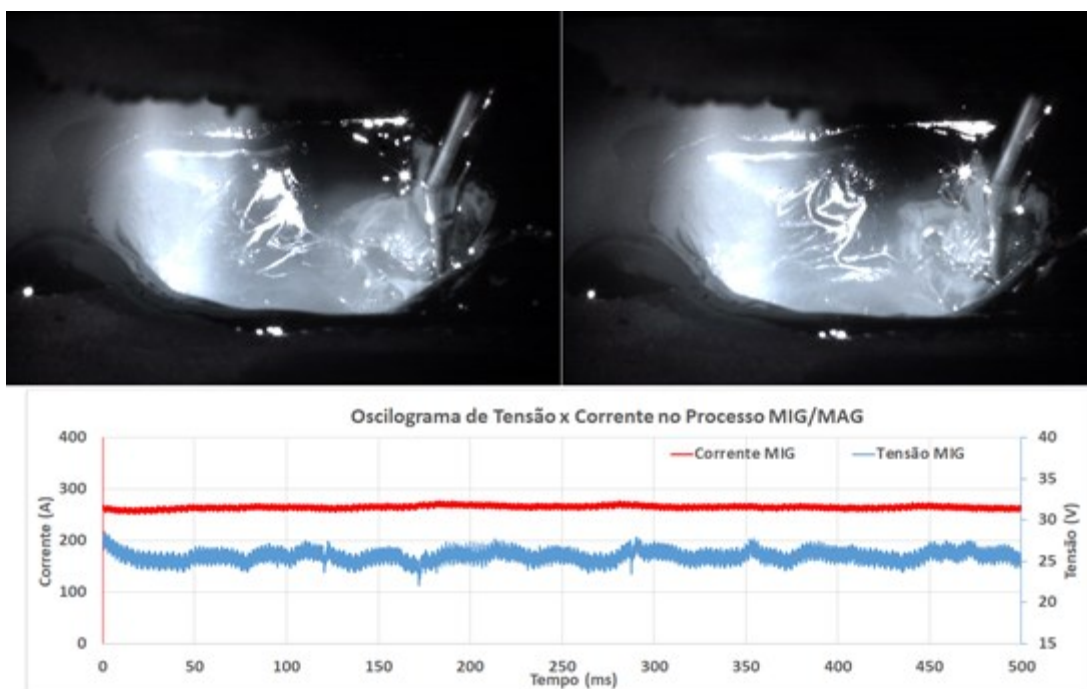


Figura 90 – Transferência goticular no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 285 A, UGMAW: 26 V; I_p : 300 A; U_p : 23 V)

Para o verificar o comportamento da transferência metálica sob a imposição de maior tensão no processo GMAW, foi mantido a tensão GMAW em 32 V, e regulado a corrente de plasma em 100, 200 e 300 A respectivamente.

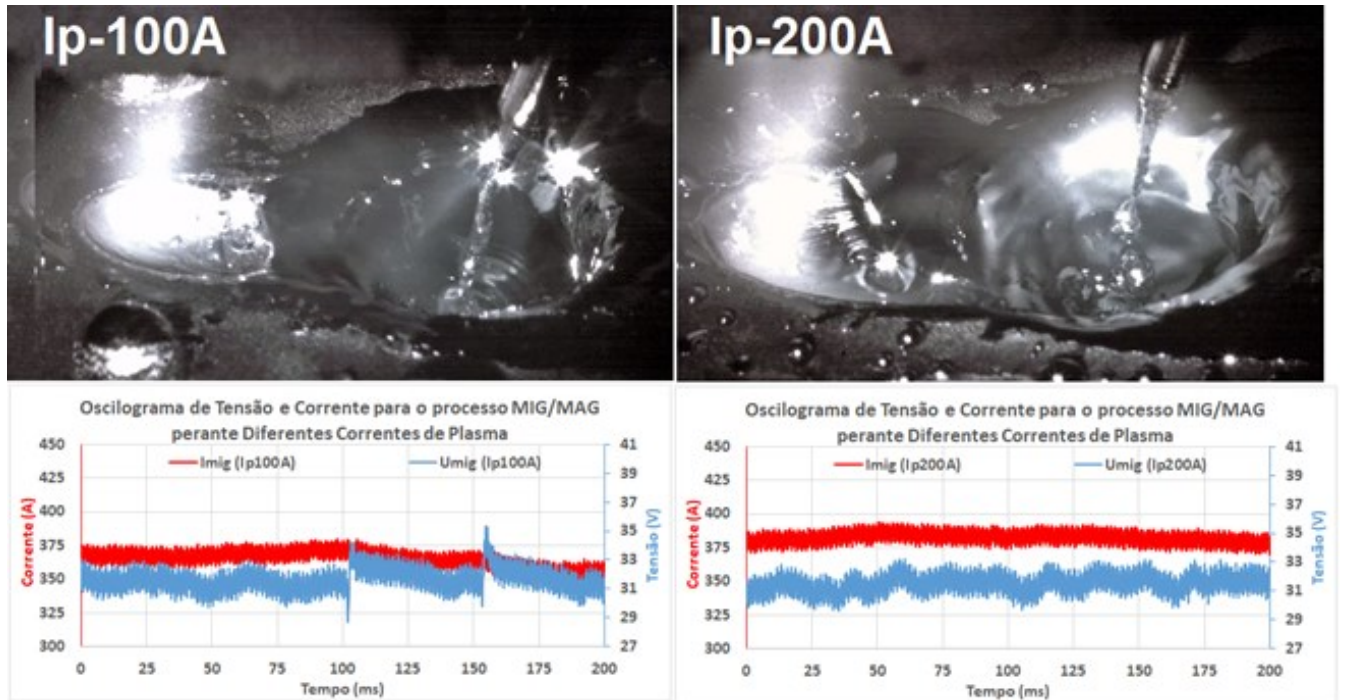


Figura 91 – Transferência goticular com alongamento no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 370 A/380 A, UGMAW: 32 V; I_p)

Na Figura 91 é possível verificar que a variação da corrente de plasma entre 100 e 200 A não alterou significativamente os sinais elétricos do processo GMAW, cuja transferência predominante foi a goticular com alongamento. Porém, ao elevar a corrente de plasma para 300 A, a corrente GMAW também apresentou um leve aumento, e principalmente, a transferência metálica passou a ser do tipo goticular rotacional, como pode ser observado na Figura 92.

O comportamento rotacional também é perceptível pelo oscilograma de tensão, cujo sinal permanece em movimento oscilatório, resultado da rotação do arco. No caso do processo GMAW, a transferência rotacional é indesejável, como apresentado na bibliografia, por gerar grande instabilidade no processo, porém, no processo Plasma-GMAW Serial, foi verificado que a transferência rotacional não prejudica o processo em termos de estabilidade, podendo até ser benéfico para o processo, pois pode gerar uma melhor distribuição do metal de adição ao longo da cratera gerada pelo processo plasma, como também é observável nas filmagens de alta velocidade.

De uma forma geral, foi identificado que a elevação na corrente de plasma contribuiu para a transição do tipo de transferência metálica, resultado esse que pode estar relacionado com a leve elevação na corrente que passa pelo circuito GMAW, aliado com o aumento da instabilidade *pinch* gerada no arco GMAW em decorrência das forças eletromagnéticas exacerbadas geradas pelo arco plasma.

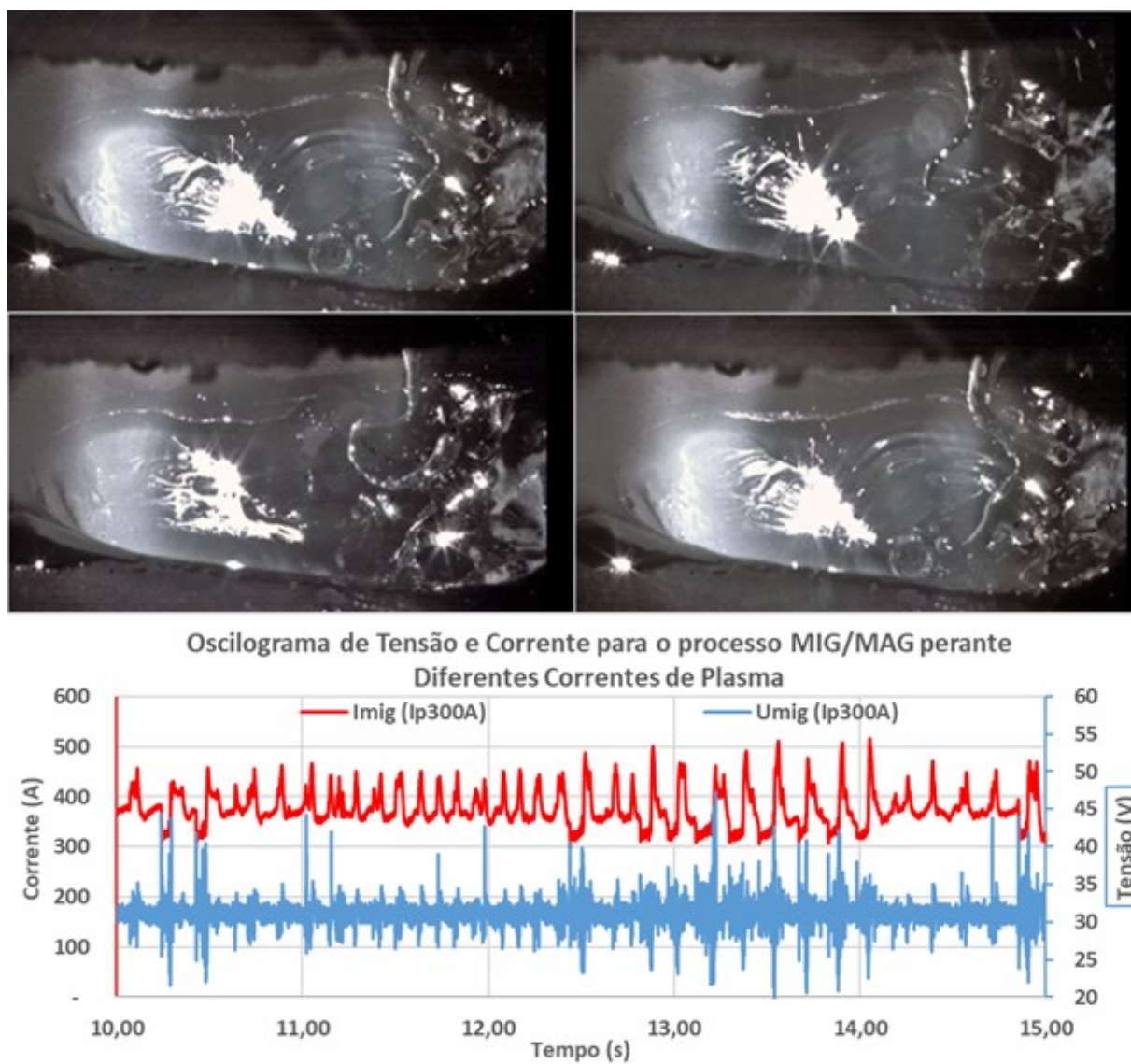


Figura 92 – Transferência goticular rotacional no processo Plasma-GMAW Serial (IGMAW: 384 A, UGMAW: 32 V; I_p : 300 A)

4.5 Análise e Hipóteses para Transferência de Corrente entre Tochas

Em operação de soldagem, com mais de um arco de solda sobrepondo-se, surge um meio para que a corrente original de cada arco circule de forma parcial nos demais arcos, em alguns casos estas parcelas são significativas. Isso, além de mudar as características originais de cada arco, irá interferir no controle das fontes de soldagem, que por sua vez estão fornecendo energia aos mesmos.

Essa interação entre os arcos, que resulta por fim na influência de uma fonte de soldagem na outra, vem sendo estudada por alguns pesquisadores os quais tem alegado haver circulação de corrente de uma fonte na outra. Para analisar tal influência estes tem buscado medir a

variação da razão cíclica de operação dos semicondutores das fontes de soldagem.

Todavia, se, e somente se, em razão da sobreposição dos arcos, a tensão de saída da fonte inverter (mudar de polaridade) que é o que ocorre no momento 1,5 ms da Figura 87. Esta poderá deixar de controlar a corrente, configurando a circulação de parcela da outra fonte, como foi apresentado no processo híbrido utilizando MIG pulsado. Esse tipo de situação pode ocorrer em fontes que tiverem tecnologias semelhantes às das fontes DC chaveadas, apresentadas na revisão, que possuem diodo de roda livre. Este diodo, permite a circulação de corrente da outra fonte, porém quando isso ocorre, obrigatoriamente há a abertura da chave no IGBT da fonte e inversão do sinal de tensão no nó.

Para explicar isso, pode-se usar o modelo da Figura 93, onde as fontes Plasma e GMAW possuem diodo de roda livre. Considerando um modelo de arco sobreposto composto por 3 resistências iguais, se obtém a equação (6) para V_2 . Nesse modelo V_2 será negativa quando I_1 for maior que $2 \cdot I_2$. Nesta situação, a parcela da corrente da GMAW 1 passará através do diodo de roda livre, pois o mesmo fica polarizado diretamente, situação I_3 (parcela de I_1) torna-se maior que I_2 , fazendo com que o controle, que está medindo I_2 , bloqueie o IGBT na tentativa de fazer I_2 voltar ao valor ajustado, ou seja, quando I_3 fica superior a I_2 a fonte 2 não conseguirá mais controlar a corrente, e I_3 irá circular pelo diodo de roda livre da fonte Plasma.

$$V_2 = R \cdot [I_2 \cdot (2/3) - I_1 \cdot (1/3)] \quad (6)$$

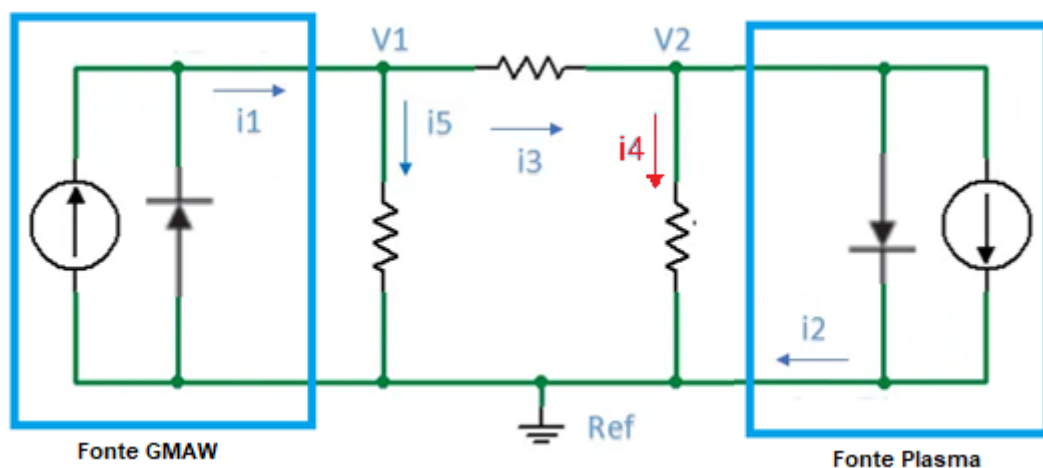


Figura 93 – Modelo elétrico do Processo Plasma-MIG serial quando há a inversão de polaridade na fonte Plasma.

Nos demais casos (quando não há a inversão da polaridade), não é possível afirmar que há a passagem de corrente entre fontes. Na realidade o que ocorre é apenas a alteração das condições físicas dos arcos, que por sua vez estão conectados aos bornes da fonte através da tocha e cabo obra, ou seja, da alteração da carga na saída da fonte. Tais alterações quando se

opera com imposição de corrente tem como consequência a mudança da tensão de saída, e no caso de comanda a tensão, resultam em mudanças da corrente, que por fim alteram a energia que cada equipamento estaria fornecendo em relação a operação sem sobreposição de arco.

Considerando que ajustado um valor de corrente de soldagem, ou seja, na saída da fonte, o controle irá comandar os transistores de forma a obter tal corrente na saída. Assim, no caso das fontes chaveadas os transistores serão ligados e desligados, e nas fontes analógicas será regulada a corrente de base dos mesmos. Como o controle estará impondo (controlando) a corrente, a tensão de saída torna-se dependente da carga.

Ao longo do trabalho, foi verificado que a hibridização dos arcos varia conforme os parâmetros elétricos impostos, assim como a circulação parcial de corrente entre tochas. Nesses casos, acontecerá mudanças no valor da carga, automaticamente a tensão de saída.

Um exemplo bem claro disso ocorre na soldagem MIG pulsado, quando há instabilidade. Isso é observado na Figura 94, onde é possível se perceber que a corrente é mantida, mesmo a tensão variando de condição de curto circuito (seta verde), a instabilidades diversas (seta vermelha). As linhas vermelhas no ciclograma representam as correntes de base e de pulso respectivamente, pode-se perceber que elas apresentam pouca variação dos valores perante as grandes variações da tensão de arco, ou seja, devido a corrente ser controlada as variações de carga tem como consequência variações na tensão de saída da fonte.

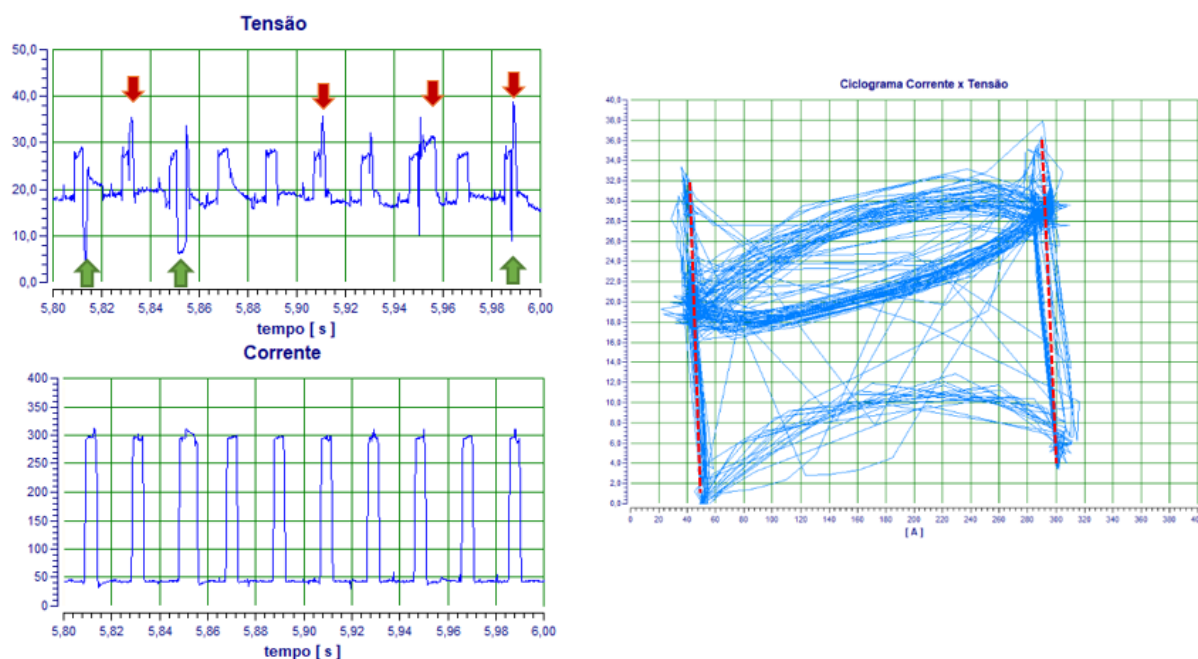


Figura 94 – Oscilogramas de corrente e tensão de um procedimento MIG pulsado apresentando instabilidade e seu respectivo ciclograma.

Para o processo híbrido, muitos autores buscam relacionar as variações de tensão devido

a interação entre os arcos elétricos como uma suposta circulação de corrente de uma fonte na outra. Para tentar comprovar isso, os mesmos buscam investigar alteração da razão cíclica de uma condição normal de soldagem para uma que há sobreposição de arcos elétricos, e que tal alteração estaria relacionada a passagem de parte da corrente de uma fonte na outra. Entretanto, no fundo o valor da razão cíclica nada mais é do que um reflexo do valor da tensão de saída da fonte.

Dessa forma, acredita-se que os variados valores de tensão apresentados no processo híbrido são, do ponto de vista da fonte de soldagem, variações de carga semelhante as que ocorrem nos momentos de instabilidades do arco.

4.6 Dinâmica de Atuação do Arco Plasma Sobre a Poça de Fusão

A fim de se obter diretrizes a respeito da atuação dos arcos Plasma e GMAW durante o processo híbrido, o mesmo foi analisado através das filmagens quanto ao comportamento da poça de fusão perante alguns parâmetros propostos.

A Figura 95 mostra que para correntes até 200 A, a depressão gerada na poça pelo arco GMAW, é ainda mais significativa que a depressão gerada pelo arco Plasma. Isso acontece, pois nessa configuração, o arco plasma atua no modo *melt-in*, sendo sugerido que nessas condições, o Plasma tem maior contribuição no pré-aquecimento do metal de base, para posterior soldagem com o arco GMAW.

Já para correntes de plasma de 300 A, é clara a presença do *keyhole*, o qual se torna mais acentuado conforme o aumento da vazão de gás de plasma. Nessa faixa de corrente, também é verificado que o arco GMAW incide principalmente sobre as camadas posteriores da poça de fusão, sugerindo que nesse ponto a contribuição do arco GMAW para penetração é menor.

De uma forma geral, é verificado um comportamento polarizado dos arcos com relação a suas atuações, quando o arco Plasma atua no modo *melt-in*, o arco GMAW atua no modo *burried arc*. Já quando o arco Plasma atua no modo *keyhole*, a depressão exercida pelo arco GMAW na poça é reduzida, atuando como *spray* convencional. Esse efeito é visualizável nas filmagens em alta velocidade realizadas mantendo o gás de plasma constante (3 L/min) e elevando a corrente de Plasma, conforme pode ser verificado na Figura 96.

Vale destacar a exceção apresentada para corrente de 200 A e vazão de gás de 5 L/min. Nessa configuração, há a presença do *keyhole* formado pelo plasma e ao mesmo tempo o arco GMAW atua no modo *burried arc*.

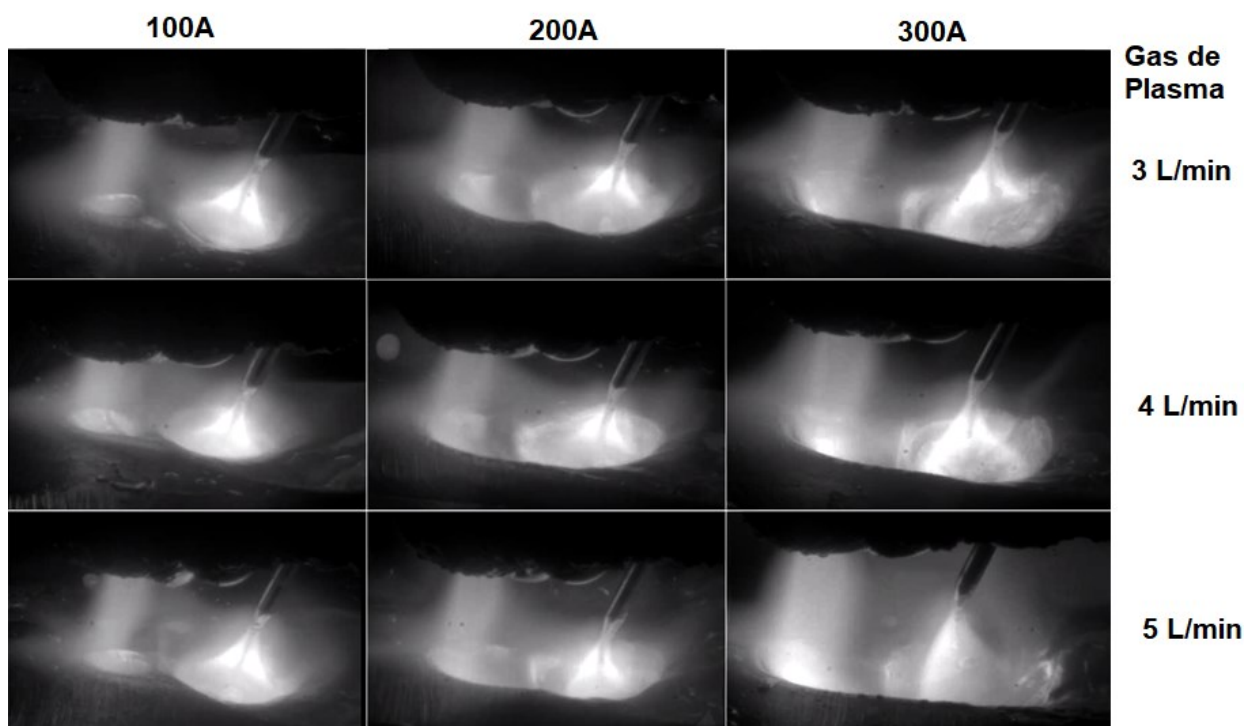


Figura 95 – Filmagens do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes parâmetros de Plasma.

Outro fator que foi verificado ter grande impacto na dinâmica da poça de fusão, é a DBPP. Ao realizar a comparação de 5 para 7 mm de distância, é possível verificar que o perfil da depressão gerado pelo arco plasma muda drasticamente, conforme mostra a Figura 97.

Para 5 mm, a depressão gerada pelo arco plasma tem formato circular, e parece estar mais concentrada em um ponto, sendo possível distinguir a área de atuação dos arcos plasma e GMAW, separados por uma pequena região mais escura.

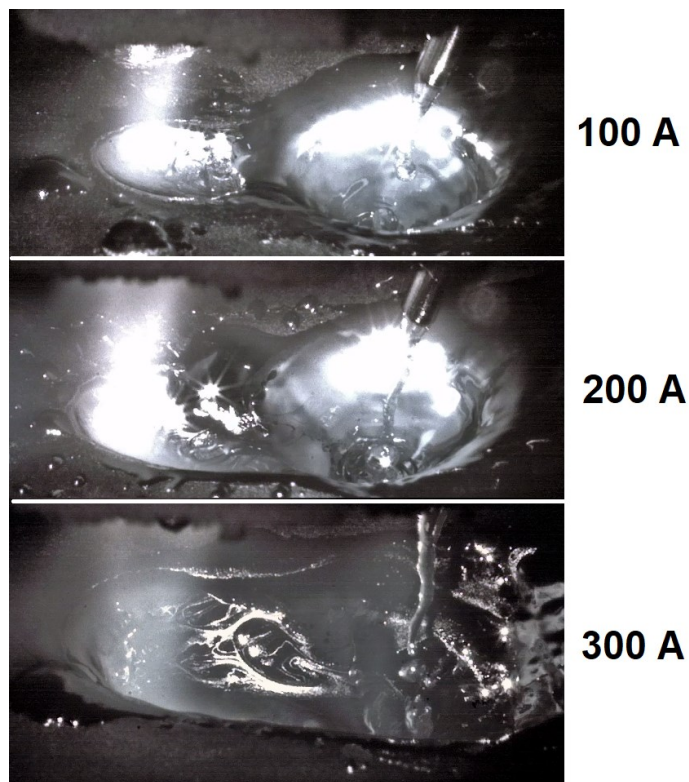


Figura 96 – Filmagens de alta velocidade do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes correntes de plasma.

Ao elevar para 7 mm, é verificado que a depressão gerada pelo arco plasma é distribuída em linha, e não há a distinção das zonas de atuação dos arcos Plasma e GMAW. Hipotetiza-se que, nesse ponto, há a maior deflexão do arco plasma, e ao mesmo tempo há uma porção do arco plasma que está sendo desviado em direção ao arco GMAW, sugerindo ainda que a passagem de corrente entre arcos é mais intensa. Esses fatores combinados, causam uma distribuição maior da energia fornecida pelo plasma ao longo da peça, e podem reduzir significativamente o poder de atuação concentrado do plasma, sendo indesejáveis para soldagem.

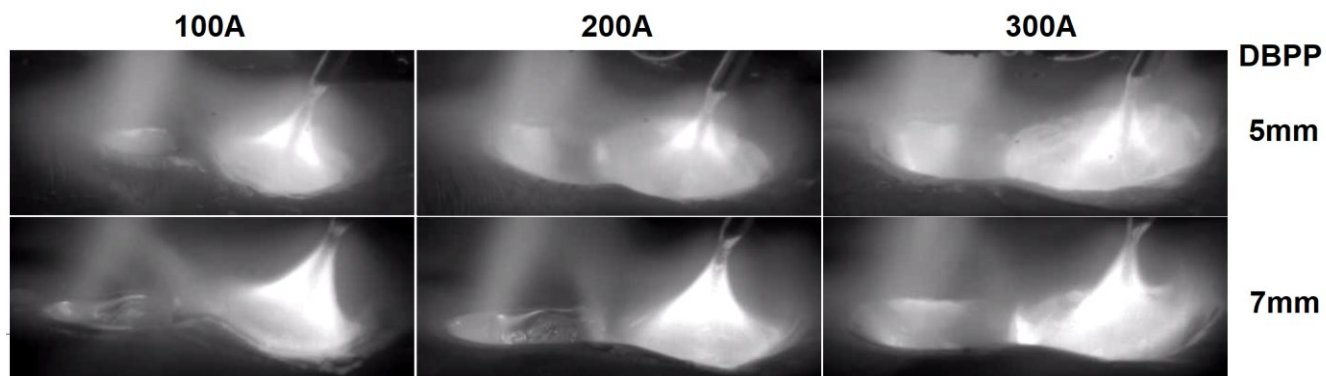


Figura 97 – Filmagens do arco elétrico do processo híbrido Plasma-GMAW para diferentes correntes de plasma e DBPP.

4.7 Efeito da Corrente e Gás de Plasma nas Características Morfológicas da Solda

4.7.1 Efeito da Corrente e Gás de Plasma no Aspecto Superficial do Cordão de Solda

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, durante a soldagem plasma, a corrente e o gás de plasma tem efeito de aumentar a pressão do arco elétrico sobre a poça de fusão, fato que favorece a penetração durante a soldagem. No caso do processo Plasma-GMAW há também a pressão exercida pelo arco GMAW sobre a poça, e que tem direção oposta a aquela exercida pelo arco Plasma, logo entende-se que o arco híbrido seja favorável no balanço das forças atuantes na poça de fusão, favorecendo sua estabilidade e reduzindo os efeitos indesejados na geometria do cordão de solda resultante.

Foram conduzidos ensaios para diferentes níveis de correntes de plasma, extrapolando a vazão de gás de plasma empregada no processo, para a análise do comportamento morfológico do cordão de solda. As Figura 98, Figura 99 e Figura 100 apresentam o aspecto superficial dos cordões de solda obtidos.

Destaca-se que os ensaios foram realizados em chapa de ½” (12,7 mm) de espessura sendo que os testes de numeração 20 (Corrente - 250 A; Vazão de gás - 7 L/min) e 24 (Corrente - 300 A; Vazão de gás - 6 L/min) perfuraram a peça, logo, os mesmos e a partir deles, não foram integralmente analisados, devido a descaracterização da geometria de solda.

De uma forma geral, foi observado que quanto maior a vazão de gás de plasma, maior a irregularidade no cordão de solda, porém não foram apresentados defeitos superficiais grosseiros como mordedura ou *humping*, o que prova que a presença do arco GMAW atuando na mesma poça do arco plasma e fornecendo metal de adição, serviu para balancear as forças atuantes na poça de fusão, resultando em cordões com geometria mais agradável, mesmo extrapolando os parâmetros impostos no arco plasma.

Para o nível de 100 A de corrente de plasma (Figura 98-A), ficou claro que com o aumento do gás de plasma a partir de 5 L/min, as escamas resultantes na solda ficaram em formato de “V” com ângulo mais agudo, à medida que a vazão de gás se aproxima de 7 L/min, o que é negativo para a solda. Isso se deve, pois para este baixo nível de corrente, o aquecimento da poça na zona adjacente ao arco plasma é baixo, o que aliado à grande vazão de gás de plasma provoca um resfriamento do metal recém fundido. A elevada vazão de gás de plasma empurra o metal líquido mais frio para trás, semelhante ao apresentado na Figura 13 resultando em um resfriamento direcional no cordão de solda, da extremidade para o centro, mais intenso.

Ao aumentar a corrente de plasma para 150 A e 200 A (Figura 98-B e Figura 99-A

respectivamente) foi verificado uma maior molhabilidade do cordão de solda a peça. O mesmo pode ser justificado devido ao maior aquecimento gerado pelo arco plasma, o que resulta em um maior molhamento do cordão. Ao contrário do nível de 100 A, a elevação de gás de plasma não alterou o aspecto superficial dos cordões, o que pode ser justificado pois nesses níveis, o aquecimento gerado pelo plasma é maior logo a elevação do gás de plasma não é suficiente para causar efeito significativo no resfriamento da solda.

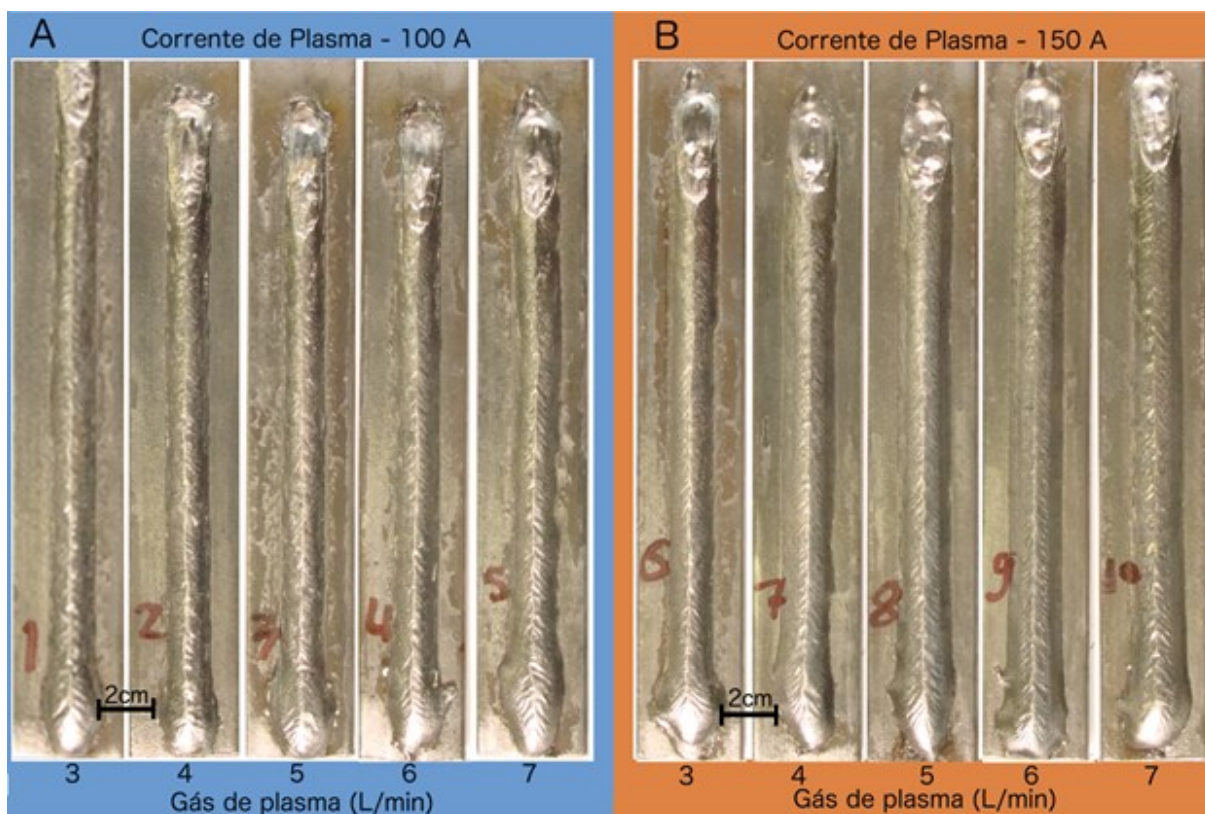


Figura 98 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma (A- Ip 100 A; B- Ip 150 A).

Se para correntes de até 200 A, a elevação do gás de plasma não alterou drasticamente o aspecto superficial dos cordões de solda, para correntes superiores a essa, o efeito do gás de plasma passou a ser expressivo, aumentando a irregularidade e convexidade do cordão conforme aumento do gás de plasma. Para esses níveis de corrente (250 e 300 A) a pressão exercida sobre a poça apenas pelo efeito eletromagnético já é suficientemente grande, e ao passo que a penetração é potencializada pelo efeito mecânico da pressão exercida pelo gás de plasma, a turbulência gerada na poça de fusão é significativamente aumentada. Os cordões são apresentados respectivamente na Figura 100.

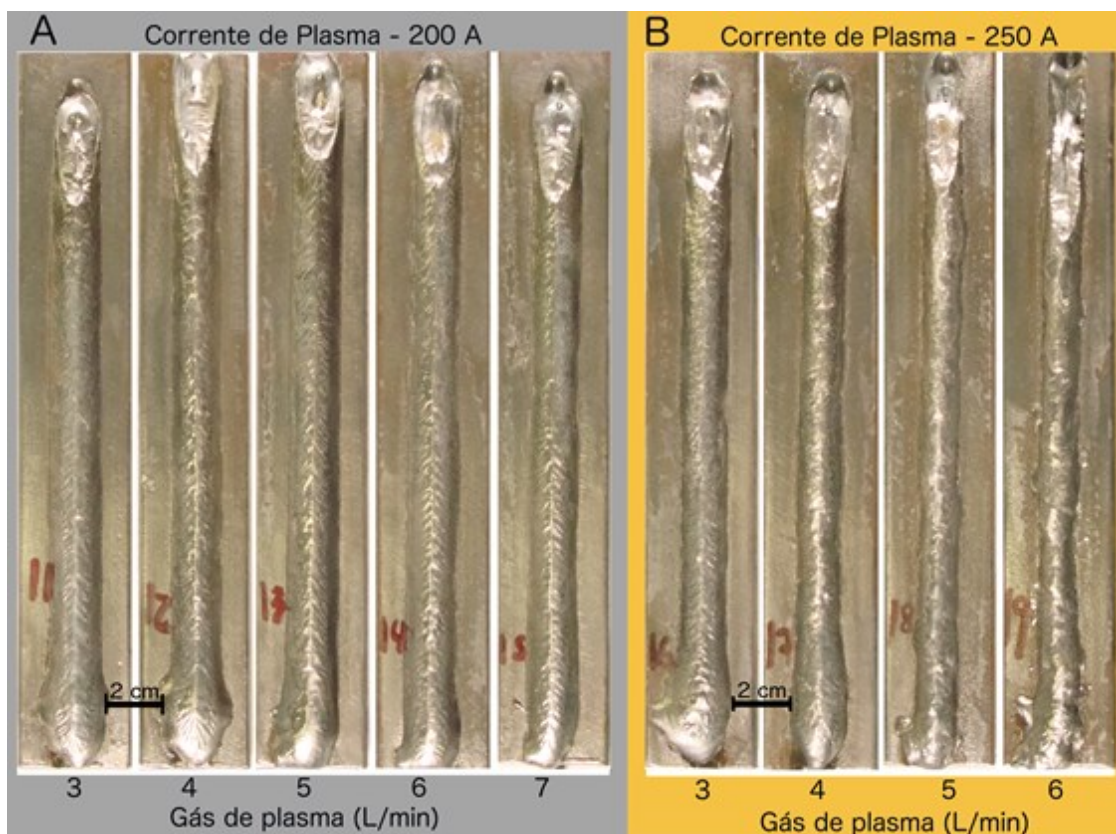


Figura 99 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma A- Ip 200 A; B- Ip 250 A (A amostra 20 não foi apresentada devido a perfuração grosseira durante os testes).

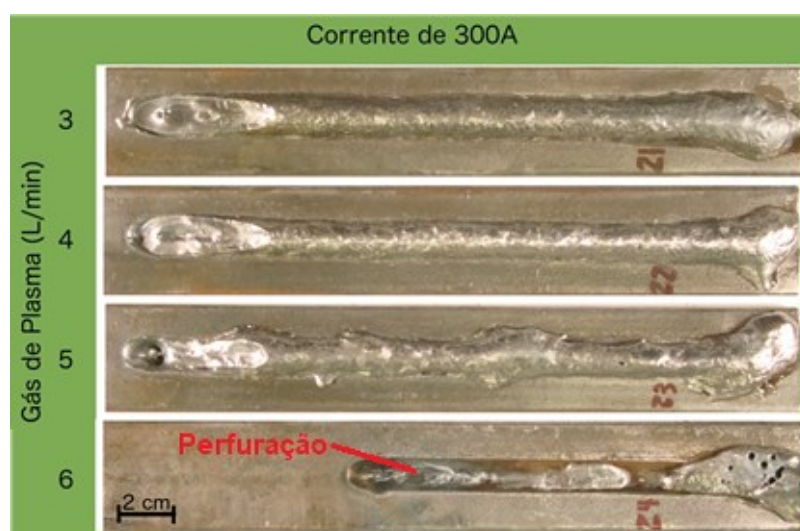


Figura 100 – Aspecto superficial dos cordões de solda com o aumento do gás de plasma Ip 300 A.

4.7.2 Efeito da Corrente e Gás de Plasma na Geometria do Cordão de Solda

Os corpos de prova foram cortados transversalmente e realizados as análises macrográficas conforme a Figura 101, para medição da penetração, largura do cordão de solda e altura do reforço.

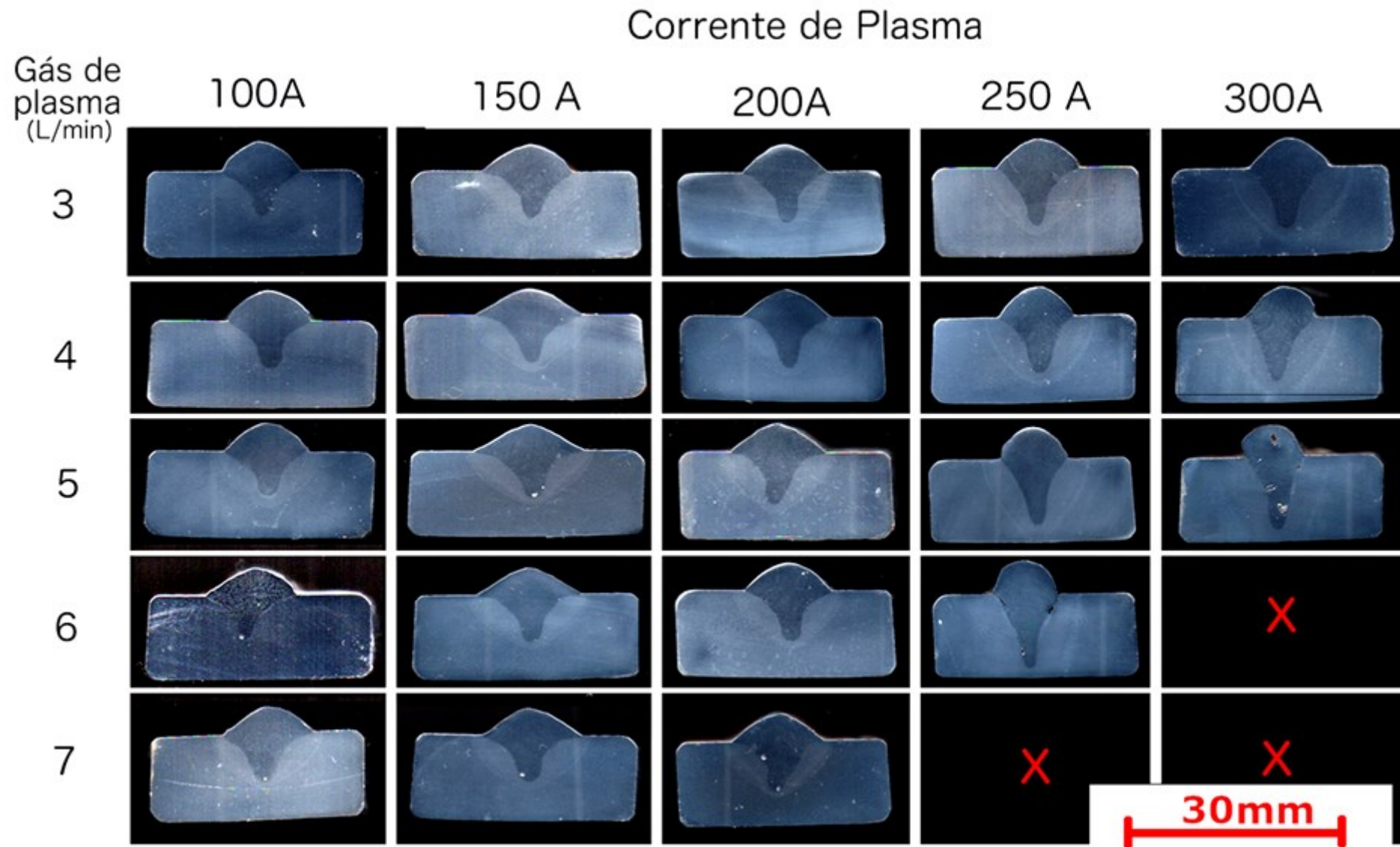


Figura 101 – Macrografias das soldas realizadas variando corrente de plasma (100 à 300 A) e gás de plasma (3 à 7 L/min)

Ao analisar isoladamente a penetração de acordo com a variação dos parâmetros propostos, pode-se verificar na Figura 102 que para correntes até 150 A, a variação na penetração é muito baixa. Estima-se que para essa faixa de correntes, o plasma não atua no modo *keyhole*, logo, o efeito da potencialização da penetração pelo gás de plasma é limitado.

Na outra ponta do gráfico, para correntes acima de 250 A, onde afere-se a atuação por modo *keyhole* do arco plasma, é verificado forte aumento da penetração com aumento do gás de plasma. Nesse modo, a atuação do arco plasma é mais concentrada, logo a capacidade de fusão é maior. A medida que a porção de metal sólido, ligeiramente abaixo de onde o *keyhole* atua é fundida, o gás de plasma expulsa o material líquido dando espaço para o arco atuar na nova porção sólida revelada, aumentando drasticamente a penetração.

Para o nível de corrente de 200 A, o comportamento apresentado se mostrou intermediário aos demais. Apesar do plasma estar atuando no modo *keyhole* para essa corrente, a elevação do gás de plasma a partir de 5 L/min prejudicou a penetração. Isso pode ser justificado, pois para correntes mais baixas, a taxa de penetração é predominantemente estabelecida pela atuação do arco GMAW, tendo o plasma um efeito maior de aquecimento da peça. Já para correntes maiores, a penetração é estabelecida principalmente pelo arco plasma, e o processo GMAW tem efeito de adicionar material e manter a poça aquecida. Logo, nesse nível intermediário de corrente de plasma, há uma co-atuação entre os arcos em termos de penetração, que parece ser otimizada no nível de 5 L/min, esse resultado corrobora com os dados encontrados por GUO et al. [48] em seus ensaios, que para o mesmo diâmetro do orifício do bocal constritor, seus ensaios apresentaram no patamar de 5 L/min os melhores resultados, quando aplicado correntes abaixo de 200 A.

Dessa forma, é possível constatar uma dessemelhança da variação dos parâmetros de plasma no processo híbrido comparado ao processo PAW atuando sozinho. Enquanto no processo PAW, a alteração dos parâmetros de corrente e gás de plasma geram uma evolução proporcional e muitas vezes linear na geometria do cordão de solda. No processo híbrido, é verificado sequências comportamentais diferentes para cada parametrização, pois o contraste das correntes aplicadas nos arcos Plasma e GMAW geram peculiaridades no processo que alteram seu comportamento como um todo.

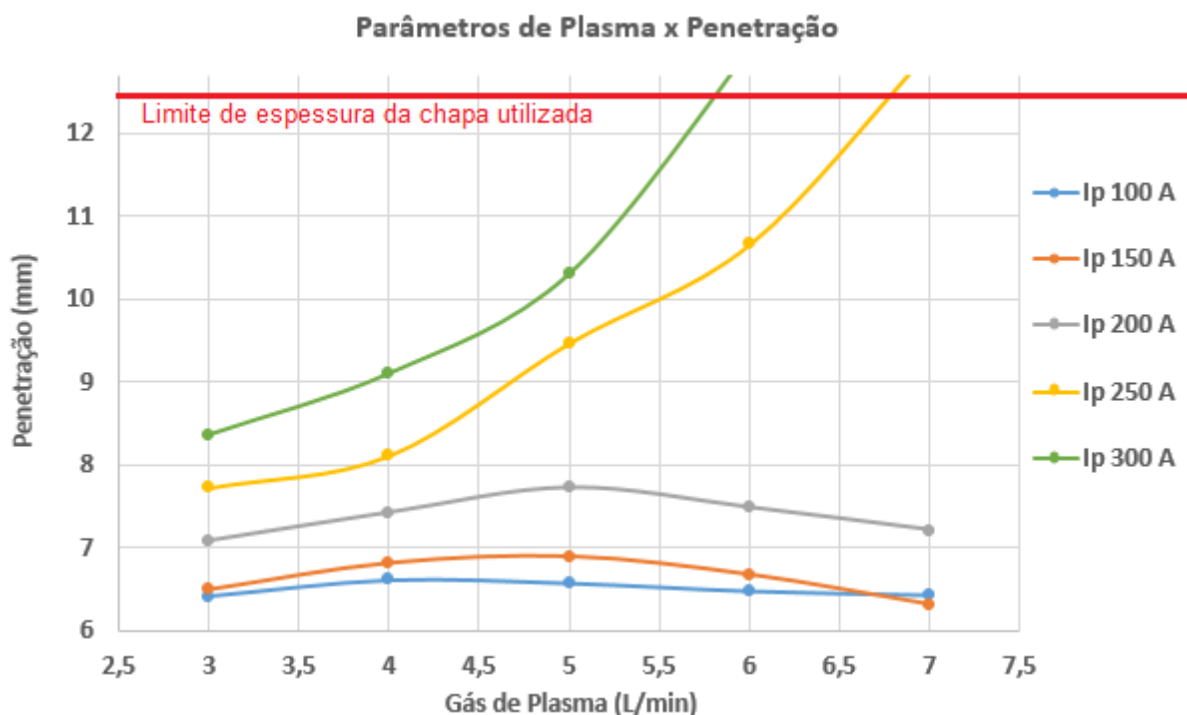


Figura 102 – Profundidade de penetração da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.

Vale destacar também, que os pontos de inflexão nas curvas de penetração apresentados, são extremamente dependentes dos parâmetros aqui utilizados, principalmente os que influenciam diretamente na pressão do arco plasma, como por exemplo o diâmetro do bico constritor, que nesse caso foi de 3,2 mm. Testes semelhantes a esses foram realizados em outro momento, porém realizando a comparação entre os bicos constritores de 3,2 mm e 2,5 mm, como pode ser observado na Figura 103 [30]. Nesse caso, para uma corrente constante de 150 A, os testes foram conduzidos até uma vazão de plasma de apenas 4 L/min, porém a mesma foi suficiente para determinar que o ponto de inflexão da curva de penetração para o bico menor é severamente deslocado para a esquerda. O que apesar de ser intuitivo, nos leva a concluir a enorme importância desse parâmetro no processo.

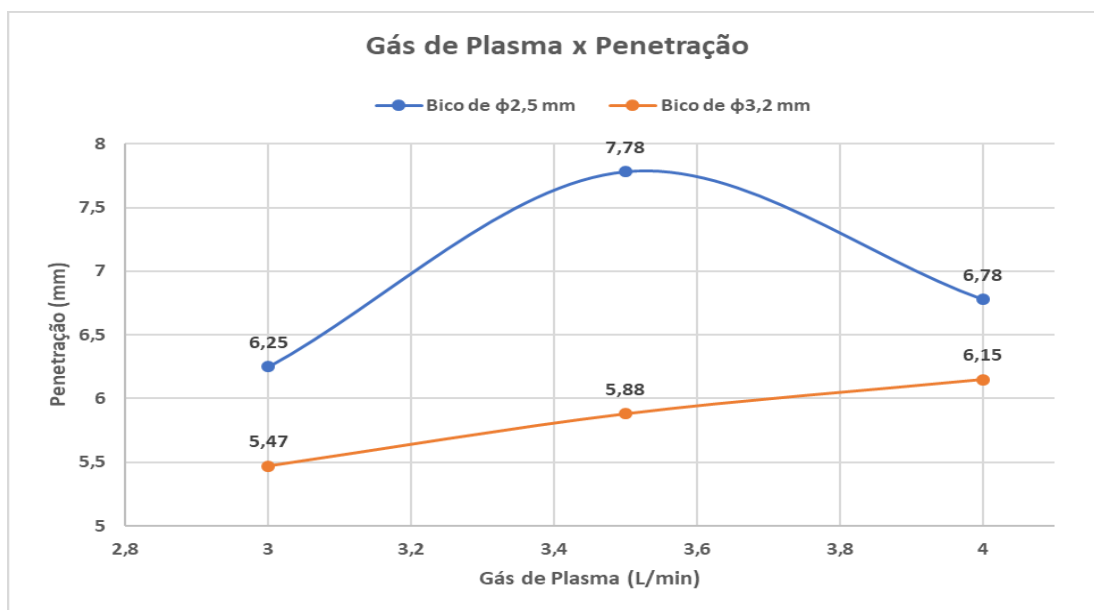


Figura 103 – Profundidade de penetração da zona fundida com a variação do gás de plasma e do diâmetro do bico constritor [30].

Com relação a largura do cordão de solda, pode-se averiguar na Figura 104, que o maior molhamento do cordão se deu em correntes de plasma de 150 A. Deduz-se que isso ocorre pois nesse nível de corrente o plasma não está atuando no modo *keyhole*, logo o aquecimento na peça é mais disperso, resultando em maior espalhamento do metal líquido adicionado. Ao passo que a corrente de plasma é elevada a partir desse ponto, percebe-se uma drástica diminuição na largura do cordão de solda. Pode-se inferir que, com a acentuação do *keyhole*, a poça metálica segue um perfil mais estreito, alterando padrões de convecção da poça, fomentando mais a penetração profunda do que aumento da temperatura da poça, que tende a molhar menos (maior tensão superficial), o que pode também ser suportado pela maior densidade de corrente resultante. O mesmo ocorre com a elevação do gás de plasma.

Por último, os dados relativos à altura do reforço podem ser visualizada na Figura 105 com resultados inversamente proporcional aos apresentados na Figura 104, o que é esperado, pois quanto maior a o espalhamento do cordão de solda, menor é o reforço resultante, visto que a quantidade de material adicionado se manteve constante, e os ensaios foram realizados sobre chapa.

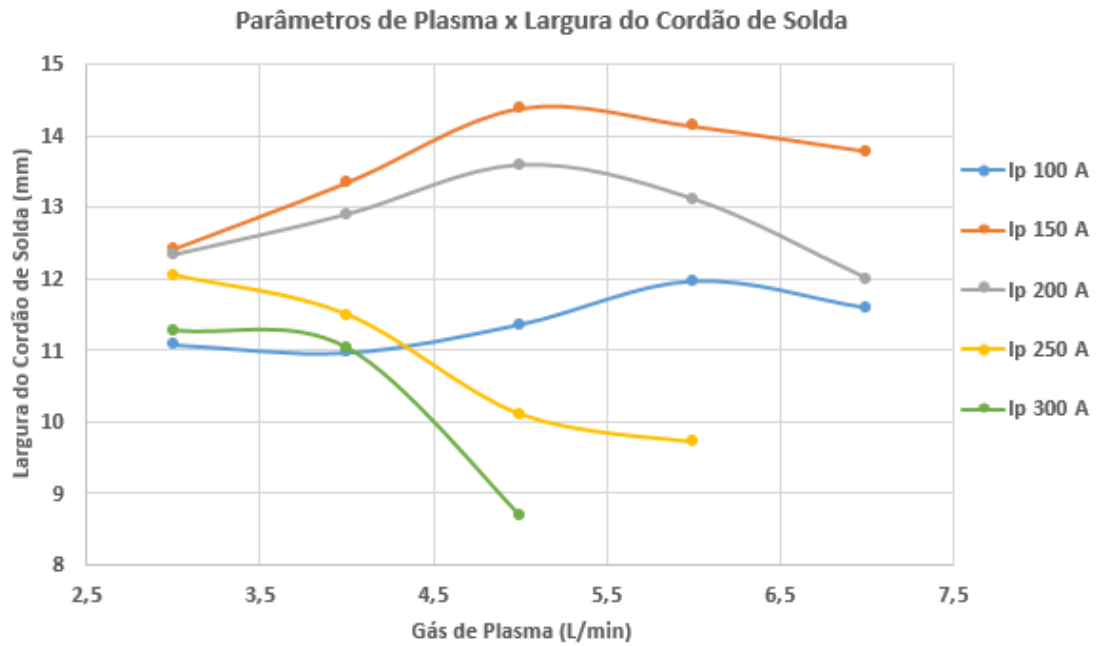


Figura 104 – Largura da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.

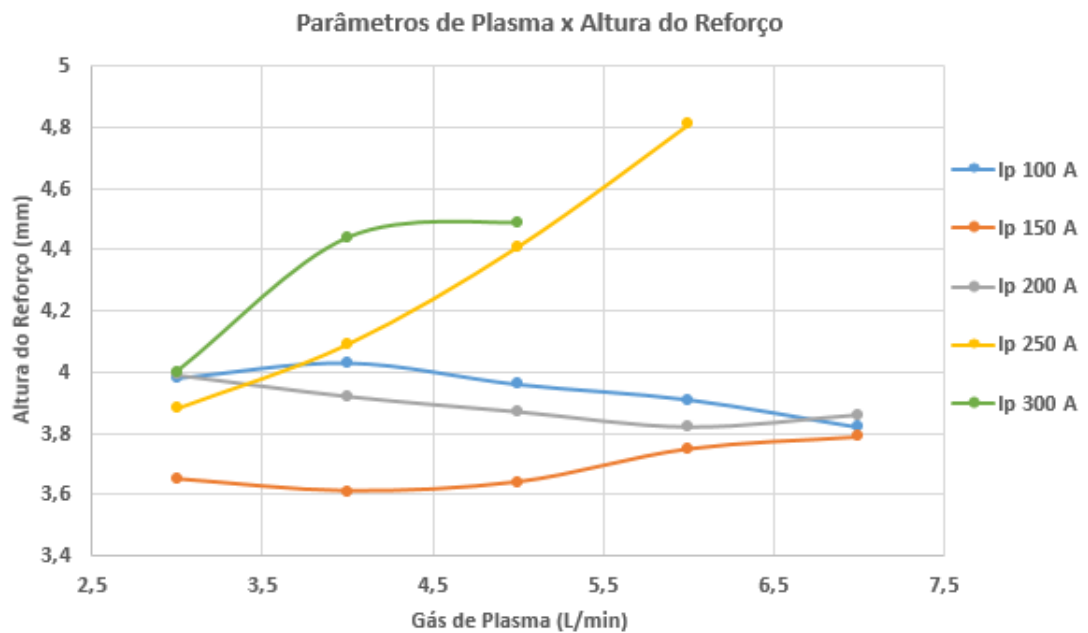


Figura 105 – Altura do reforço da zona fundida com a variação do gás de plasma para cinco níveis diferentes de correntes de plasma.

4.7.3 Efeito da Corrente e Gás de Plasma na Porosidade

A observação da Figura 106 conclui que para os níveis de corrente de plasma cujo efeito de aquecimento foi predominante (100 e 150 A) não houve a incidência significativa de poro-

sidade. No entanto, para correntes maiores, onde o efeito de penetração (*keyhole*) é mais pronunciado, foi observado porosidade para os parâmetros selecionados com maior vazão de gás de plasma.

Ainda é possível concluir a partir da Figura 106, que a transição entre uma solda sã, e uma solda porosa com a elevação da vazão do gás de plasma é súbita, ou seja, ela não aumenta proporcionalmente com o gás de plasma, mas sim se comporta de forma constante até que a partir de um determinado ponto a porosidade se torna de insignificante para expressiva. Esse fenômeno é facilmente identificado ao se verificar o comportamento apresentado para a corrente de 300 A, variando a vazão de gás de plasma. Durante a aplicação de 3 e 4 l/min de Gp, respectivamente, o cordão não mostra porosidade significativa, enquanto que ao elevar para 5 l/min, várias crateras aparecem na peça no sentido de direção da soldagem.

Segundo os estudos realizados por NGUYEN [24], essa mudança abrupta no comportamento relativo a porosidade pode ser atribuída a mudança no comportamento do fluxo de metal sendo fundido pelo arco plasma, de laminar para turbulento. A excessiva pressão com que o metal que está sendo fundido é acelerado, não permite a correta dissipação dos gases de soldagem, aprisionando os mesmos dentro da poça de fusão.

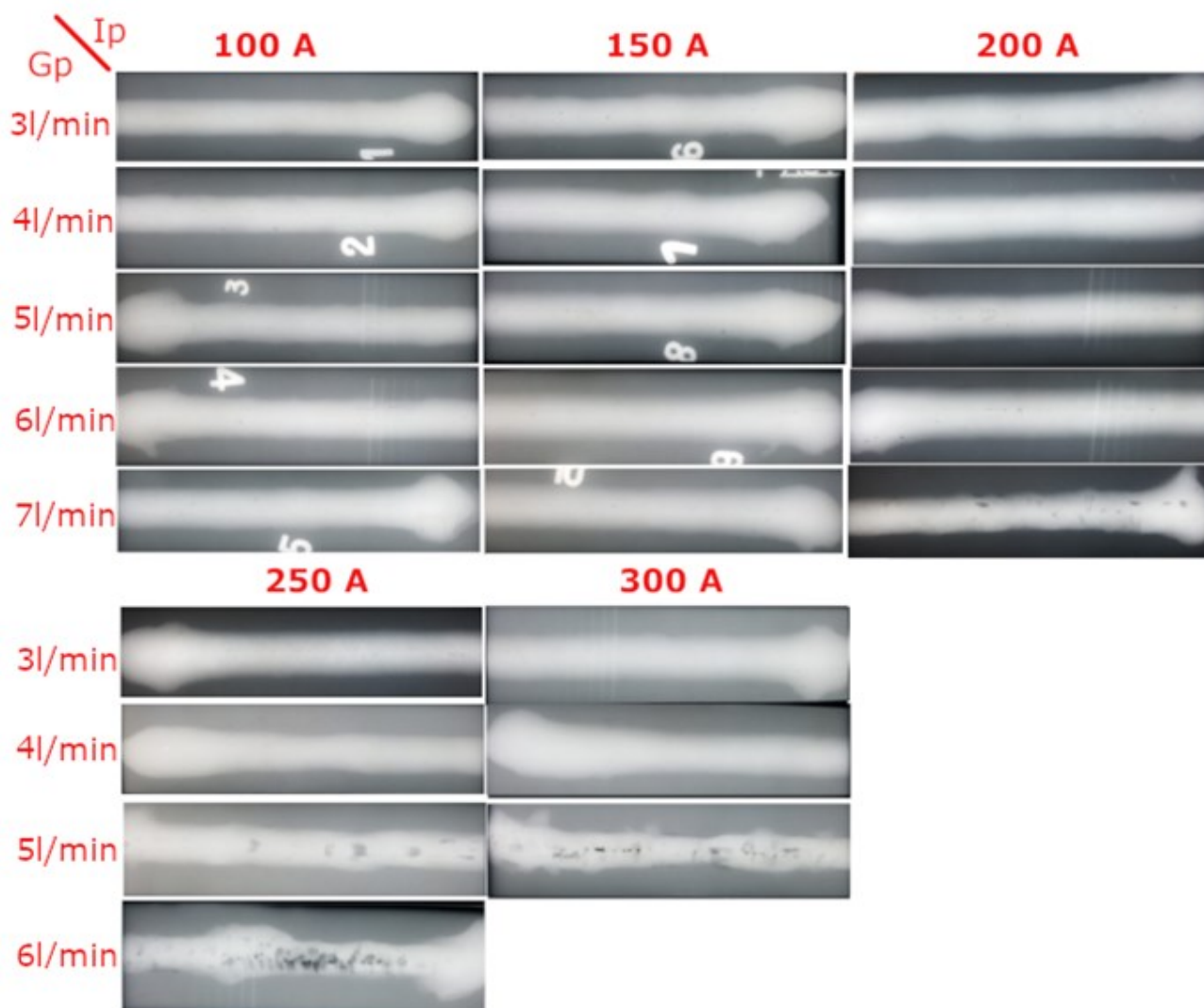


Figura 106 – Ensaio Radiográfico para as amostras soldadas para verificação de porosidade.

4.8 Desgaste nos Consumíveis de Soldagem

Um dos consumíveis mais importantes para o processo Plasma-GMAW é o bocal constritor plasma (neste trabalho denominado também bico constritor), e devido a sua função de restringir a passagem do arco plasma, é comum haver desgaste no mesmo. Durante o processo híbrido, esse desgaste é ainda mais intenso, devido ao calor excessivo que o mesmo fica exposto durante a soldagem.

Além do custo com a substituição do consumível, seu desgaste é extremamente prejudicial para a soldagem, pois, como visto anteriormente, seu diâmetro de orifício é um parâmetro de processo, e sua menor alteração pode causar diferenças significantes no resultado da solda. Também podendo gerar inclusões não metálicas na região da solda.

Em trabalho anterior, FAGUNDES [30] realizou ensaios com uma distância entre o bocal constritor e a peça de trabalho (DBPP) de 3 mm, obtendo um elevado desgaste nos mesmos.

Esse desgaste era principalmente oriundo do contato esporádico do bico plasma com a poça de fusão. Como é apresentado na Figura 107, o autor verificou que após determinados ciclos de testes aplicando 200 A de corrente, o bico aumenta aproximadamente 46% do seu diâmetro (3,2 para 4,7 mm).

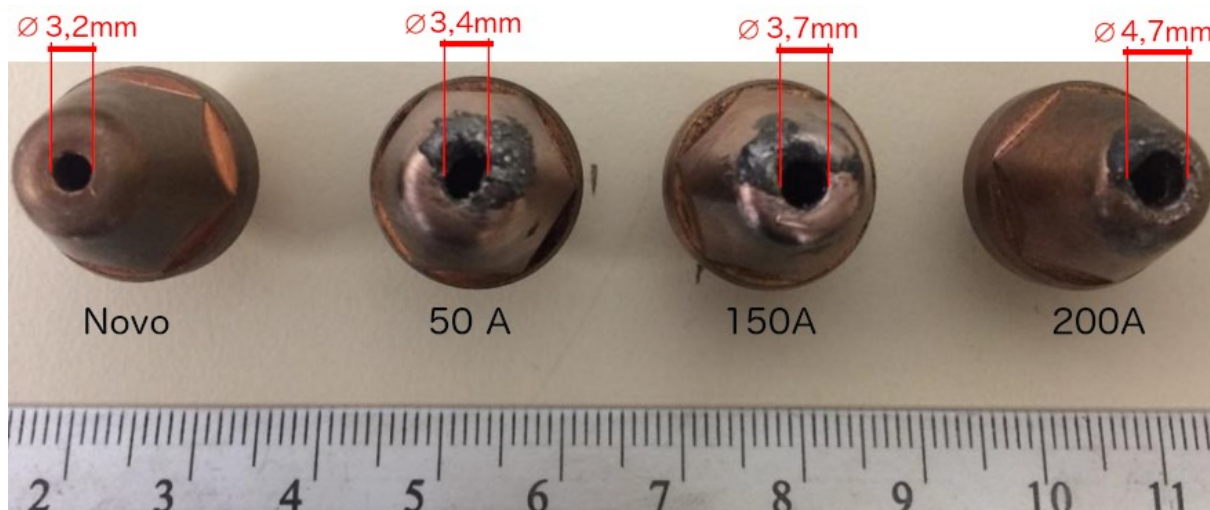


Figura 107 – Comparação entre bocal constritor novo, e após aproximadamente 30 minutos de arco aberto [30].

O presente trabalho considerou a DBPP mínima de 5,0 mm. A rigidez dos arcos em termos de repulsão, como é apresentado no corpo do trabalho, não é significativamente prejudicada, e na prática, foi verificado uma drástica redução no desgaste do bocal constritor.

Como pode ser observado na Figura 108, após a alteração da DBPP para 5 mm, testes semelhantes aos aplicados por FAGUNDES [30] foram conduzidos, e mesmo com a aplicação de correntes mais elevadas, foi verificado que o desgaste resultante no bocal constritor foi significativamente atenuado. Para a mesma corrente (200 A), o aumento do diâmetro foi de apenas ~10%.

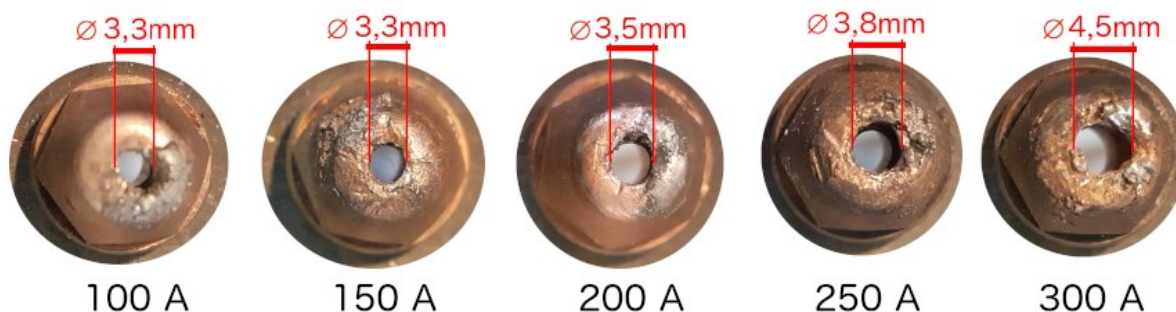


Figura 108 – Comparação dos bocais constritores após aproximadamente 30 minutos de arco aberto.

4.9 Aplicação do Processo Plasma-GMAW Serial em Soldagem de União

Por fim, e extremamente importante para validação do estudo, foram realizados ensaios

aplicativos. Inicialmente, foi verificado a influência de diferentes tipos de *backing* durante a soldagem. Posteriormente no âmbito do projeto financiado pela FINEP, Soldaduto, o processo Plasma-GMAW serial também foi testado como potencial opção para soldagem de união de dutos de petróleo e gás, em soldagem circunferencial.

4.9.1 Influência do Tipo de Backing na Soldagem de União

Como pode ser observado na Figura 109, a soldagem realizada com o *backing* cerâmico (A) apresentou excesso de penetração, o que é comum de ocorrer, pois devido a elevada fluidez da poça de fusão, e a cama cerâmica ser rígida e demasiadamente grande, o metal de solda escorreu levemente através do *backing* enquanto resfriava. Já para o material de fibra de vidro (B), devido sua maleabilidade e adaptabilidade à superfície no qual ele é exposto, conseguiu acomodar bem o metal de solda, formando uma raiz de aparência satisfatória. O material de cobre por sua vez, apesar de também ser rígido, como se trata da soldagem de chapas plasmas e não empenadas, isso não interferiu na aderência do cobre à junta, e ainda por cima, a elevada condutividade térmica do cobre também ajuda a prevenir contra o escorrimento, apresentando também bom aspecto da raiz.



Figura 109 – Macrografias resultantes para soldas realizadas com três tipos diferentes de *backing* (A) Cerâmico, (B) Fibra de Vidro e (C) Cobre.

Nas macrografias não foi possível observar defeitos de soldagem, no entanto ao realizar a inspeção radiográfica das peças soldadas, foi verificado que a amostra soldada com *backing* cerâmico apresentou elevada porosidade (Figura 110-A), enquanto que as chapas soldadas com os outros dois tipos de *backing* apresentaram níveis aceitáveis de porosidade segundo a norma ASME [57] (Figura 110-B,C). Podemos atribuir a elevada porosidade no material cerâmico, devido ao excesso de metal de solda concentrado na raiz atrapalhar na dissipação dos gases de soldagem. Enquanto isso, o resfriamento rápido proporcionado pelo cobre-junta e a característica porosa do material de fibra de vidro, ajudam na dissipação dos gases, causando menor porosidade.

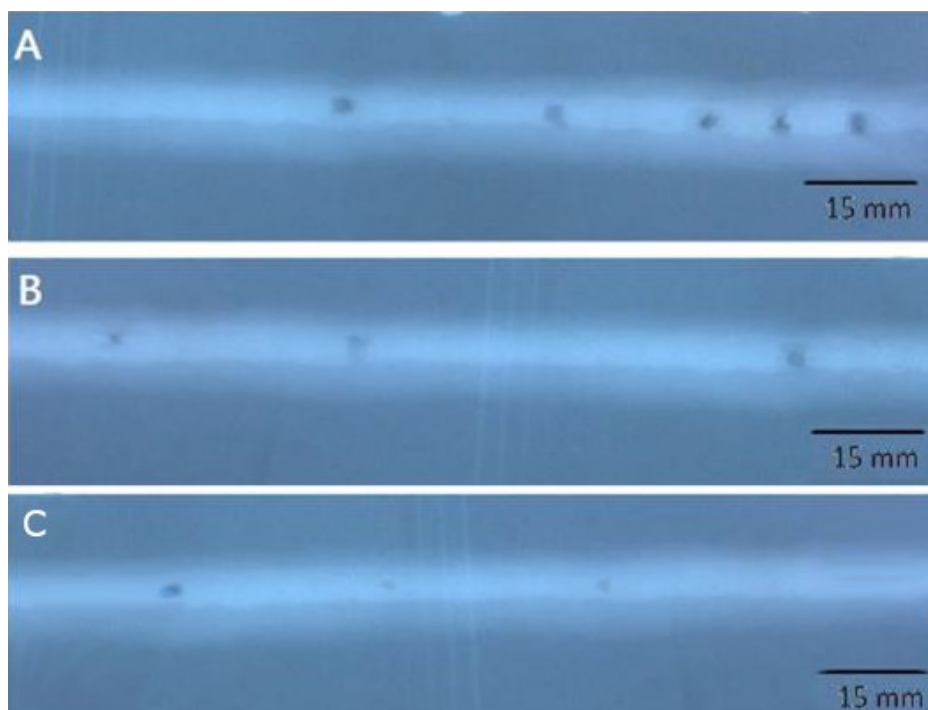


Figura 110 – Radiografias para soldas realizadas com três tipos diferentes de *backing* (A) Cerâmico, (B) Fibra de Vidro e (C) Cobre.

4.9.2 Soldagem Circunferencial de Tubo

Ao replicar os ensaios do item 4.9.1 na soldagem circunferencial do tubo, utilizando os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 7, foram obtidos resultados inesperados. Apesar do tipo de chanfro ter sido reproduzido e a posição de soldagem se mantido na plana, a solda apresentou perfuração, excesso de penetração e o escorrimento, conforme pode ser visualizado na Figura 111.

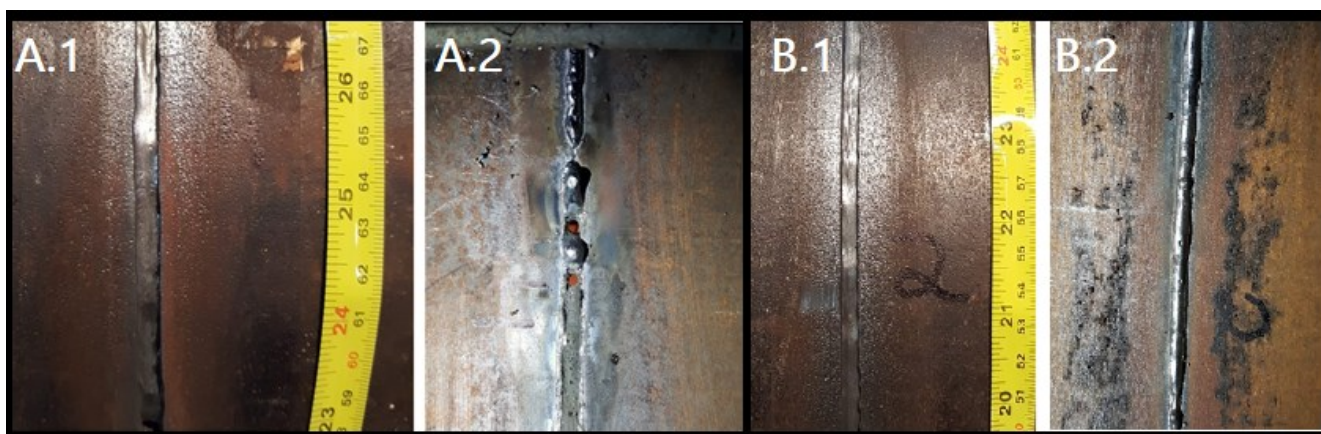


Figura 111 – Soldagem dos Tubos para a velocidade de 45 cm/min (A/B: *backing* cerâmico/fibra de vidro; 1/2 Face/raiz da solda).

Esses problemas gerados, podem ser atribuídos a um possível desalinhamento dos tubos durante a montagem. Apesar de a abertura entre as partes ter sido cuidadosamente dimensionada, a ovalização oriunda do processo de fabricação do tubo é difícil de ser corrigida durante a montagem, logo é comum apresentar algum tipo de desalinhamento.

Contudo, esse resultado inesperado foi visto como uma oportunidade. Se há o escoamento, é porque a penetração é excessiva, nesse caso há espaço para o aumento da velocidade de soldagem.

Mantendo os demais parâmetros constantes e elevando a velocidade de soldagem para 60 cm/min, foi possível contornar o problema de escoamento/perfuração, e o aspecto superficial dos cordões de solda se mostraram satisfatórios, conforme pode ser visualizado na Figura 112. Além disso, foi possível cumprir o objetivo proposto que é superar a produtividade da mesma solda que fosse possivelmente realizada pelo processo arco submerso. Nota-se que o backing de fibra de vidro proporcionou menor altura e melhor regularidade do reforço da raiz, além de ausência de mordeduras.

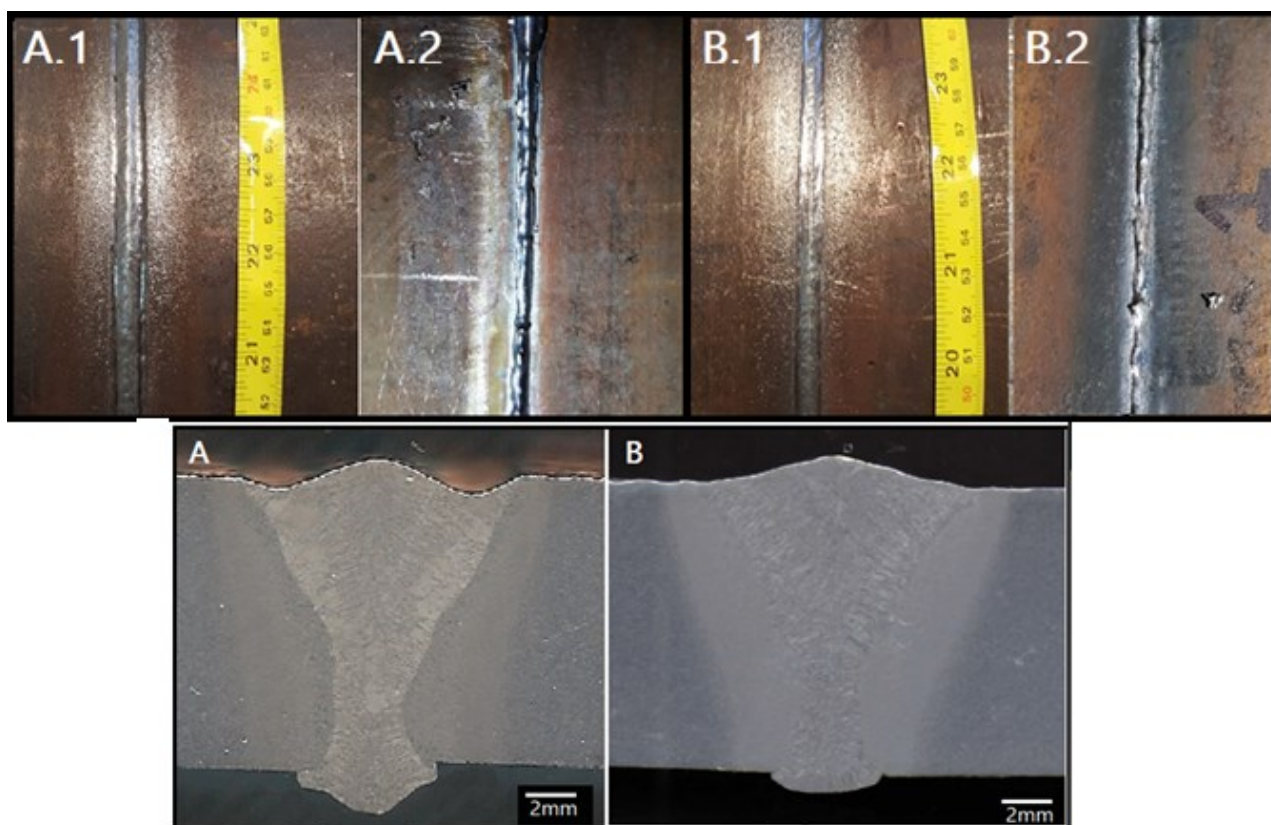


Figura 112 – Aspecto das soldas realizadas nos tubos para V_s : 60 cm/min. (A) *backing* cerâmico. (B) Fibra de Vidro.

5 CONCLUSÕES

O processo Plasma-GMAW Serial foi explorado em suas características elétricas e físicas, de forma a enriquecer a base de dados sobre suas características, para dar suporte a futuras pesquisas e aplicações, sendo que os resultados obtidos nesse trabalho, a partir da montagem do sistema desenvolvido para o monitoramento de dados, permitiram caracterizar a atuação do processo híbrido, definir as principais formas de transferência metálica presentes e as formas de atuação de cada arco elétrico. Além disso foi verificado as particularidades de cada tipo de transferência metálica, bem como sua influência na poça de fusão.

Também, obteve-se um ganho de conhecimento a respeito das interações eletromagnéticas do arco híbrido, tais como o efeito de deflexão entre os arcos, bem como suas implicações e situações na qual esses efeitos são acentuados. Em adendo, foi possível dimensionar as forças atuantes no sistema e verificar a implicação das mesmas durante a soldagem.

Além do que foi exposto, pode-se destacar:

Acerca das interações físicas entre os arcos elétricos:

- Os arcos estão sujeitos a uma intensa força eletromagnética, que pode causar a extrema deflexão dos arcos, sobretudo o arco Plasma;
- A deflexão do arco plasma é mais acentuada quanto maior a diferença da corrente imposta no Plasma para a corrente imposta na fonte GMAW, sendo que quando elas são próximas, ambos os arcos apresentam boa rigidez;
- Durante o processo híbrido utilizando MIG pulsado há um momento em que a fonte MIG fornece energia para ambos os processos;
- Quando a corrente GMAW é muito maior que a corrente de Plasma há maior hibridização dos arcos e maiores interferências nos sinais elétricos (variação na tensão de saída);
- O campo magnético externo que deveria atuar para conter a deflexão entre arcos não está funcionando corretamente. Está sendo desviado pela peça ou ofuscado pela corrente que passa entre tochas;

Sobre métodos de atuação e transferência metálica:

- Foi verificado que mediante altas correntes no arco plasma, o arco GMAW não exerce influência na penetração. Já quando o plasma atua com baixas correntes há uma co-dependência de ambos os processos na penetração;

- A transferência metálica predominante para a maior gama de parametrizações em ambos os processos é a goticular, podendo ser com alongamento ou rotacional dependendo de sua parametrização, sendo que a elevação da corrente de plasma favoreceu a transferência rotacional;
- A transferência metálica pulsada apresentou grande irregularidade nos sinais elétricos;

Quanto aos procedimentos de soldagem realizados:

- Foi verificado que o parâmetro “ótimo” em termos de geometria do cordão de solda (largura x penetração) foi para corrente de 200 A e gás de plasma de 5 L/min;
- Devido ao modo *melt-in*, para correntes de plasma de até 200 A, a vazão de gás de plasma tem muito pouca influência sobre a penetração. Já para correntes superiores, onde o plasma atua em modo *keyhole* a vazão de gás de plasma é essencial para atingir a penetração, em detrimento da molhabilidade;
- O *backing* de cobre e o de fibra de vidro mostraram bom desempenho para o trabalho com o processo híbrido;
- Aplicar vazões de gás de plasma acima de 5 L/min, para as condições propostas deve ser ponderado, devido à forte presença de porosidade acima desse patamar;
- A soldagem circunferencial de união de tubo mostrou produtividade, no mínimo, duas vezes superior à concorrente mostrada na literatura, o arco submerso. Isso se deu principalmente pois o processo Plasma-GMAW realiza a soldagem em passe único.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que ainda se trata de um processo relativamente novo, muito há a ser explorado acerca do mesmo. Durante os trabalhos desenvolvidos foram verificadas algumas oportunidades de estudo futuras, são elas:

- Criar uma bobina em formato C, e acopla-la na tocha de soldagem, a mesma deve produzir um campo magnético que pressiona os arcos Plasma e GMAW de fora para dentro nas regiões externas ao arco, para baixo na região central do arco; O objetivo é verificar se esse tipo de campo magnético suplementar seria mais eficaz para manter os arcos rígidos e impedir que a corrente passe entre as duas tochas;
- Realizar outro trabalho explorando melhor a influência dos parâmetros do GMAW no cordão de solda, esse trabalho foi extensamente explorado os parâmetros de plasma, logo sobrou espaço para realizar testes semelhantes com relação ao GMAW;
- Estender os trabalhos práticos, realizando a aplicação da soldagem para alta penetração e comparando com os processos concorrentes em termos de desempenho e custo;
- A partir das descobertas realizadas e parâmetros observados, propor novas aplicações para o processo, não se limitando a soldagem de alta penetração. Mas também a soldagem de preenchimento e soldagem fora de posição;
- Realizar o acoplamento de duas tochas simples Plasma e GMAW e verificar se há diferença relevante da tocha produzida pelo fabricante do equipamento e a associação de duas tochas e fontes simples.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. NOWACKI e P. Rybicki, "Influence of heat input on corrosion," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 17, nº 1-2, pp. 70-310, July 2006.
- [2] P. K. GHOSH, G. Kulkarni e P. A. Banshi, "High Deposition Pulse Current GMAW Can Change Current Scenario of Thick Wall Pipe Welding," *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, vol. 6, 2009.
- [3] J. MARTIKAINEN, "Conditions for achieving high-quality welds in the plasma-arc keyhole welding of structural steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 52, pp. 68-75, 1995.
- [4] M. A. OLIVEIRA, "Desenvolvimentos no processo híbrido plasmaMIG para operações de soldagem e brasagem," Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2006.
- [5] W. STEEN e J. Mazumder, *Laser Welding in Laser Materials Processing*, London: Springer, 2010.
- [6] R. REIS e A. SCOTTI, *Fundamentos e prática da soldagem a plasma*, vol. 1, Artliber, 2007, p. 147.
- [7] T. GRAF e H. STAUFER, "Laser-hybrid welding drives VW improvements," *Welding Journal*, vol. 82, pp. 42-48, 2003.
- [8] W. G. Essers, "New process combines plasma with GMA welding," *Welding Journal*, vol. 55, nº 5, p. 394/400, 1976.
- [9] W. S. I. Spaceform, "Combined Plasma-MIG arc technology and Equipment Manufactured by PLT," Madison Heights, USA, 2008.
- [10] M. Moradi, M. Ghoreishi, J. Frostevarg e A. F. H. Kaplan, "An investigation on stability of laser hybrid arc welding," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, nº 4, pp. 481-487, 2013.

- [11] V. PONOMAREV, A. SCOTTI, J. NORRISH e W. LUCAS, “Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification. IIW Doc. XII-1960-09,” 2009.
- [12] D. IORDACHESCU, W. LUCAS e V. PONOMAREV, “Reviewing the "classification for metal transfer". IIW Doc., No XII-1888-06,” 2006.
- [13] A. SCOTTI, V. PONOMAREV e W. LUCAS, “Ascientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding.,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 1406-1413, 2012.
- [14] R. S. Carvalho, “Tecnologias para Execução de Revestimentos via Soldagem Automática das Paredes D'Água de Usinas Termelétricas,” (Tese - Doutorado); Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2015.
- [15] A. A. RESENDE, F. KEOCHEGUERIAN e L. O. VILARINHO, “The Influence of CO₂ and O₂ Content on Globular Spray Transition Current when Using Argon-Based Blends in GMAW of ER70S6 Wire,” *Welding International*, pp. 593-601, 2010.
- [16] H. A. KORDI, “Metal Transfer Mapping for FCAW Process by Using Near-Infrared Filming,” Dissertação - Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Uberlândia., Uberlândia, 2016.
- [17] T. S. Luz, C. E. A. L. Rodrigues e V. A. Ferraresi, “Observação do Efeito Pinch na Soldagem MIG/MAG do Arame AWS 609L,” Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- [18] R. GOHR JR, “Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG.,” Tese - Doutorado; Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [19] J. NORRISH, Recent gas metal arc welding (GMAW) process developments:, vol. 61, Wollongong: Weld World, 2017, pp. 755-767.

- [20] R. A. BERNARDI, K. C. RIFFEL e R. H. G. SILVA, “Otimização do Processo MIG de Alta Penetração Utilizando Controle da Indutância,” XLIII Congresso Nacional de Soldagem., Joinville, SC, 2017.
- [21] C. S. Wu, L. Wang, W. J. Ren e X. Y. Zhang, “Plasma Arc Welding: Process, sensing, control and modeling,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, pp. 74-85, 2014.
- [22] M. B. Schwedersky, “Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco,” Dissertação - Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis, 2011.
- [23] A. Grinyuk, V. & Korzhik e V. & Shevchenko, “Main tendencies in development of plasma-arc welding of aluminium alloys,” *The Paton Welding Journal*, pp. 31-41, 2015.
- [24] A. V. NGUYEN, D. WU, S. TASHIRO e M. TANAKA, “Undercut Formation Mechanism in keyhole plasma arc Welding,” *WELDING JOURNAL*, vol. 98, pp. 204-212, 2019.
- [25] P. J. Groetelaars, “Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão do Processo MIG/MAG duplo-arame,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- [26] A. A. Resende, “Uma contribuição à análise dos parâmetros de soldagem do processo Plasma-MIG com eletrodos concêntricos.,” Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [27] W. G. ESSERS e M. R. M. V. GOMPEL, “Arc Control with Pulsed GMAW Welding,” *Welding Journal*, pp. 26-32, June 1984.
- [28] D. M. YENNI, “High Pressure Arc Process and Apparatus.,” United States Patent Office, Patent N. 2,847555. Aug, 1958.
- [29] PHILIPS, “Plasma-MIG welding.,” *Philips Tech. Rev.*33. 21-24, No. 1, 1973.
- [30] R. F. Fagundes, “DESENVOLVIMENTOS NO PROCESSO HÍBRIDO PLASMA-MIG SERIAL POTENCIALIZADO PELO MIG/MAG DE ALTA

- PENETRAÇÃO,” Tese (Doutorado); Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2019.
- [31] A. A. RESENDE, “Estudo de Características Operacionais do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos,” Tese-Doutorado; Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- [32] PLT, “Combined Plasma-MIG arc technology and equipment manufactured by PLT,” Spaceform Welding Solutions, Inc, Madison Heights, USA, 2014.
- [33] K. Yurtisik, S. Tirkes, I. Dykhno, C. H. Gur e R. Gurbuz, “Characterization of duplex stainless steel weld metals obtained by hybrid plasma-gas metal arc welding,” *Soldagem e Inspeção*, vol. 18, nº 3, September 2013.
- [34] L. Learning, “Magnetism and Magnetic Fields,” [Online]. Available: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/magnetism-and-magnetic-fields/>. [Acesso em 2019].
- [35] R. P. REIS, “Assessment of Low Current Tandem GMAW Processes with Waveform Control and With aid of Laser Beam,” Tese-Doutorado; Progama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [36] W. G. ESSERS, G. A. M. WILLEMS, J. J. C. BUELENS e V. GOMPEL , “Plasma-MIG welding - A new torch and arc starting method,” *Metal Construction*, pp. 36-42, January 1981.
- [37] S. YAMANE, H. NUMAZAWA, F. KONG, K. HOSOYA, T. NAKAJIMA e H. YAMAMOTO, “Observation of Welding Phenomena in Two-electrode Welding of Plasma and MIG,” Saitama University; Hitachi Construction Machinery, 2013.
- [38] J. Holtz, “Pulse width modulation - a survey,” *IEEE transactions on industrial Electronics*, vol. 39, nº 5, pp. 410-420, 1992.
- [39] S. KANEMARU, T. SASAKI, T. SATO, T. ERA e M. TANAKA, “Study for the Mechanism of TIG-MIG Hybrid Welding Process,” *Welding in the World*, vol. 59, pp. 261-268, 2015.

- [40] R. BERNARDI, K. RIFFEL, M. BARANENKO e H. DIRENE, “Relatório da disciplina de Processos Híbridos,” Florianópolis, 2018-3.
- [41] A. SCOTTI, R. Gorhs e J. Lemes, “Active power measurement in arc welding and its role in heat transfer to the plate,” *Welding in the World*, vol. 61, pp. 847-856, 2017.
- [42] K. MATTHES e T. KOHLER, “Electrical effects and influencing quantities in the case of the hybrid Plasma-MIG welding process,” *Welding and Cutting*, pp. 87-90, Feb. 2002.
- [43] G. JELMORINI, G. W. TICHELAAR e W. G. ESSERS, “Welding Characteristics of the Plasma-MIG Process,” *Metal Construction*, pp. 5688-572, November, 1975.
- [44] W. G. ESSERS, G. JELMORINI e G. W. TICHELAAR, “Method of and Device for the Thermal Working and Processing of High-Melting-Point Materials,” United States Patent No 3,830,997, September, 1972.
- [45] H. HONG, Y. HAN e J. TONG, “Investigation on droplet momentum in VPPA-GMAW hybrid welding of aluminum alloys,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 2301-2308, 2016.
- [46] N. V. ANH, S. TASHIRO, B. V. HANH e M. TANAKA , “Development of Plasma-MIG Hybrid Welding Process.,” *Welding Society*, vol. 35, nº 2, 2017.
- [47] J. N. DUPONT e A. R. MARDER, “Thermal Efficiency of arc welding process,” *Welding Journal*, vol. 74, nº 12, pp. 406-416, December, 1995.
- [48] Y. GUO, H. PAN, L. REN e G. QUAN, “An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1433-1440, 2018.
- [49] D. V. RIBEIRO, H. DIRENE, A. B. VIVIANI e R. H. G. SILVA, “Desenvolvimento de Procedimento de Soldagem para União de Juntas em T Utilizando o Processo Plasma-MIG Acoplado em Série,” *9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, Joinville, Santa Catarina, 2017.

- [50] “Manual de Instruções,” IMC SOLDAGEM, 2015. [Online]. Available: http://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/manual_Digiplus%20ACDU-DCDU-ACDCDU.pdf. [Acesso em Setembro 2019].
- [51] “Manual do Sistema de Aquisição de Dados,” IMC SOLDAGEM, 2014. [Online]. Available: IMC Soldagem, “Manual do Sistema,” 2014. [Online]. Available: http://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/manual_SAP%20V%204%20-%20V4Ti%20-%20V4CTi%20-%204ed.pdf. [Acesso em 2017].. [Acesso em Setembro 2019].
- [52] “Seelector ICAM weld Manual,” HEMA Electronic, [Online]. Available: http://www.hema.de/fileadmin/upload/pdf/seelector_ICAM_HD4_en0913web.pdf. [Acesso em Setembro 2019].
- [53] “Specifications Sheet,” IDT Vision, 2017. [Online]. Available: https://idtvision.com/support/specifications-sheets/?idt_id=Y4-S2. [Acesso em Setembro 2019].
- [54] “Uses and Advantages of Fiberglass Weld Backing Tape,” Fiback, [Online]. Available: <https://www.aquasolwelding.com/uses-and-advantages-of-fiberglass-weld-backing-tape>. [Acesso em Setembro 2019].
- [55] C. KIM, “Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions,” *Materials Science Forum*, Vols. %1 de %2654-656, pp. 350-353, 2010.
- [56] S. KRISHANKANT e S. K. SHEKHAR, “Determination of Flux Consumption in Submerged arc Welding by the Effect of Welding Parameters,” *Global Journal of Researches in Engineering - Mechanical and Mechanics Engineering*, vol. 12, nº 2, March, 2012.
- [57] A. S. o. M. E. -. B. a. P. V. C. (BPVC), Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1, ASME, 2019.

- [58] E. Bidese, “Tecnologias Para Controle Adaptativo Da Soldagem De Raiz Utilizando Sensores De Triangulação Laser,” UFSC, Tese de Doutorado. Florianópolis, 2017.
- [59] Meta Vision, “Smart Laser Tools User, Manual User, Version 1.0.1.,” 2012.
- [60] J. G. Emmerson, “FCAW Orbital Pipe Welding Technology Improves Fab Shop Productivity,” *Welding Journal*, vol. 78, n° 11, pp. 57 - 60, November 1999.
- [61] IDT Vision, “IDT Cameras specification Manual,” Tallahassee, FL, 2017.
- [62] I. HARRIS, “Plasma Arc Welding. In: ASM Metals HAndBook,” *Brazing and Soldering*, vol. 6, 1994.
- [63] A. SCOTTI e V. PONOMAREV, Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho., São Paulo: Artliber, 2014.
- [64] C. Marques, “Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional,” Tese de Doutorado. Florianópolis, 2017.
- [65] A. M. QUITES e J. C. DUTRA, Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico, Florianópolis: EDEME, 1979, p. 248.
- [66] J. C. DUTRA, “Automating a Wheel Manufacturing Operation.,” *Welding Journal*, vol. 93, pp. 76-84, 2014.
- [67] P. V. C. Caetano, “Influência da Geometria do Chanfro nas Propriedades Mecânicas de um Aço Estrutural ASTM A36 Soldado com o Processo MIG/MAG,” IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2015.
- [68] A. SCOTTI, “Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW,” *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 5, pp. 227-234, 2000.
- [69] V. PONOMAREV, A. SCOTTI, A. SILVINSKIY e O. AL-ERHAYEM, “Atlas of MIG/MAG welding Metal Transfer Modes (IIW Doc. XII-1771 to 1775-03. Bucharest).,” International Institute of Welding, Villepinte, France:, 2003.

- [70] D. Galeazzi, “Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser: Análise e Melhorias de Condições Operacionais para Aumento da Confiabilidade,” Dissertação de Mestrado; Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica; UFSC; , Florianópolis, 2019.
- [71] A. Handbook., “Materials Park. Vol6,” Ohio, 1993.
- [72] A. SCOTTI e R. P. REIS, “Fundamentos e Prática da Soldagem Plasma”.
- [73] W. G. ESSERS, G. JELMORINI e G. W. TICHELAAAR, “Arc Characteristics and Metal Transfer with Plasma-MIG Welding,” *Metal Construction and British Welding Journal*, pp. 439-447, December, 1972.
- [74] N. A. MAKARENKO e V. A. NEVIDOMSKY, “Thermal Cycles in Plasma-MIG Surfacing,” *The Paton Welding Journal*, pp. 43-45, 2003.
- [75] W. G. ESSERS e R. WALTER, “Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-MGA welding,” *Welding Journal*, pp. 37-42, February, 1981.
- [76] Wikipédia, “Força de Lorentz,” [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_de_Lorentz. [Acesso em Setembro 2019].
- [77] Y. HAN, J. TONG, H. HONG e Z. SUN , “The influence of hybrid arc coupling mechanism on GMAW arc in VPPA-GMAW hybrid welding of aluminum alloys,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.

