

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

PROCESSO GMAW COM CO₂ AQUECIDO

JONAS CARLOS ULLER

CURSO:

MESTRADO PROFISSIONAL EM MECATRÔNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

Sistemas Mecatrônicos

LINHA DE PESQUISA:

Desenvolvimento e Atualização Tecnológica de Máquinas Automáticas

NOME COMPLETO DO ORIENTADOR

NELSO GAUZE BONACORSO

Florianópolis - SC

JUNHO/2017

JONAS CARLOS ULLER

PROCESSO GMAW COM CO₂ AQUECIDO

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso.

Florianópolis - SC

JUNHO/2017

CDD 621.56

U41p

Uller, Jonas Carlos

Processo GMAW com CO2 aquecido [DIS] / Jonas Carlos Uller; orientação de Nelso Gauze Bonacorso – Florianópolis, 2017.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Gás aquecido. 2. Controle de temperatura. 3. Gás de proteção. I. Bonacorso, Nelso Gauze. II. Título.

JONAS CARLOS ULLER

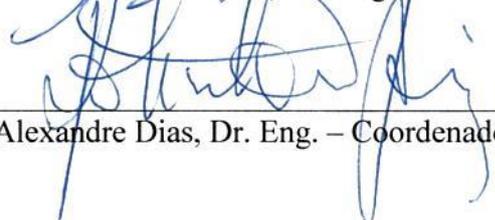
PROCESSO GMAW COM CO₂ AQUECIDO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Mecatrônica e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de junho de 2017.

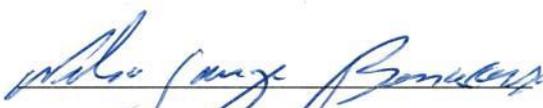


Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Orientador



Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



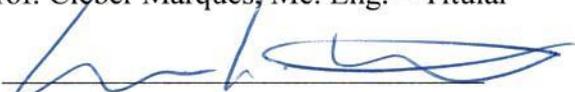
Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Presidente



Prof. Renon Steinbach Carvalho, Dr. Eng. – Titular



Prof. Cleber Marques, Me. Eng. – Titular



Prof. Erwin Werner Teinchmann, Dr. Eng. – Titular

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as alegrias, pela saúde e pela força que me concedeu, para que conseguisse chegar até aqui.

A minha esposa Charlene pelo companheirismo, paciência e apoio em todos os momentos.

A minha família pela compreensão em todos os momentos que faltei para que fosse possível a realização deste projeto.

A todos os docentes e servidores que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, obrigado pela dedicação.

Em especial à:

- Professor Nelso Gauze Bonacorso;
- Professora Cynthia B. Scheffer-Dutra
- Professor Aurélio Sabino da Costa Netto
- Professor Ivan Luiz Hubert

A empresa SUMIG e ao DAMM do IFSC pela infraestrutura cedida, sem os quais seria impossível a realização deste trabalho, ao MEC/FNDE via o Programa de Ensino Tutorial, ao Programa de Apoio ao Fortalecimento dos Grupos de Pesquisa do IFSC pelo apoio.

Aos amigos Amarildo Rogério Paiva e Davi Vitte Fagundes pelo incondicional apoio.

A todos que de uma maneira ou outra me auxiliaram na conclusão deste desafio, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A aplicabilidade do CO₂ puro no processo GMAW é reconhecida na indústria devido a sua versatilidade. Largamente difundido em soldagem de produção e de manutenção, este gás destaca-se pelas suas características peculiares. O baixo custo aliado à alta produtividade proporcionada ao processo GMAW, são de forma sintética suas vantagens fundamentais. Atualmente utiliza-se o CO₂ em temperatura ambiente, contudo, a vivência adquirida em situações industriais, demonstra que este gás quando aquecido altera a estabilidade do processo. Para investigar essa comprovação prática, foi desenvolvido um dispositivo mecatrônico interno a tocha de soldagem para controlar em malha fechada a temperatura do gás CO₂. Ensaios de soldagem sobre chapa na posição plana foram realizados em laboratório para avaliar a influência do aquecimento do gás CO₂ sobre a geometria do cordão de solda. Todas as variáveis do processo GMAW foram mantidas constantes, sendo que apenas a temperatura do CO₂ foi alterada da ambiente, 26 °C no primeiro ensaio, para 100 °C no segundo ensaio e finalizando em 200 °C no terceiro ensaio. As massas metálicas referentes aos respingos e salpicos de cada ensaio foram coletadas e mensuradas. Além do baixo valor percentual, menor que 2% da massa do arame fundido para formar o cordão de solda, houve alteração significativa entre os valores das massas referentes aos respingos e salpicos. Foram também medidos os parâmetros geométricos (largura, penetração, reforço, área fundida e área depositada) dos respectivos cordões de solda nas posições 50%, 70% e 90% de seu comprimento. Na sequência, foram calculados os valores médios dos parâmetros geométricos e da diluição. Com base nestes valores médios, pode-se analisar a influência do aquecimento do gás CO₂ no perfil do cordão de solda. Com o aumento da temperatura do gás CO₂ foram observados um incremento significativo da estabilidade do arco elétrico e um decréscimo da frequência dos curtos-circuitos na transferência metálica.

Palavras-chave: Gás de proteção; Gás aquecido; Controle de temperatura; Estabilidade do arco; Geometria do cordão de solda.

ABSTRACT

The applicability use of pure CO₂ in the GMAW process is recognized in the industry because of its versatility. Largely widespread both in production and maintenance welding, this gas stands out for its peculiar characteristics. The low cost coupled with the high productivity provided to the GMAW process, are its fundamental advantages. Currently CO₂ is used at room temperature, however, the experience acquired in industrial situations, shows that this gas, when heated, changes the stability of the process. To investigate this practical verification, a mechatronic device was developed inside the welding torch to control in closed loop the temperature of the CO₂ gas. Welding tests on plate in the flat position were carried out in the laboratory to evaluate the influence of the heating of the CO₂ gas on the geometry of the weld bead. All variables of the GMAW process were kept constant, with only the CO₂ temperature being changed from the ambient, 26 ° C in the first test, to 100 ° C in the second test and ending at 200 ° C in the third test. The metallic masses for the spatters and splashes of each test were collected and measured. In addition to the low percentage value, less than 2% of the mass of the melted wire to form the weld bead, there was a significant change between the values of the masses related to the splashes and splashes. The geometric parameters (width, penetration, reinforcement, melt area and deposited area) of the respective weld beads in the 50%, 70% and 90% of their length were also measured. Subsequently, the mean values of the geometric parameters and the dilution were calculated. Based on these average values, it is possible to analyze an influence of the heating of the CO₂ gas on the profile of the weld bead. With the increase of the temperature of the CO₂ gas and a significant increase of the stability of the electric arc and a decrease of the frequency of the short circuits in the metallic transference.

Key-words: Protective gas; Heated gas; Temperature control; arc stability; weld bead geometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração genérica do processo GMAW.....	23
Figura 2: Respingos obstruindo o bocal da tocha.	24
Figura 3: Regulador de pressão aquecido eletricamente.....	25
Figura 4: Reguladores de vazão de gás.	25
Figura 5: Tipos de aplicação do processo GMAW manual e automático.....	26
Figura 6: Características operacionais do processo GMAW.	29
Figura 7: Influência da corrente na soldagem MIG/MAG	30
Figura 8: Tipos de transferência metálica.....	31
Figura 9: Distribuição da temperatura de arco para diferentes gases de proteção:	33
Figura 10: Influência do gás na geometria do cordão	34
Figura 11: A DBCP do processo GMAW	34
Figura 12: Relação entre DBCP e corrente elétrica de soldagem.....	35
Figura 13: Energia de soldagem.....	36
Figura 14: Efeito da velocidade de soldagem no processo GMAW	36
Figura 15: Características geométricas de um cordão de solda.	36
Figura 16: Em A, a morsa de fixação e em B, o corpo de prova no interior da cuba de retenção de respingos e salpicos.	38
Figura 17: (A) Robô de soldagem FANUC, (B) Fonte de soldagem IMC e (C) Sistema aquisição de dados da soldagem IMC.	39
Figura 18: (A) Máquina de eletro erosão a fio Charmilles (B) Estereoscópio Zeiss.....	40
Figura 19: CAD do trocador de calor externo a tocha de soldagem.	41
Figura 20: Dispositivo de aquecimento do CO ₂ adaptado a tocha GMAW.....	41
Figura 21: CAD do dispositivo de aquecimento:.....	42
Figura 22: Planta de controle em malha fechada da temperatura do CO ₂	43
Figura 23: (A) O controlador de temperatura digital e (B) O gabinete eletroeletrônico de comando e controle.	43
Figura 24: Corpos de prova soldados.....	44
Figura 25: Posições de análise dos corpos de prova.	45
Figura 26: Corpos de prova: CO ₂ a 25 °C acima e CO ₂ a 200 °C abaixo.	46
Figura 27: Balança de precisão	49
Figura 28: Oscilogramas e o ciclograma para o CO ₂ a 26 °C.....	52
Figura 29: Oscilogramas e o ciclograma para o CO ₂ a 100 °C	53
Figura 30: Oscilogramas e o ciclograma para o CO ₂ a 200 °C.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço ASTM A36 em valores percentuais.	38
Tabela 2: Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais.	39
Tabela 3: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO ₂ a 25 °C.	47
Tabela 4: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO ₂ a 200 °C.	47
Tabela 5: Frequência média dos curtos-circuitos e massa dos respingos referente a cada temperatura do CO ₂	49
Tabela 6: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO ₂ a 26 °C.	50
Tabela 7: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO ₂ a 100 °C.	50
Tabela 8: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO ₂ a 200 °C.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ✓ Ad (*área depositada*)
- ✓ Af (*área fundida*)
- ✓ Ar (*argônio*)
- ✓ ASTM (*American Society for Testing and Materials*)
- ✓ AWS (*American Welding Society*)
- ✓ CO₂ (*dióxido de carbono*)
- ✓ DBCP (*distância bico de contato peça*)
- ✓ D (*diluição*)
- ✓ DIN (*Deutsches Institut für Normung*)
- ✓ GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)
- ✓ He (*hélio*)
- ✓ H₂ (*hidrogênio*)
- ✓ L (*largura*)
- ✓ MAG (*Metal Active Gas*)
- ✓ MIG (*Metal Inert Gas*)
- ✓ N₂ (*nitrogênio*)
- ✓ O₂ (*oxigênio*)
- ✓ P (*penetração*)
- ✓ R (*reforço*)
- ✓ TIG (*Tungsten Inert Gas*)
- ✓ ZTA (*zona termicamente afetada*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	24
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	26
1.3	OBJETIVOS	27
1.3.1	Objetivo Principal	27
1.3.2	Objetivos Específicos	27
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	O PROCESSO GMAW	29
2.2	PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO GMAW	30
2.2.1	Tensão Elétrica e Intensidade de Corrente	30
2.2.2	Gás de Proteção	31
2.2.3	Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	34
2.2.4	Velocidade de Soldagem	35
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS.....	38
3.2	EQUIPAMENTOS	39
3.3	SISTEMA DE AQUECIMENTO DO CO ₂	40
3.4	METODOLOGIA.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	RESULTADOS PRELIMINARES	46
4.2	RESULTADOS EFETIVOS	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos cem anos os processos de soldagem sofreram grandes modificações. Atualmente a soldagem é o método mais utilizado para o revestimento e a união permanente de metais, tendo mais de cinquenta processos diferenciados empregados na indústria. Isso é devido, em grande parte, aos avanços tecnológicos dos equipamentos envolvidos na aplicação dos procedimentos de soldagem.

Conforme QUITES (2002), os processos de soldagem que utilizam a arco elétrico como fonte de calor são os mais significativos e industrialmente reconhecidos. Entre eles, o destaque fica para o processo GMAW (Gás Metal Arc Welding) ilustrado pela Figura 1, que pode ser utilizado com arame maciço ou tubular e CO₂ puro como gás de proteção,. Este processo é largamente utilizado pelas indústrias de máquinas e equipamentos, agrícola, automotiva, naval, offshore, entre outras.



Figura 1: Configuração genérica do processo GMAW.
Fonte: Eutectic Castolin (2008)

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O CO₂ puro traz consigo algumas características que o torna muito atrativo para os segmentos industriais supracitados. O baixo custo aliado à alta produtividade proporcionada ao processo GMAW, são de forma sintética suas vantagens fundamentais, que no cenário atual, são essenciais para manter a competitividade.

Contudo, este também traz consigo algumas limitações que impedem que sua aplicabilidade seja ainda maior na indústria, tais como: a indesejável transferência globular; a instabilidade de arco; respingos e respingos, Figura 2; baixa taxa de ionização do gás, fato que impede este de produzir a transferência metálica por Spray. Além disso, a experiência prática de soldagem que absorvi em mais de doze anos no ramo metalúrgico, revela que a estabilidade do arco elétrico é reduzida quando o gás de proteção CO₂ está frio.



Figura 2: Respingos obstruindo o bocal da tocha.
Fonte: Sumig (2009)

Assim, foi procurado o conhecimento na literatura técnica-científica para explicar este fenômeno da alteração da estabilidade do arco do CO₂, e foi encontrada a patente **US1988289 A** de **RUDOLPH W. WITTEMANN** de 15/01/1934. No entanto, está se refere a um dispositivo, Figura 3, que além de reduzir e regular a pressão de CO₂ imposta pelo cilindro de gás, também aquece o dispositivo através de uma resistência elétrica.

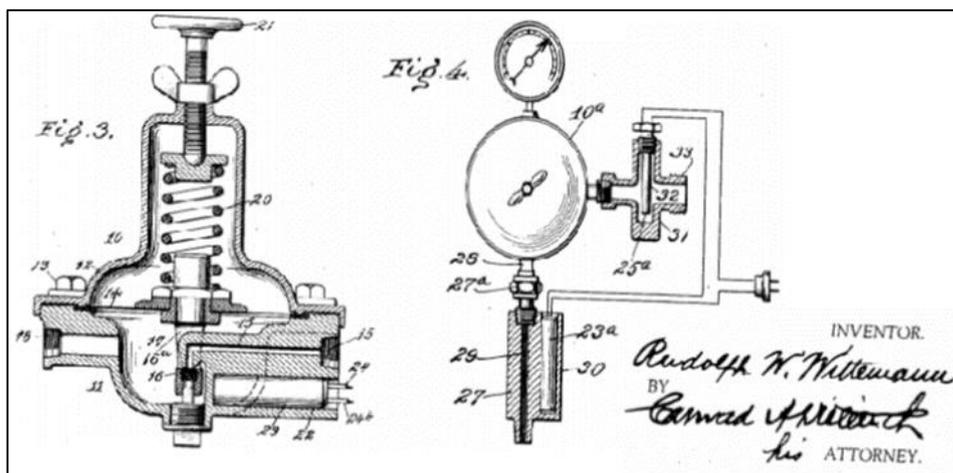


Figura 3: Regulador de pressão aquecido eletricamente.
 Fonte: Patente US1988289 A de Rudolph W. Wittemann – 15/01/1934.

A Figura 4A ilustra o conceito atual da ideia patenteada por Wittemann. Embora o referido produto desempenhe função similar ao que este trabalho propõe, o mesmo não pode ser considerado como um concorrente. Pode-se afirmar apenas que há similaridade na intenção de projeto, isto porque o produto citado relaciona-se com este trabalho apenas na intenção de aquecer o gás CO₂. O referido produto aparece como uma alternativa para evitar o congelamento do regulador de vazão, devido à expansão do CO₂, Figura 4B.



Figura 4: Reguladores de vazão de gás.
 Em (A) com aquecimento elétrico e em (B) sem aquecimento.
 Fonte: Harris Products Group.

Segundo MENEZES e FILHO (2014), a utilização do regulador de vazão com aquecimento por resistência elétrica para o argônio é uma boa alternativa para economizar gás de proteção no processo GMAW. Os resultados obtidos, tanto teóricos, quanto práticos, demonstraram tal economia. Com uma baixa potência elétrica obteve-se uma grande redução da massa específica do argônio e um grande aumento da temperatura deste gás de proteção.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O processo GMAW aplicado de forma manual ou automática, Figura 5, a aços carbono e aços baixa liga, utiliza de modo muito expressivo o CO₂ puro como gás de proteção. Além da abundância de CO₂ para comercialização e o seu baixo custo, cerca de quatro a cinco vezes menores em relação aos outros gases de proteção, os principais fatores que fazem com que este gás seja largamente empregado são: a maior fluidez da poça de fusão, o alto índice de penetração, a maior velocidade de soldagem (ambas as vantagens oriundas do processo de oxidação causado pelo CO₂) e a economia no projeto de juntas devido a sua alta penetração.



Figura 5: Tipos de aplicação do processo GMAW manual e automático.

Fonte: Fronius.

Normalmente utiliza-se o CO₂ em temperatura ambiente, contudo, a vivência adquirida em situações industriais, demonstra que este gás quando aquecido torna o processo de soldagem mais estável. A temperatura mais adequada é desconhecida e pretende-se determiná-la através de um método científico. Uma vez que tal estudo é relativamente inédito, pretende-se compreender este fenômeno a fim de extrair alguma vantagem do ponto de vista prático para o processo GMAW, como por exemplo:

- ✓ Aumentar a velocidade de soldagem;
- ✓ Maximizar a penetração do cordão de solda;
- ✓ Estabilizar a transferência metálica;
- ✓ Diminuir a ZTA (zona termicamente afetada);
- ✓ Proporcionar um melhor perfil de acabamento para o cordão de solda;
- ✓ Potencializar a utilização dos consumíveis de soldagem;
- ✓ Fomentar a sustentabilidade (uso consciente dos recursos);
- ✓ Promover maior estabilidade ao arco em baixas e altas intensidades de corrente;

- ✓ Minimizar respingos e salpicos oriundos da utilização do CO₂ puro.

E não menos importante, todos os itens supracitados impactam direta ou indiretamente no custo de operação do processo GMAW. Entre as motivações para a seleção deste tema, destacam-se o perfil inovador da proposta, a expressiva aplicabilidade na indústria, à utilização sustentável dos recursos, a parceria com a empresa Sumig e a paixão pessoal pelo objeto de estudo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Principal

Verificar a interferência do aquecimento do gás de proteção CO₂ na geometria do cordão de solda, na estabilidade do processo de soldagem e na produção de descontinuidades.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Desenvolver um dispositivo mecatrônico de baixo custo para controlar em malha fechada a temperatura do gás CO₂;
- ✓ Integrar o dispositivo de aquecimento do gás de proteção aos equipamentos de soldagem;
- ✓ Otimizar os ganhos do compensador para o controle de temperatura do gás de proteção;
- ✓ Projetar e construir os corpos de prova e a cuba para coleta dos respingos e salpicos;
- ✓ Montar a bancada de soldagem robotizada juntamente com o sistema de aquisição de dados da soldagem.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atingir os objetivos apresentados, o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo, a própria introdução do tema.

O segundo capítulo traz uma fundamentação teórica sobre o processo GMAW, contemplando suas principais características, vantagens e limitações. Ainda nesse capítulo, são também abordadas as características e peculiaridades do CO₂.

No terceiro capítulo, são descritas as características dos corpos de prova, os periféricos utilizados, a metodologia de soldagem empregada e os critérios de aceitação usados para a solda de união.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos e as respectivas discussões.

Por fim, o quinto capítulo, apresenta a conclusão desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O PROCESSO GMAW

A definição do processo de soldagem a arco elétrico GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), popularmente denominado soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), é expresso como um arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa, estabelecido pela circulação da corrente elétrica entre o metal de base e o eletrodo nu, consumível e alimentado de forma contínua (ESAB, 2005).

O calor gerado pelo arco elétrico protegido pelo gás no procedimento GMAW, Figura 6, é empregado para unir duas ou mais peças metálicas, certificando a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da junta soldada (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

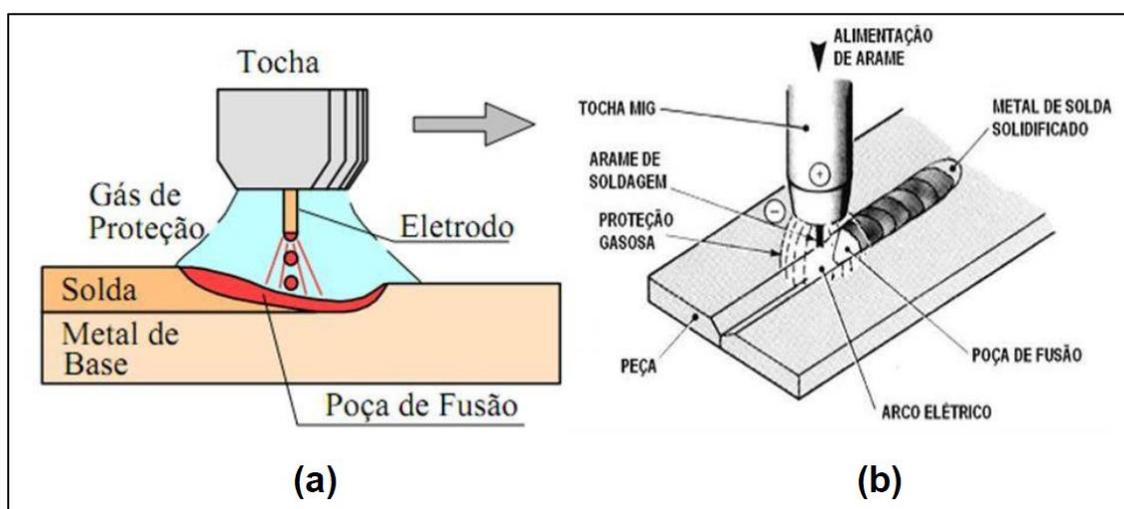


Figura 6: Características operacionais do processo GMAW.

Fonte: Em (a) Balmer (2015) em (b) Fortes (2005)

No entanto, o desempenho deste processo de soldagem está atrelado entre outros fatores, aos parâmetros do procedimento como a tensão e a corrente de soldagem, vazão de gás, distância bico de contato peça (DBCP) e de outros diversos aspectos, como a geometria da peça e as propriedades físicas dos materiais (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

2.2 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO PROCESSO GMAW

A correta regulação dos parâmetros do processo GMAW influenciará diretamente na geometria do cordão soldado. A geometria do cordão de solda deve ser considerada, tanto na manufatura de peças metálicas, quanto nos projetos, por refletir diretamente no custo de fabricação.

Dentre os parâmetros mais relevantes neste processo, faz-se necessário ressaltar os seguintes: tensão elétrica, intensidade de corrente, tipo de gás de proteção, DBCP e a velocidade de soldagem (IBRAHIM *et al.*, 2012).

2.2.1 Tensão Elétrica e Intensidade de Corrente

A tensão de soldagem influencia diretamente na energia necessária para a fusão dos materiais a serem soldados, na altura do arco, no modo de transferência de metal e na geometria do cordão. A tensão e a corrente são responsáveis pela maior parte das características desejáveis no processo de soldagem a arco elétrico (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

Em sua configuração convencional, as fontes de energia operam em modo tensão contínua, essencialmente com o arame ligado ao polo positivo. A consequente intensidade da corrente, Figura 7, tem ação sobre o consumo de eletrodo, na penetração e na largura do cordão (QUITES, 2002).

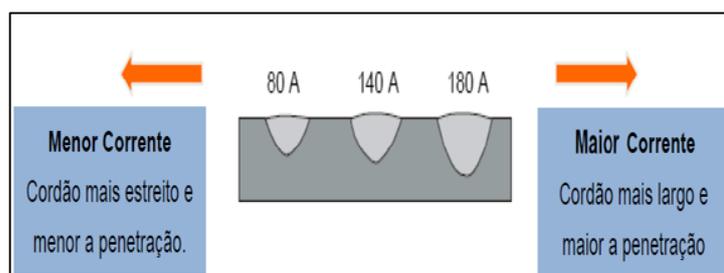


Figura 7: Influência da corrente na soldagem MIG/MAG
Fonte: Senai 2004

A intensidade da corrente elétrica, que é função da velocidade de alimentação do arame, define o modo de transferência metálica. Com o aumento da corrente elétrica de soldagem, decorrente do incremento da velocidade de alimentação do arame em uma proteção gasosa adequada, vai-se do modo de transferência por curto-circuito, passando pelo globular, até atingir o spray ou aerossol, conforme mostra a Figura 8.

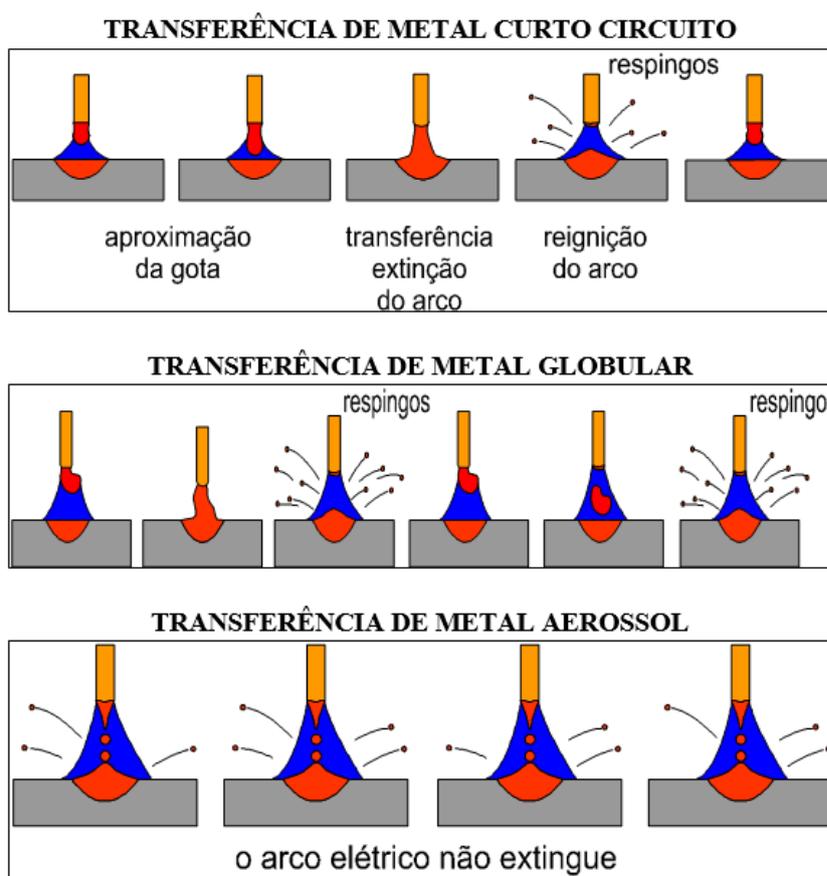


Figura 8: Tipos de transferência metálica
Fonte: Sumig (2009)

Abaixo da corrente elétrica de transição, “que é a corrente de soldagem cujo valor indica o fim de um modo de transferência de material e o início de outro modo de transferência”, tem-se a transferência de material por curto circuito e conseqüentemente maior instabilidade do arco e acima da corrente elétrica de transição tem-se a transferência metálica por spray, resultando em um cordão mais largo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Nas proximidades do valor da corrente de transição encontra-se a transferência globular, caracterizada por arcos erráticos, instabilidade e muita projeção de respingos e salpicos.

2.2.2 Gás de Proteção

Caracterizada como uma variável essencial na soldagem GMAW, a mistura gasosa ou gás de proteção, tem influência direta sob as características de geometria e penetração do cordão de solda, ionização, formação e estabilização do arco elétrico além de proteger a poça de fusão dos efeitos do ar atmosférico. A vazão do gás a ser empregada no processo GMAW é diretamente proporcional à intensidade de corrente elétrica utilizada (MOREIRA, 2008).

Com intuito de garantir essas características, três gases são frequentemente aplicados: argônio (Ar), dióxido de carbono (CO₂) e hélio (He), podendo ser aplicados puros ou em combinações entre si formando misturas binárias, ternárias e assim por diante. Contudo, pequenas quantias de oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) mostraram-se vantajosas em algumas aplicações (ESAB, 2005).

Segundo WANG *et al* (2014), uma das características que destaca o CO₂ dos outros gases é sua capacidade de transferir mais calor para a peça de trabalho, garantindo assim maior penetração. Três fatores são responsáveis por este efeito:

- ✓ A temperatura do arco plasma aumenta com o teor de CO₂;
- ✓ O CO₂ tem condutividade térmica mais elevada do que o argônio;
- ✓ A reação entre CO₂ e a poça de fusão, minimiza a função dos elétrons, levando assim, mais calor para a peça de trabalho.

Quando adicionado CO₂ ao argônio, conforme ilustra a Figura 9, o arco plasma torna-se mais concentrado e mais denso. Desta maneira, mais energia térmica é transferida do arco para a peça de trabalho.

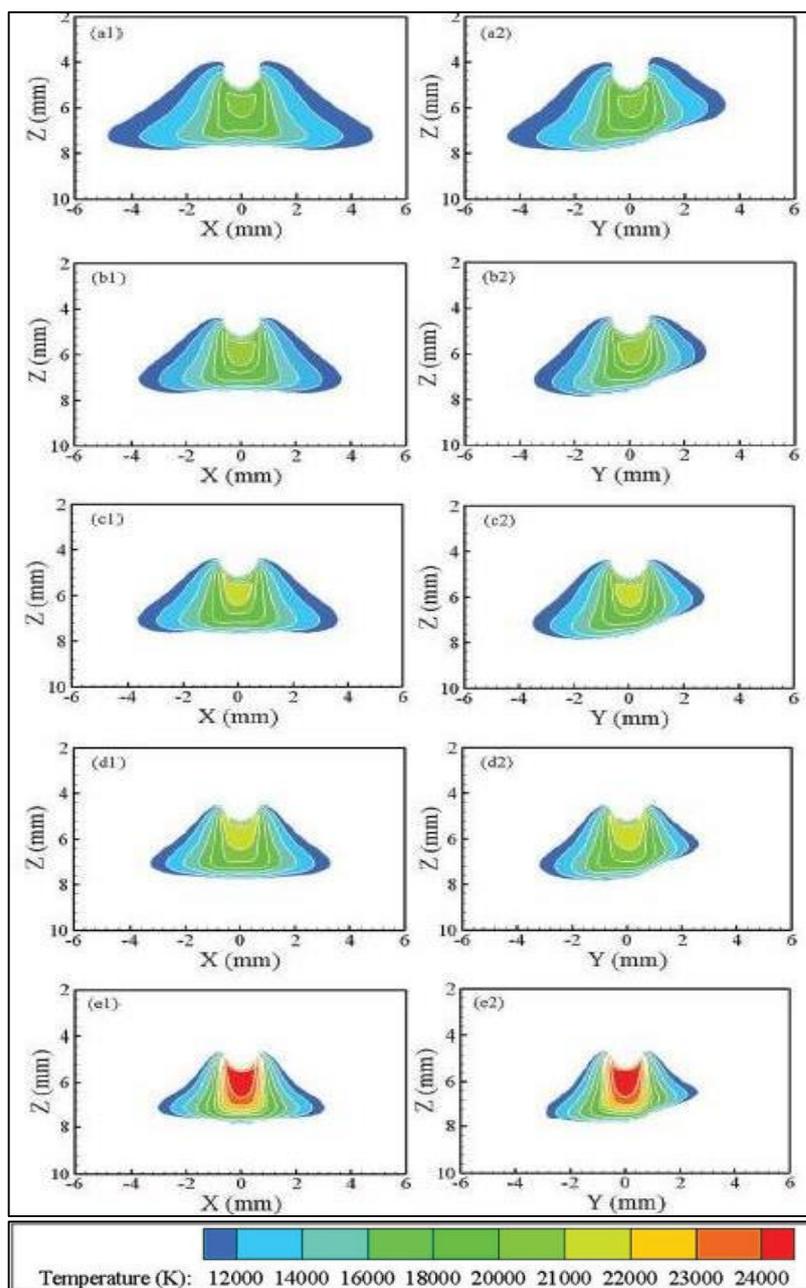


Figura 9: Distribuição da temperatura de arco para diferentes gases de proteção: (a) 100% de Ar, (b) 80% de Ar, 20% CO₂, (c) 75% de Ar, 25% de CO₂, (d) 50% de Ar, 50% de CO₂ e (e) 100% de CO₂.
Fonte: Wang *et al* (2014).

Os diferentes gases possuem distintas propriedades termo físicas. Assim, estas propriedades têm efeitos pronunciados sobre a temperatura e formato do arco. Densidade e entalpia do plasma tornam-se mais elevados, à medida que o teor de CO₂ no gás de proteção aumenta, o que leva através do efeito de ¹Pinch térmico, a uma corrente mais restrita no arco. Isso, por sua vez, proporciona um aumento da força eletromagnética e do aquecimento Ôhmico.

¹Efeito “Pinch” (força de constrição sobre o eletrodo), que é um dos fatores mais importantes que controlam a transferência de metal (Farias *et al*, 1998).

Quanto maior a força eletromagnética e o aquecimento, mais concentrado e denso o arco de plasma se torna, o que aumenta ainda mais o potencial do arco (WANG *et al*, 2014).

Embora o CO_2 seja um gás ativo e produza um efeito oxidante, soldas íntegras podem ser facilmente obtidas sem a presença de porosidade e outras descontinuidades. As principais vantagens do CO_2 são velocidades de soldagem maiores e penetração profunda, Figura 10. Os maiores inconvenientes do CO_2 são a indesejável transferência globular e, conseqüentemente, os altos níveis de respingos na solda.

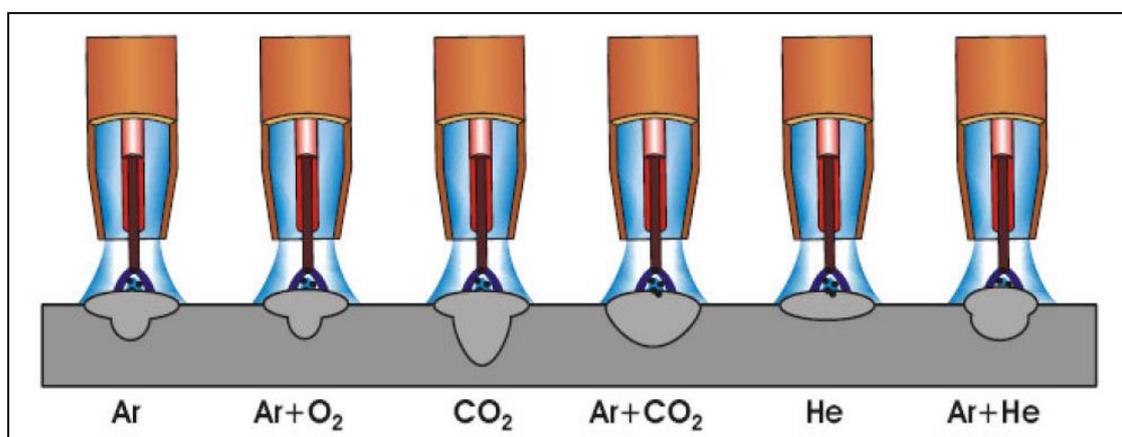


Figura 10: Influência do gás na geometria do cordão

Fonte: Senai 2004

2.2.3 Distância Bico de Contato Peça (DBCP)

Dentre as variáveis do processo GMAW, a corrente elétrica de soldagem, como mencionado anteriormente, tem influência significativa sobre o processo. No modo convencional, com comando de tensão, a intensidade desta grandeza está atrelada a DBCP, Figura 11.

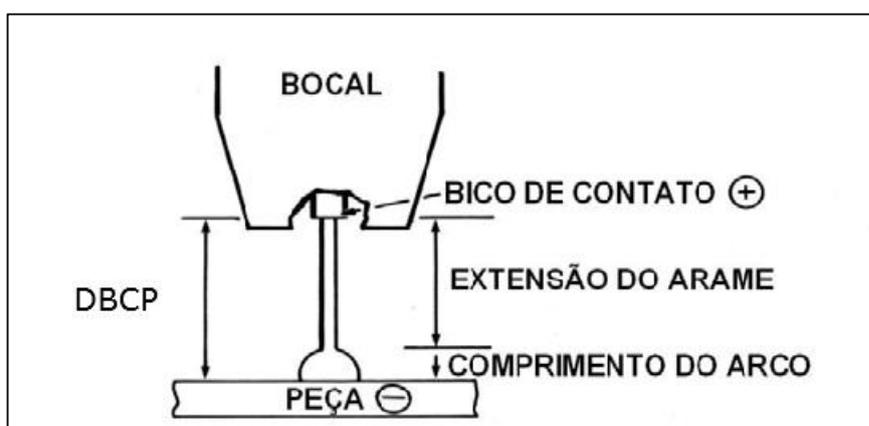


Figura 11: A DBCP do processo GMAW

Fonte: Adaptado de Esab (2005)

O gráfico da Figura 12 mostra a relação entre a DBCP e a corrente elétrica de soldagem do processo GMAW convencional (modo tensão). Portanto, na soldagem de revestimento é aconselhável utilizar maiores valores de DBCP para gerar cordões de solda com baixa intensidade de corrente com o objetivo de se obter menor penetração. Por outro lado, na soldagem de união, onde se deseja maior penetração da solda, é usado menor valor da DBCP para ter maior intensidade da corrente elétrica.

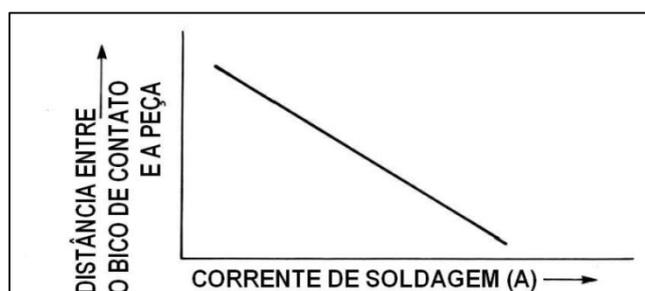


Figura 12: Relação entre DBCP e corrente elétrica de soldagem.
Fonte: Adaptado de Esab (2005)

2.2.4 Velocidade de Soldagem

Velocidade de soldagem é a razão entre o trajeto percorrido pelo arco ao longo do metal de base e o tempo gasto para percorrê-lo. Tem influência inversamente proporcional sobre a energia líquida de soldagem E_L em J/cm, conforme a equação (1). Isto implica na quantia de calor imposto (*heat input*), Figura 13, que está sendo absorvido pelo metal de base (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

$$E_L = n \cdot \frac{1}{v \cdot T} \int_0^T V(t) \cdot i(t) dt \cong n \cdot \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Na equação (1), V é a tensão eficaz de soldagem, em Volts; I é a corrente eficaz de soldagem, em Amperes; v é a velocidade de soldagem, em cm/s e η é um fator adimensional de rendimento que depende do tipo de processo (Eletrodo revestido, GMAW, TIG, etc.), dos parâmetros de soldagem (vazão de gás, tensão e corrente de soldagem e distância bico de contato peça) e de diversos outros aspectos, como a geometria da peça e as propriedades físicas dos materiais.



Figura 13: Energia de soldagem
Fonte: Sumig (2009)

Segundo Quites (2002), baixas velocidades elevam o custo da soldagem em duas ou três vezes e podem acarretar alterações metalúrgicas devido à elevada concentração calorífica. De outro modo, altas velocidades podem minimizar a penetração, largura e reforço do cordão. Também podem ocorrer mordeduras e até falta de fusão. A Figura 14 ilustra as principais alterações decorrentes da variação da velocidade de soldagem.

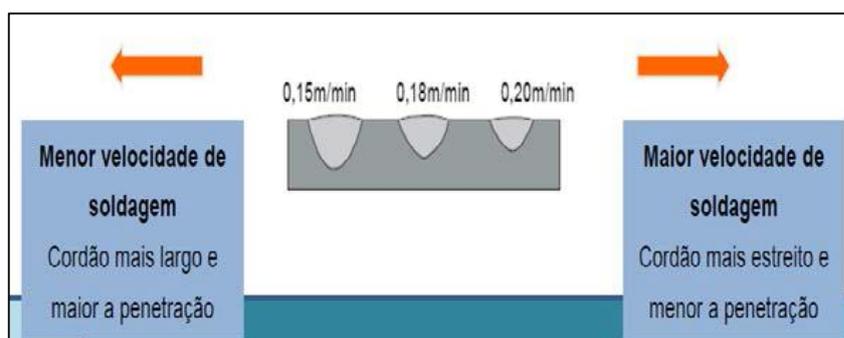


Figura 14: Efeito da velocidade de soldagem no processo GMAW
Fonte: Senai (2004)

As características geométricas (L: largura, R: reforço, P: penetração, Ad: área depositada, Af: área fundida e D: diluição) dos cordões de solda, conforme mostra a Figura 15, são influenciadas pelos parâmetros do processo GMAW, (como: a tensão, a corrente elétrica, a velocidade de soldagem, o tipo de gás de proteção, DBCP, etc.).

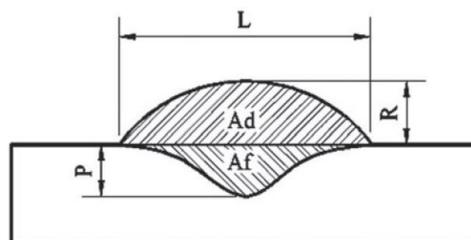


Figura 15: Características geométricas de um cordão de solda.
Fonte: Adaptado de Pessoa et al. (2009)

A diluição, em percentual, do cordão de solda no material de base, Figura 15, é determinada através da equação (2), onde: A_f é a área fundida e A_d é a área depositada. A equação se refere ao cálculo da diluição geométrica. Outras formas de medir a diluição utilizam a análise química do material de adição na região soldada, em uma varredura do ponto de maior penetração até a superfície do cordão.

$$D = \frac{100 \cdot A_f}{A_d + A_f} \quad (2)$$

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os corpos de prova foram produzidos a partir de chapas de aço A 36, conforme a norma americana ASTM, com espessura de 7,94 mm. Todos foram cortados em tamanho padrão de 100 mm por 220 mm, fresados para remover a carepa de laminação e retificados para garantir uma superfície nivelada. Na sequência, as bases dos corpos de prova foram unidas a vigas de 200x25,4x12,7 mm do mesmo aço, com único intuito de evitar empenamentos, por dois pontos de solda localizados nas extremidades do mesmo. Por último, cada corpo de prova no formato de um perfil “T” foi fixado pela viga a morsa, Figura 16A, e inserido no interior da cuba de retenção de respingos e salpicos, conforme mostra a Figura 16B.



Figura 16: Em A, a morsa de fixação e em B, o corpo de prova no interior da cuba de retenção de respingos e salpicos.
Fonte: O autor.

O aço ASTM A36 dos corpos de prova, Tabela 1, é caracterizado pela versatilidade, tendo aplicações estruturais e comuns, e sua seleção deu-se devido à larga aplicabilidade do mesmo no meio industrial.

Tabela 1: Composição química do aço ASTM A36 em valores percentuais.

C	Si	Mn	P	S	Cu
≤ 0,25	≤ 0,40	0,80 – 1,20	≤ 0,04	≤ 0,05	≥ 0,20

A fim de manter a compatibilidade química, física e metalúrgica entre corpo de prova e cordão de solda, um importante fator a se considerar é o arame eletrodo. Assim, foi selecionado o arame eletrodo AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro e composição química apresentada pela Tabela 2, como material de adição usado para soldar os corpos de prova. Este arame eletrodo de cobertura cobreada é classificado pela norma AWS A 5.18 e pela norma DIN 8559.

Ele foi selecionado pela sua indicação para a soldagem de aços de baixo carbono em todas as posições e por sua larga aplicabilidade na indústria.

Tabela 2: Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,06 - 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,50

O objetivo principal traçado por esse estudo é o de verificar a interferência do aquecimento do gás de proteção CO₂ na soldagem. Sendo assim, o gás de proteção usado foi o próprio CO₂ com a vazão ajustada em 10 l/min.

3.2 EQUIPAMENTOS

Para a realização das trajetórias de soldagem dos corpos de prova foi usado o robô antropomórfico marca FANUC modelo M10iA, Figura 17A. A tocha de solda usada foi a modelo automática sem refrigeração TBI AUT 511 com capacidade de 450A em regime contínuo.

Para a soldagem dos corpos de prova foi utilizada a fonte microprocessada de energia marca IMC modelo Digiplus A7, Figura 17B, que é do tipo multiprocesso. Um sistema portátil de aquisição de dados IMC, modelo Sap V4 (Figura 17C), foi usado para armazenar os valores das variáveis (tensão elétrica, velocidade do arame e corrente) durante a realização das soldagens dos corpos de prova.



Figura 17: (A) Robô de soldagem FANUC, (B) Fonte de soldagem IMC e (C) Sistema aquisição de dados da soldagem IMC.

Fonte: O autor.

Após a soldagem, os corpos de prova foram cortados no equipamento de eletro erosão a fio, marca Charmilles, modelo FW-1, Figura 18A. Na sequência as secções transversais das juntas foram preparadas para a obtenção das respectivas macrografias. O estereoscópico marca Zeiss modelo Stemi 2000C, Figura 18B, foi o equipamento usado nas macrografias para efetuar a captura e medição dos parâmetros geométricos da secção transversal de cada amostra.



Figura 18: (A) Máquina de eletro erosão a fio Charmilles (B) Estereoscópio Zeiss
Fonte: O autor.

3.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO DO CO₂

Para aquecer eletricamente o CO₂ foi inicialmente projetado e construído um trocador de calor em alumínio com formato cilíndrico vazado, Figura 19, conectado entre a saída do regulador de vazão de gás e a tocha de soldagem. A resistência elétrica, também em formato cilíndrico, ocupa a posição central, enquanto que o CO₂ percorre uma trajetória helicoidal pela superfície externa do trocador de calor.

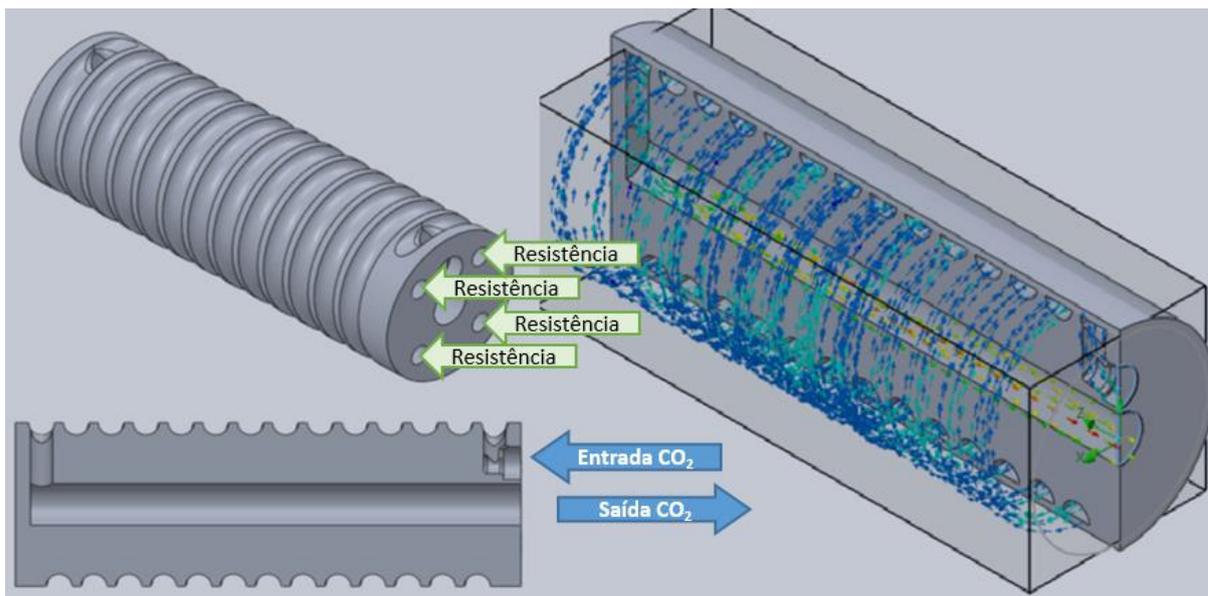


Figura 19: CAD do trocador de calor externo a tocha de soldagem.
Fonte: O autor.

Esta concepção utiliza o alumínio como material de base, mostrando-se uma boa alternativa, pois combina propriedades físicas inerentes ao projeto, como por exemplo, o alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço. A resistência elétrica do modelo cartucho é adequada e bastante versátil dentre as opções avaliadas.

Durante os ensaios, este primeiro protótipo alcançou seu objetivo que era aquecer o CO₂, a temperatura foi monitorada na saída do protótipo, onde alcançou 200^oC. Contudo, a perda de carga térmica do CO₂ até que o mesmo chegasse a tocha, onde era medida novamente por outro termopar, era alta, em média 100^oC por metro, fato que inviabilizou o conceito.

Assim, priorizou-se a elaboração de um segundo protótipo. Neste, o trocador de calor para o aquecimento do CO₂ foi adaptado na própria tocha GMAW automática, conforme mostra a Figura 20.



Figura 20: Dispositivo de aquecimento do CO₂ adaptado a tocha GMAW.
Fonte: O autor.

A segunda concepção, Figura 21, também manufaturada em alumínio, é constituída de uma resistência elétrica microtubular em formato de helicóide, customizada para este projeto, que sobrepõe outra helicóide de cobre por onde o CO₂ flui e é aquecido gradativamente. Este conceito é muito mais compacto que o anterior, fato que possibilitou o aproveitamento pleno do aquecimento do CO₂ além de aproximar mais o protótipo das tochas de soldagem comumente encontradas no mercado.

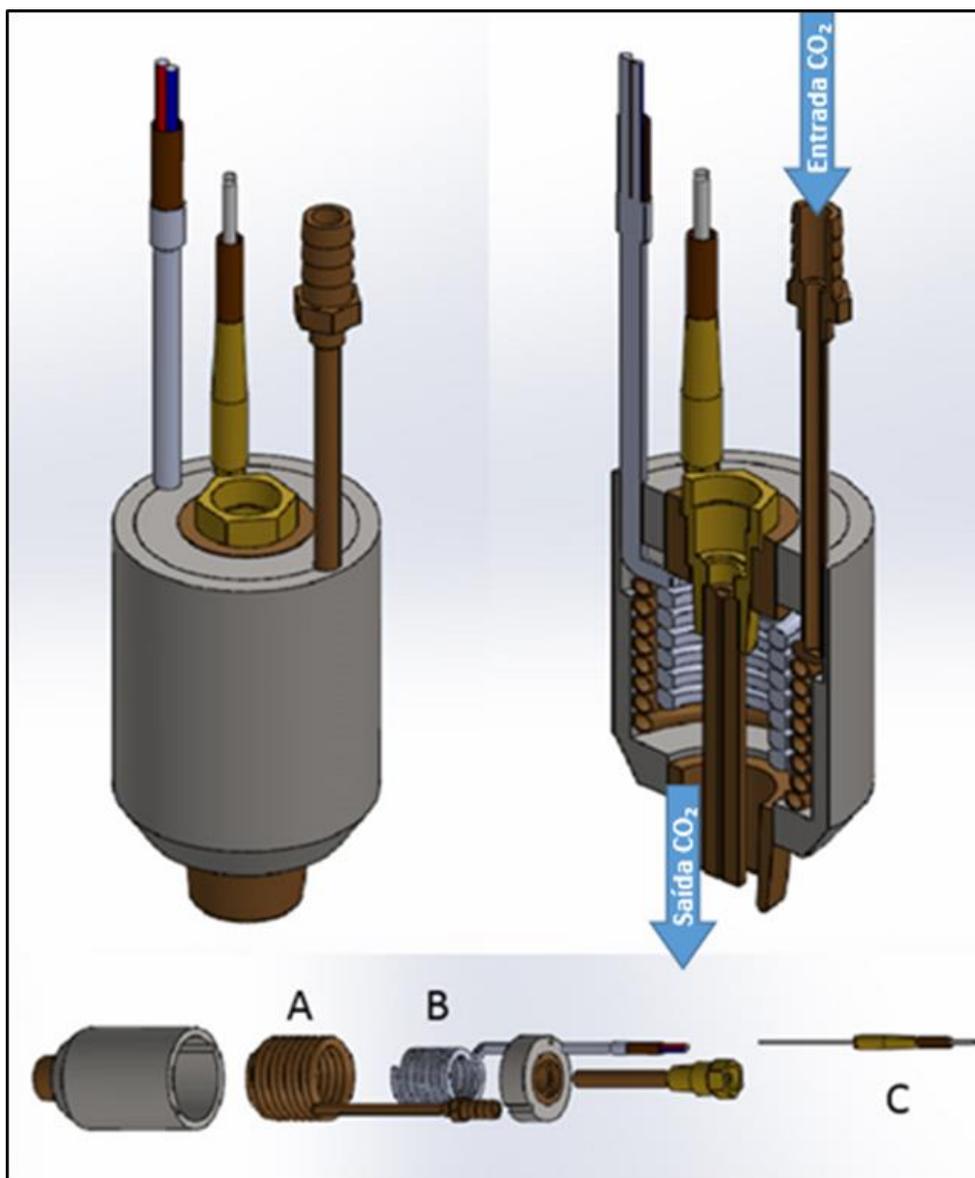


Figura 21: CAD do dispositivo de aquecimento:
(A) o helicóide do CO₂, (B) resistência elétrica e (C) o termopar
Fonte: O autor.

Para a medição da temperatura foi utilizado um termopar tipo J como sensor na saída do trocador de calor. Com essa informação fecha a malha de controle do controlador, Figura 22. Foi utilizado o controlador digital Autonics modelo TC4S-14R, Figura 23A, por tratar-se

de um sistema onde a grandeza controlada possui um comportamento lento, optou-se por um compensador do tipo *on/off* e histerese de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para o acionamento da resistência elétrica de aquecimento de 400 W de potência e tensão nominal de 220 V.

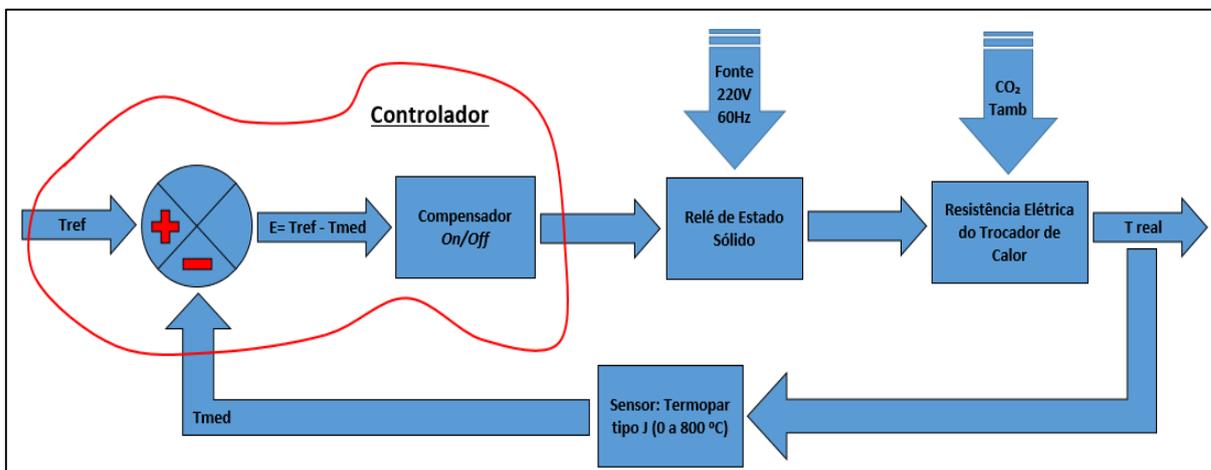


Figura 22: Planta de controle em malha fechada da temperatura do CO_2 .
Fonte: O autor.

Neste controlador o usuário insere o valor da temperatura de referência pelo teclado e monitora a temperatura real do gás CO_2 de saída via display. Neste desenvolvimento foi construído um gabinete eletroeletrônico de comando e controle, Figura 23B, contendo o controlador de temperatura, o relé de estado sólido, um botão liga/desliga, os bornes de conexão das entradas e saídas e o disjuntor de segurança.

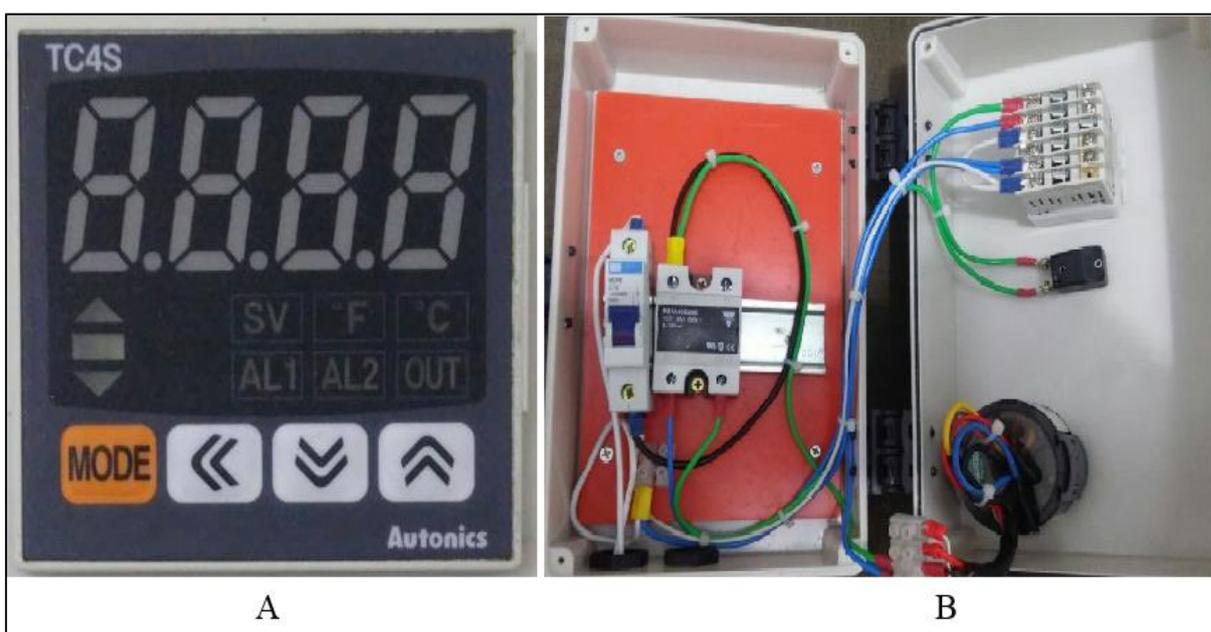


Figura 23: (A) O controlador de temperatura digital e (B) O gabinete eletroeletrônico de comando e controle.
Fonte: O autor.

3.4 METODOLOGIA

O dispositivo desenvolvido possibilitou o aquecimento controlado do CO₂ com um tempo de estabilização da temperatura em torno de 300 segundos. Na sequência pode-se realizar o procedimento de soldagem. Três corpos de prova foram produzidos, Figura 24, um primeiro com o CO₂ a temperatura ambiente, 26⁰C, um segundo a 100⁰C e um terceiro a 200⁰C, mantendo todos os outros parâmetros do procedimento constantes.

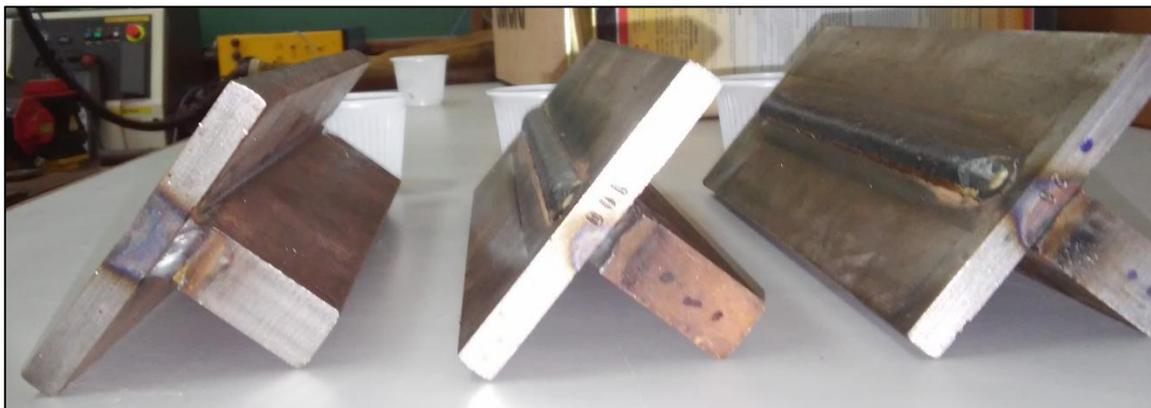


Figura 24: Corpos de prova soldados.
Fonte: O autor.

As soldagens foram realizadas com a fonte operando no modo tensão com o processo GMAW de polaridade positiva. A posição de soldagem foi a plana com trajetória do tipo linear. Os ângulos de ataque e de sentido de soldagem foram mantidos nulos, isto é, tocha perpendicular à superfície dos corpos de prova. A tensão elétrica do arco, a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame, foram as variáveis monitoradas via o Sistema de Aquisição de Dados (Sap V4) durante a execução da soldagem de cada um dos três corpos de prova.

Após a soldagem, cada corpo de prova foi cortado na máquina de eletro erosão a fio nas posições 50%, 70% e 90% do início de cada cordão de solda, Figura 25. A seguir, as respectivas macrografias devidamente preparadas, foram inseridas no estereoscópio Zeiss para efetuar a captura e medição dos parâmetros geométricos da secção transversal (L, R, P, Ad e Af), conforme a Figura 15, de cada uma das três amostras por corpo de prova.

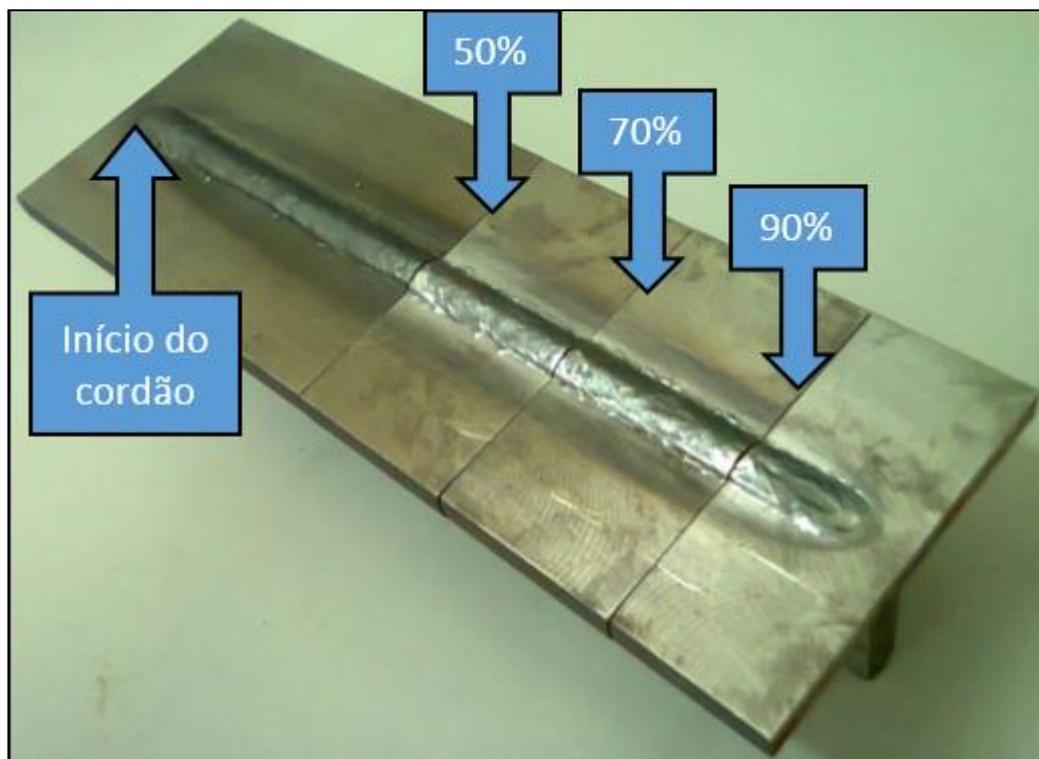


Figura 25: Posições de análise dos corpos de prova.
Fonte: O autor.

Na sequência, foi calculada a diluição em valor percentual (D) de cada amostra, conforme a Equação 2. Depois, foram calculados com três elementos o valor médio, equação 3, e o desvio padrão, equação 4, para todos os parâmetros (L , R , P , Ad , Af e D) de cada corpo de prova.

$$x_M = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$$

$$DP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_M)^2} \quad (4)$$

Por último, foi realizada a análise da influência do aquecimento do CO_2 sobre os parâmetros geométricos, baseado nos valores médios e seus respectivos desvios padrões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS PRELIMINARES

No início deste trabalho de pesquisa, foi realizado um rápido ensaio exploratório para verificar se o aquecimento do CO₂ proporcionava alteração dos parâmetros geométricos do cordão de solda. Para isso, foram extraídos de uma chapa de aço ASTM A36 dois corpos de prova de dimensões 350 x 100 x 6,35 mm. O primeiro corpo de prova foi soldado com o CO₂ na temperatura de 25°C, enquanto que o segundo foi soldado com o CO₂ na temperatura de 200°C.

Em ambos os corpos de prova, Figura 26, foi usado o arame ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm com velocidade de alimentação de 5 m/min e vazão de gás CO₂ de 10 l/min. A fonte de energia operou no modo sinérgico, como fonte de tensão de 24,7 V. Um manipulador de soldagem conduziu a tocha em velocidade de 0,35 m/min mantendo uma DBCP de 10 mm. A posição de soldagem foi plana com os ângulos de ataque e de sentido de soldagem nulos. A corrente média observada foi de 200 A em ambos os ensaios.

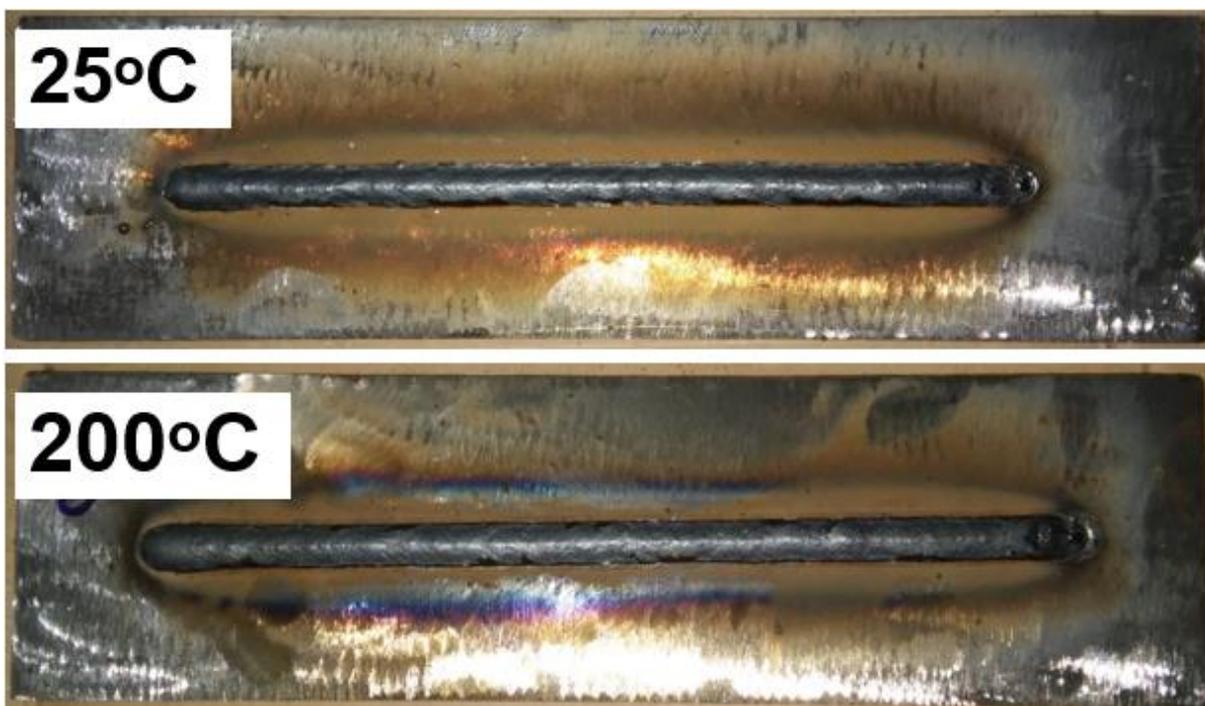


Figura 26: Corpos de prova: CO₂ a 25 °C acima e CO₂ a 200 °C abaixo.
Fonte: O autor.

Visualmente o cordão de solda feito com CO₂ a 200 °C é mais largo do que o feito com CO₂ a 25 °C. A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros geométricos e a diluição nas posições 50% e 75 % do cordão de solda realizado com o CO₂ a 25 °C, enquanto que a Tabela 4 trata dos mesmos parâmetros, porém para o cordão de solda executado com o CO₂ a 200 °C.

As últimas linhas destas tabelas apresentam os respectivos valores médios juntamente com o desvio padrão dos parâmetros geométricos e da diluição de cada cordão de solda.

Tabela 3: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO₂ a 25 °C.

Posição	MACRO	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm ²)	Ad (mm ²)	D (%)
50%		9,51	2,77	2,19	14,74	13,61	51,99
75%		9,60	2,75	2,48	15,46	15,25	50,34
V _M ±DP		9,56±0,05	2,76±0,01	2,34±0,15	15,10±0,36	14,43±0,82	51,17±0,83

Tabela 4: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO₂ a 200 °C.

Posição	MACRO	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm ²)	Ad (mm ²)	D (%)
50%		9,85	3,05	2,58	16,22	15,84	50,59
75%		10,55	3,21	2,70	17,02	17,61	49,15
V _M ±DP		10,20±0,35	3,13±0,08	2,64±0,06	16,62±0,40	16,73±0,89	49,87±0,72

Da comparação dos parâmetros geométricos obtidos nas imagens das macrografias e da diluição calculada de cada posição, 50% ou 75%, nos dois cordões de solda, pode-se afirmar que todos os parâmetros geométricos tiveram incrementos, enquanto que a diluição teve um decréscimo com o CO₂ aquecido. Essa tendência é também seguida pelos respectivos valores médios onde, a área depositada teve o maior incremento (15,9%), seguida da penetração (13,4%), do reforço (12,8%), da área fundida (10,1%) e da largura (6,7%). A diluição teve um decréscimo de apenas 2,5%.

Devido à constatação de que todos os parâmetros geométricos aumentaram em função do aquecimento do CO₂, decidiu-se realizar um ensaio de soldagem mais criterioso. O novo ensaio verificou se de fato houve alteração significativa da geometria dos cordões de solda e se ocorreram mais respingos e salpicos com o CO₂ a 25 °C do que com o CO₂ a 200 °C.

4.2 RESULTADOS EFETIVOS

Esses resultados foram obtidos aplicando a metodologia supracitada do item 3.4. Em ambos os corpos de prova, Figura 24, foi usado o arame ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm com velocidade de alimentação de 5 m/min e vazão de gás CO₂ de 10 l/min.

A fonte de energia operou no modo fonte de tensão com valor ajustado de 24,7 V, velocidade de alimentação do arame de 5 m/min e com os coeficientes de subida e descida da corrente (k_s e k_d) iguais a 60, o que corresponde uma indutância de 16,7 mH. O robô de soldagem conduziu a tocha na velocidade de 0,30 m/min mantendo uma DBCP de 15 mm. A posição de soldagem foi plana com os ângulos de ataque e de sentido de soldagem nulos.

A corrente elétrica de soldagem média, medida e indicada no display da fonte de energia, foi de 192 A para o CO₂ a 26 °C, 193 A para o CO₂ a 100 °C e 189 A para o CO₂ a 200 °C. Para formar cada cordão de solda, foram depositados de 29,5654 g de arame. As massas referentes aos respingos e salpicos foram coletadas após cada soldagem e medidas com uma balança de precisão, Figura 27. Os valores referentes a cada corpo de prova estão apresentados na Tabela 5, onde o resultado demonstra que não há diferença significativa entre as massas mensuradas e que o valor percentual dos respingos e salpicos não ultrapassou a 2% da massa total fundida pelo arco elétrico.

Os valores das primeiras colunas desta tabela indicam que o aumento da temperatura do gás CO₂ proporciona um decremento da frequência dos curtos-circuitos na transferência metálica e um incremento da estabilidade do processo GMAW decorrente da diminuição do desvio padrão referente ao período médio dos ciclos de curto-circuito.



Figura 27: Balança de precisão
Fonte: O autor

Tabela 5: Frequência média dos curtos-circuitos e massa dos respingos referente a cada temperatura do CO₂.

Temperatura do CO ₂ (°C)	Número de ciclos de curtos-circuitos	Média ± desvio padrão dos ciclos (ms)	Frequência média dos curtos-circuitos (Hz)	Massa de respingo (g)	Massa de respingo (%)
26	2085	19,8±12,1	50,51	0,3456±0,0010	1,17
100	2051	20,1±11,6	49,75	0,4135±0,0010	1,40
200	1947	21,1±11,2	47,39	0,5722±0,0010	1,94

Visualmente os três cordões de solda são idênticos. A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros geométricos e a diluição nas posições 50%, 70% e 90 % do cordão de solda realizado com o CO₂ a 26 °C. A Tabela 7 trata dos mesmos parâmetros, porém para o cordão de solda executado com o CO₂ a 100 °C. A Tabela 8 apresenta os mesmos parâmetros, porém para o cordão de solda realizado com o CO₂ a 200 °C. As últimas linhas destas tabelas apresentam os respectivos valores médios juntamente com o desvio padrão dos parâmetros geométricos e da diluição de cada cordão de solda.

Tabela 6: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO₂ a 26 °C.

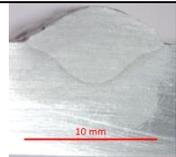
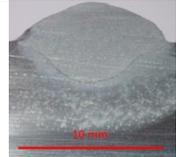
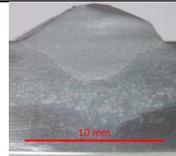
Posição	MACRO	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm ²)	Ad (mm ²)	D (%)
50%		10,72	2,97	3,00	16,47	19,55	45,72
70%		10,52	2,73	2,95	15,28	20,91	42,22
90%		10,53	2,80	2,83	16,31	18,92	46,30
$V_M \pm DP$		$10,59 \pm 0,09$	$2,83 \pm 0,10$	$2,93 \pm 0,07$	$16,02 \pm 0,53$	$19,79 \pm 0,83$	$44,75 \pm 1,80$

Tabela 7: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO₂ a 100 °C.

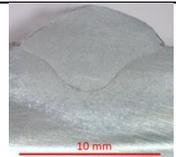
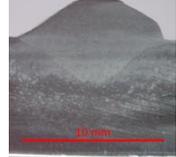
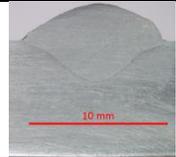
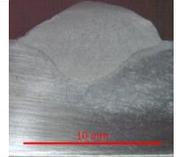
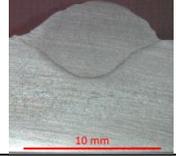
Posição	MACRO	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm ²)	Ad (mm ²)	D (%)
50%		10,50	3,12	3,04	16,19	21,02	43,51
70%		10,30	2,93	2,88	16,16	19,00	45,96
90%		10,65	3,05	3,14	17,23	20,90	45,19
$V_M \pm DP$		$10,48 \pm 0,14$	$3,03 \pm 0,08$	$3,02 \pm 0,11$	$16,53 \pm 0,50$	$20,31 \pm 0,93$	$44,87 \pm 1,02$

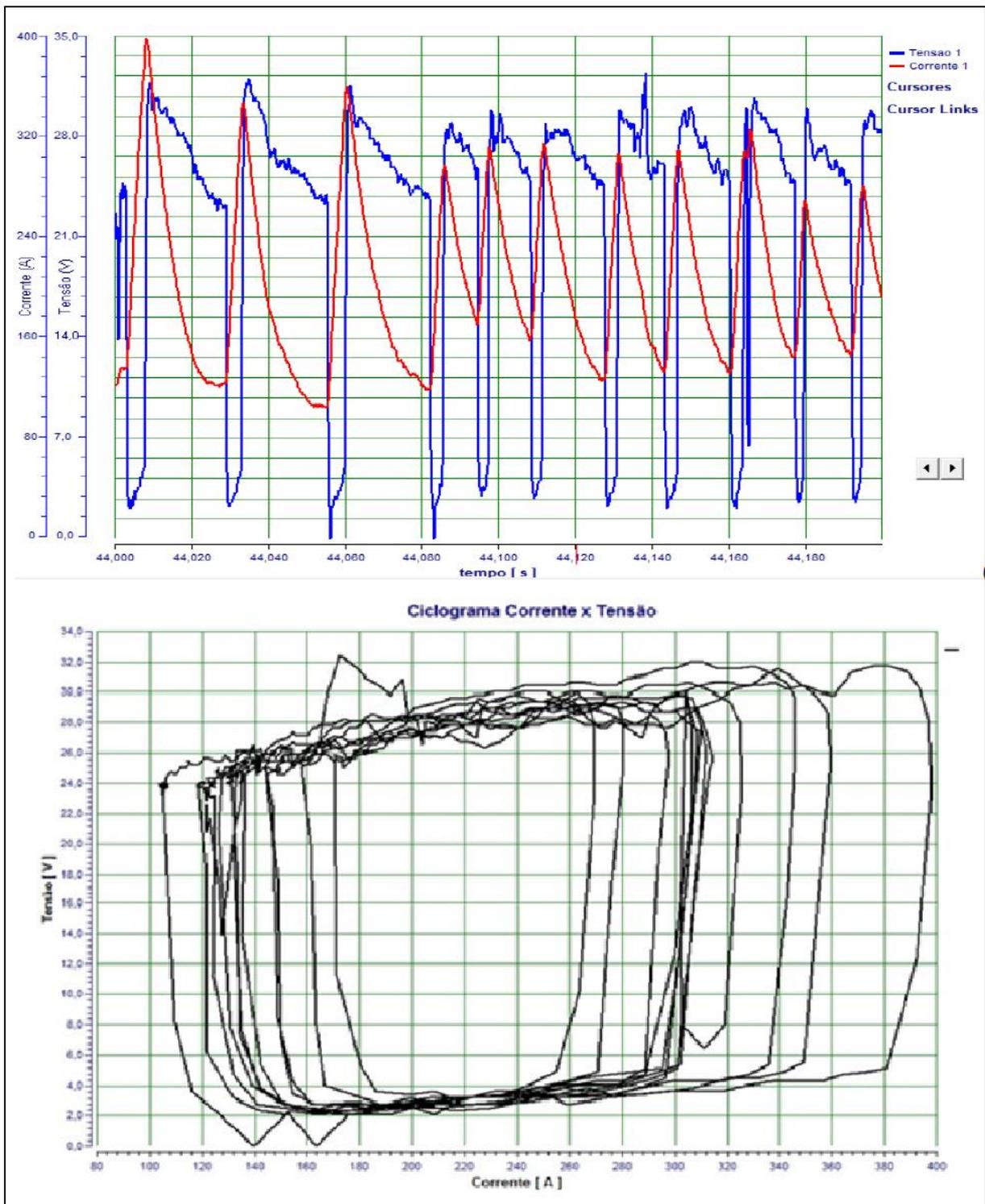
Tabela 8: Valores dos parâmetros geométricos e a diluição do cordão de solda - CO₂ a 200 °C.

Posição	MACRO	L (mm)	P (mm)	R (mm)	Af (mm ²)	Ad (mm ²)	D (%)
50%		10,54	2,86	2,84	15,25	20,08	43,16
70%		10,63	3,05	2,98	16,74	20,37	45,11
90%		10,77	2,78	2,89	15,72	19,80	44,26
$V_M \pm DP$		$10,65 \pm 0,09$	$2,90 \pm 0,11$	$2,90 \pm 0,06$	$15,90 \pm 0,62$	$20,08 \pm 0,23$	$44,18 \pm 0,80$

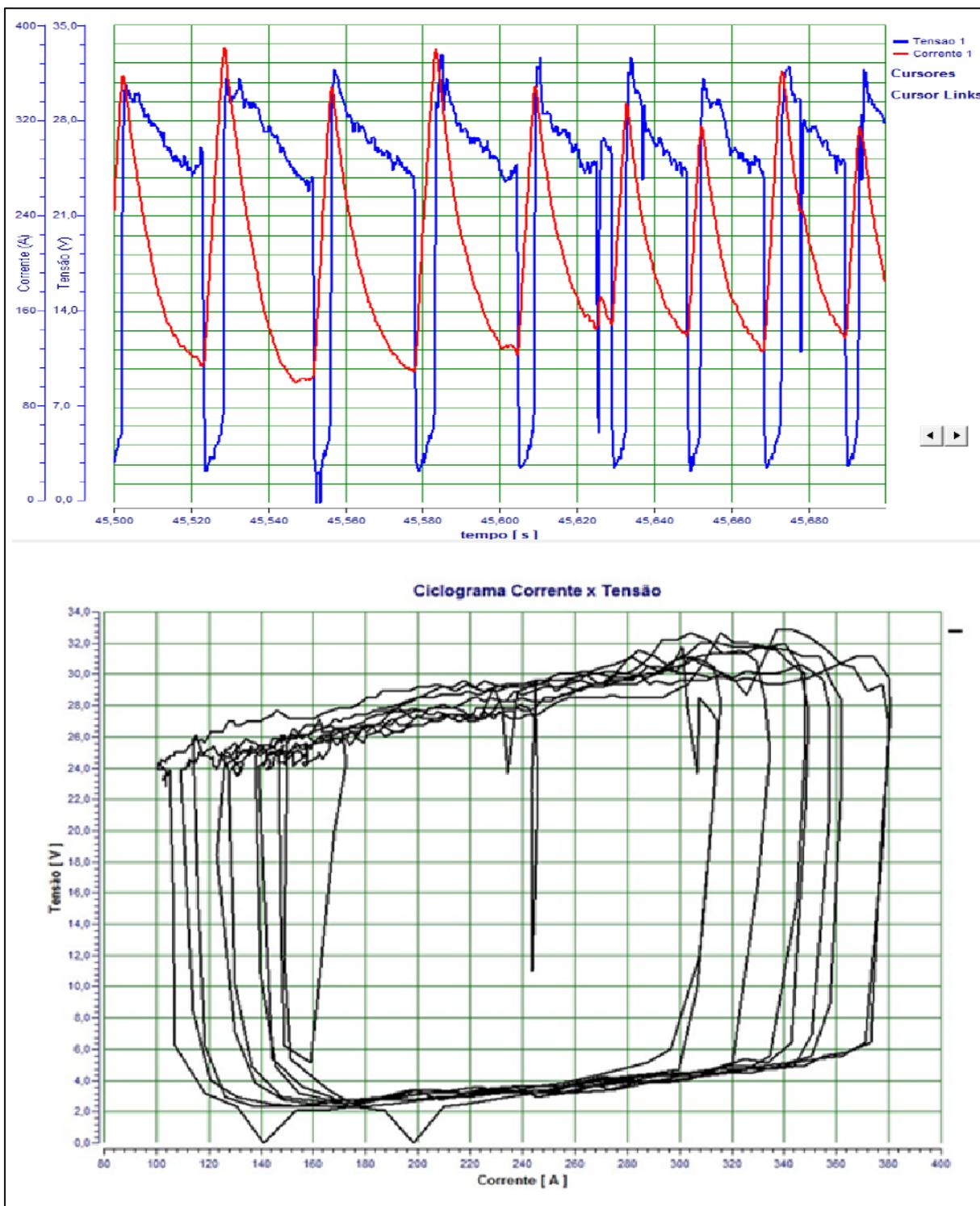
Com base nos resultados obtidos das Tabelas 6, 7 e 8 pode-se afirmar que o aquecimento do gás CO₂ não proporciona melhoria significativa no perfil do cordão de solda. O que se constatou, foi à mudança do ruído do arco elétrico na execução do cordão de solda com o CO₂ na temperatura de 200 °C. Isto significa que o aquecimento do CO₂ propicia algum fenômeno que não pode ser visualizado com os recursos utilizados.

Para entender esse fato, foram analisados os oscilogramas, tensão versus tempo e de corrente versus tempo, e também o ciclograma, tensão versus corrente, para verificar o período da transferência metálica e a estabilidade do arco elétrico nos três ensaios: CO₂ a 26 °C (Figura 28), CO₂ a 100 °C (Figura 29) e CO₂ a 200 °C (Figura 30).

O decremento da frequência dos curtos circuitos e uma maior estabilidade do arco elétrico foram as alterações observadas com o aumento da temperatura do CO₂. O ciclograma corresponde ao mesmo intervalo de tempo dos oscilogramas de tensão e de corrente de soldagem. A comparação pelo ciclograma geralmente é feita com base em um mesmo intervalo de tempo, número de eventos de transferência ou ciclos.

Figura 28: Oscilogramas e o ciclograma para o CO₂ a 26 °C.

Fonte: O autor.

Figura 29: Oscilogramas e o ciclograma para o CO₂ a 100 °C.

Fonte: O autor.

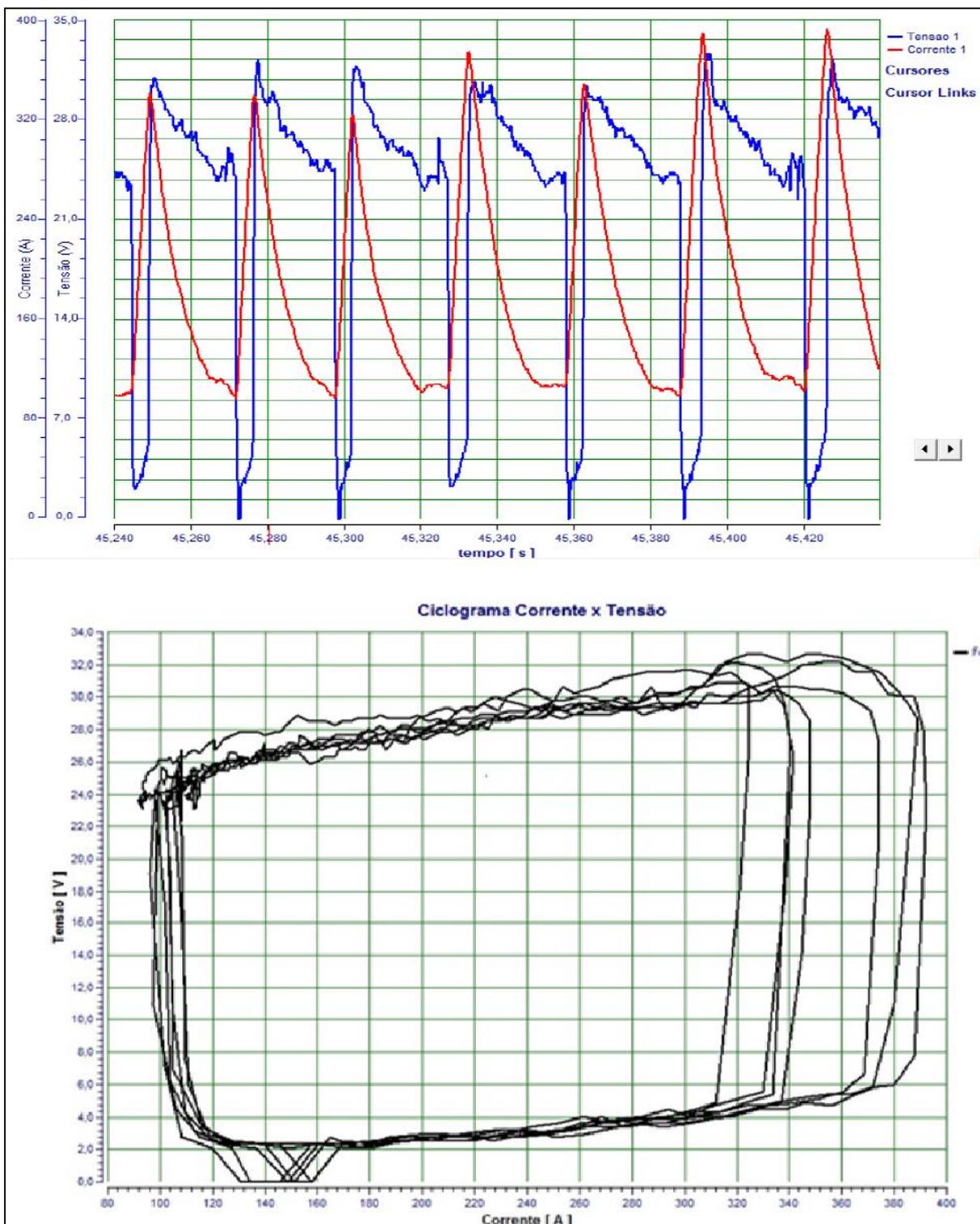


Figura 30: Oscilogramas e o ciclograma para o CO_2 a $200\text{ }^\circ\text{C}$.
Fonte: O autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise das macrografias, pode-se afirmar que o aquecimento do gás CO₂ não proporciona melhora significativa no perfil do cordão de solda. Contudo, não foi detectada nenhuma limitação ou desvantagens em fazê-lo, ou seja, o fato de aquecer o gás CO₂ de proteção não gerou defeitos ou descontinuidades ao cordão de solda.

Baseado nos dados adquiridos da tensão e da corrente de soldagem pelo sistema de aquisição de dados é possível afirmar que a quantidade dos curtos-circuitos decrementou significativamente com o aumento da temperatura do CO₂. Além disso, o desvio padrão referente à média da duração dos ciclos de curto-circuito também diminuiu proporcionando um incremento na estabilidade do processo com uma transferência metálica mais homogênea. Esse fenômeno é comprovado, quando analisamos os oscilogramas e ciclogramas supracitados.

Como a velocidade de alimentação do arame e o tempo de execução de cada cordão de solda foram constantes em todos os experimentos de soldagem, é possível afirmar que o tamanho da gota transferida para a poça de fusão incrementou em função do aumento da temperatura do CO₂.

Por se usar o específico programa sinérgico da fonte de solda para o gás de proteção e os materiais usados, a quantidade de respingos foi mínima, inferior a 2% da massa total do arame fundido. Entretanto, foi observado um incremento da massa de respingo devido ao aumento da temperatura do CO₂. Isso pode ser explicado em função do tamanho do respingo ser proporcional ao tamanho da gota transferida, que ao se projetar em direção a poça de fusão, causa impacto proporcional ao seu tamanho, gerando perturbação e projeção de material.

Com a melhora na estabilidade do arco, pode-se aumentar a velocidade de soldagem na mesma proporção que a velocidade do arame para o incremento da produção. No entanto, é importante ressaltar que o aumento da velocidade de solda contribui para o aumento da convexidade dos cordões. Cordões com convexidade maior tendem a diminuir o ângulo entre a base da solda e o cordão, o que pode acarretar no aumento das tensões residuais e diminuir a resistência das soldas.

Para confirmação dos resultados apresentados nos ensaios instrumentados, o uso de um sistema de aquisição de dados da tensão elétrica, da corrente de soldagem e da velocidade de alimentação do arame, foi fundamental para analisar a estabilidade do arco elétrico.

A integração do dispositivo de aquecimento na tocha mostrou-se eficaz para o aquecimento do CO₂ em procedimentos de soldagem. Além disso, o referido dispositivo foi manufaturado

com itens comuns de mercado e de fácil aquisição, tornando-o uma solução de baixo custo para o aquecimento do CO₂.

REFERÊNCIAS

AWS - American Welding Society. **Welding Handbook - Welding Science and Technology**. 9. ed. [S.l.]: AWS, v. 1, 2001.

BALMER. **Apostila de Treinamento MIG/MAG (GMAW)**. Ijuí, p. 14. 2015.

DAVID GAILEY. The Harris Products Group. **Congelamento de CO₂: Por que acontece, o que pode ser feito** - Disponível em: <<http://br.harrisproductsgroup.com/pt/Expert-Advice/Articles/CO2-Freeze-Up.aspx>>. Acesso em: 06 ago. 2015.

EUTECTIC CASTOLIN. **Catálogo de Sólidos**. ESAB. São Paulo, p. 32. 2008.

FARIAS, J.P.; SCOTTI, A.; FERRARESI, V., (1998), “**Fontes Eletrônicas para Soldagem com Eletrodos Revestidos: Avaliação do controle da Corrente de Curto**”. XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino Americano e V Ibero-Americano de Soldagem, Fortaleza, setembro, 11pp.

FORTES, C. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. ESAB. São Paulo. 2005.

FRONIUS. **Máquinas e equipamentos**. Disponível em: <<http://www.fronius.com/>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

HARRIS. **Catalogs**. Disponível em: <<http://www.harrisproductsgroup.com/en/Contact-s/Brazil.aspx>>. Acesso em: 06 ago. 2015.

HALMSHAW, R. **Non Destructive Testing**. 2. ed. [S.l.]: Edward Arnold, 1991.

IBRAHIM, I. A. et al. The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters. **Procedia Engineering**, Selangor, 2012. 4.

INTERNATIONAL STANDARD - Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys — Quality levels for imperfections - *EN ISO 5817:2007*.

MARQUES, P. V.; MODENESI, J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MENEZES, A.; FILHO, E.P.B. **Redução do consumo de gás de soldagem através do aquecimento do gás na saída do regulador de vazão por resistência elétrica**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, 8^o, Uberlândia/MG: Brasil, 2014.

MODENESI, P. J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. UFMG. Belo Horizonte, p. 37. 2009.

MOREIRA, H. S. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG e da Morfologia do Cordão no Comportamento à Fadiga de Juntas**. São Paulo: [s.n.], 2008.

PESSOA, Antonio Rodolfo Paulino et al. **Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG**. In: CONSOLDA, 35. 2009, Piracicaba. São Paulo.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. 1. ed. [S.l.]: SOLDASOFT, 2002.

SANTOS, J. F. O. **Ensaaios não Destrutivos**. Instituto do Emprego e Formação Profissional. Lisboa, p. 154. 1999.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. 1. ed. [S.l.]: Artliber, 2008.

SOLDAGEM MIG/MAG. ESAB. Rio de Janeiro, p. 133. 2005.

SOLDAGEM TIG. SENAI. Varginha, p. 29. 2004.

SOUZA, S. A. D. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**. 5 edição. ed. são paulo: edgar blucher, 1982.

SUMIG. **Manual de instruções SIGMA 500**. SUMIG. Caxias do Sul, p. 16. 2009.

UNITED STATES PATENT OFFICE (Us). Rudolph W Wittemann. **Nonfrosting pressure reducing regulator**. US nº US1988289 A, 15 jan. 1934, 15 jan. 1935.

WANG, L. L. et al. Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels. **Journal of Physics D: Applied Physics**. Shanghai, p. 47-61. Set. 2014