

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Efeitos da Mudança de Parâmetros na Soldagem MAG CCC

por

Fernando Golob

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho 2013

Efeitos da Mudança de Parâmetros na Soldagem MAG CCC
por

Fernando Golob

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Cintia C. Petri Mazzaferro

Prof. Ivan Guerra Machado

Porto Alegre, 21 Junho 2013.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por disponibilizar o laboratório de soldagem e técnicas conexas (LS&TC), situado no Centro de Tecnologia do Campus do Vale da UFRGS, para realização da parte experimental deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, pela orientação para a realização do trabalho.

Aos mestrandos e doutorandos do LS&TC, pelo auxílio na realização dos experimentos.

GOLOB, F. (ex.: F. B.) **Efeitos da Mudança de Parâmetros na Soldagem MAG CCC**. 2013. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A soldagem por *Metal Active Gas* Curto-Circuito Controlado (MAG-CCC) é um processo de soldagem relativamente novo que está sendo estudado para substituir outros processos de soldagem em chapas finas, como por exemplo, numa tubulação antiga de petróleo, com o objetivo de obter uma soldagem com maior velocidade e menor energia de soldagem. Este trabalho propõe um estudo dos parâmetros de soldagem e seus efeitos no cordão de solda do passe de raiz em junta sobreposta e posição 2F. Para sua realização, foram feitas experimentações variando uma série de parâmetros (Distância Bico de Contato Peça, Ângulo de Trabalho, Ângulo de Deslocamento, Frequência de Oscilação, Velocidade de Soldagem). Todos os dados dos parâmetros foram obtidos por sistemas de aquisição de dados computacionais e seus resultados analisados para a determinação de um conjunto otimizado de parâmetros. Foi notada uma grande diferença na diluição do material com a mudança dos parâmetros, principalmente com o ângulo de deslocamento que, para a velocidade de soldagem de 7,0 mm/s e a maior corrente na soldagem ($R = +1$), apresentou maior penetração com ângulo negativo do que com ângulo positivo, ao contrário do que indica a literatura. O processo MAG Curto-Circuito Controlado mostrou-se inadequado para realizar o passe de raiz em juntas sobrepostas na posição 2F, visto que as penetrações obtidas foram nulas.

PALAVRAS-CHAVE: MAG CCC, parâmetros de soldagem, passe de raiz, penetração.

Golob, F. (ex.: F. B.) **Effects of Parameters Variation on MAG CSC Welding**. 2013. 24f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The Metal Active Gas controlled short circuit (MAG-CSC) welding, is a new procedure on research to substitute other methods of welding in thin plates, for example, the pipelines of petrol transportation, with the objective of executing a welding with higher speed and lower welding energy. This work proposes a study on the welding parameters and their effects on the weld. For the realization of the work, a series of experiments, changing the parameters, was performed. All data was stored and analyzed on a digital system to get an optimized parameters group. One of the prime results is the penetration of the welding. All results are detailed in the paperwork.

KEYWORDS: MAG CSC, welding parameters, penetration.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 O Processo MAG.....	1
3.2 MAG Curto-Circuito Convencional.....	2
3.3 MAG Curto-Circuito Controlado.....	3
3.4 Parâmetros do Processo MAG.....	4
4. EQUIPAMENTO E MATERIAL.....	5
5. METODOLOGIA.....	6
6. RESULTADOS	7
6.1 Análise de Variância.....	8
6.2 Análise da Diluição do Cordão de Solda (D%).....	9
6.3 Análise da Área Fundida do Metal Base do Cordão de Solda (AFMB mm ²).....	10
6.4 Análise da Área A4 e Penetração (A4-mm ² e P-mm)	12
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	13
8. CONCLUSÕES	14
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE I – ENERGIA DE SOLDAGEM	16
APÊNDICE II – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DAS RESPOSTAS AVALIADAS	17

1. INTRODUÇÃO

A questão da manutenção das tubulações existe desde os primórdios da extração e transporte do petróleo. Um dos procedimentos mais delicados é a aplicação de placas de reforço na tubulação existente, já desgastada pelo tempo, levando sua espessura a tornar-se muito fina.

Para a aplicação das placas de reforço à tubulação existente, é utilizado processo de soldagem. Devido à pequena espessura da tubulação existente, utilizam-se processos com baixa penetração, para que não se fure a chapa já desgastada, utilizando-se eletrodo revestido (ER) ou *Tungsten Inert Gas* (TIG), com parâmetros que garantam a baixa penetração para a realização do passe de raiz.

Porém esses procedimentos apresentam grande geração de salpicos e alta energia de soldagem (utilizando ER) e baixa taxa de deposição e velocidade de soldagem (utilizando TIG).

Por esse motivo, pesquisa-se um novo procedimento, utilizando MAG curto-circuito controlado (MAG CCC). Estudos indicam que, com o controle do curto-circuito, é possível obter-se uma alta velocidade de soldagem, com baixa energia, tornando o método ideal para ser aplicado na manutenção das tubulações.

Este trabalho visa determinar a relação entre os parâmetros de soldagem e a qualidade da solda, procurando estudar os efeitos da variação dos parâmetros sobre o cordão de solda, buscando determinar um conjunto de parâmetros que melhor se adequaria ao processo.

Para a realização deste trabalho, a soldagem, o corte das amostras, o lixamento e o polimento, a preparação química e a análise macrográfica das amostras foram realizadas no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC), situado no Centro Tecnológico do Campus do Vale da UFRGS.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Analisar a diluição, área fundida do metal de solda e a penetração do cordão de solda realizado na posição horizontal em filete (2F), mediante variações da relação distância bico de contato-peça, ângulos de trabalho e deslocamento da tocha, e frequência de oscilação da tocha durante a soldagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Processo MAG

A soldagem MAG (*Metal Active Gás*) é um processo de soldagem que utiliza um eletrodo nu, continuamente alimentado. Pelo fato do eletrodo ser nu, é necessária a utilização de gás de proteção durante a realização do cordão de solda. Esse gás de proteção tem como principal função proteger o eletrodo e a poça de fusão do ar atmosférico prevenindo, assim, a formação de bolhas no cordão de solda e inclusões indesejadas. O gás não deve ter uma vazão muito baixa, pois, assim, não conseguirá proteger toda a região da poça de fusão; também não pode ter vazão muito elevada, pois isso gerará turbulência no gás, misturando-o com o ar ambiente. Outro efeito importante que o gás de proteção traz é o de reagir com o arco elétrico; os elétrons livres do arco se chocam com as moléculas do gás gerando íons que ajudam na manutenção do arco.

Um terceiro efeito que o gás de proteção exerce é o de oxidar a superfície do metal base, facilitando a realização do efeito catódico próximo à região da solda (o arco não precisa “procurar” zonas oxidadas mais afastadas), ajudando na estabilização do arco e, por consequência, na qualidade do cordão de solda. Esse efeito se faz necessário em metais não reativos (como aços), porém é prejudicial para metais reativos (como alumínio), causando um

excesso de oxidação. Sendo assim, para esses materiais, é necessária a utilização de um gás inerte.

Para a realização da soldagem MAG é necessária uma tocha, na qual entram: o cabo de controle, a entrada do gás de proteção, o arame (através de um conduíte), e a energia elétrica. A tocha possui um gatilho para liberação da energia e alimentação do arame, e, em sua ponta, ficam o bico de contato e um bocal.

A tocha fica ligada ao sistema de alimentação de arame, ao reservatório de gás e ao controle de alimentação que, por sua vez, fica ligado à fonte de energia.

Existem quatro principais modos de transferência metálica [Scotti, 2008 e Brandi, 1992].

- Curto-Circuito (baixa corrente de soldagem e baixa tensão do arco elétrico)
- Globular (baixa corrente de soldagem e moderada a alta tensão do arco elétrico)
- Goticular (alta corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico)
- Goticular com alongamento (alta corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico)
- Goticular rotacional (altíssima corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico)

3.2 MAG Curto-Circuito Convencional

O MAG curto-circuito (Figura 3.1), é o processo em que a gota formada na ponta do eletrodo encosta na poça de fusão antes de se destacar. Esse tipo de transferência ocorre de preferência com tensões baixas (fazendo com que o comprimento do arco seja curto o suficiente para que, na transferência, a gota encoste a poça de fusão antes de se destacar), e correntes baixas (fazendo com que as forças eletromagnéticas sejam baixas o suficiente para permitir formação de gotas com grande diâmetro crítico).

O fato da velocidade de alimentação do arame ser maior que a taxa de fusão do eletrodo propicia que o arame encoste na poça de fusão. Ao encostar, o grande aumento da corrente, causado pela abrupta diminuição da resistência elétrica, faz com que ocorra um grande aumento das forças eletromagnéticas, favorecendo, assim, o destacamento da gota. No momento seguinte ao destacamento da gota, a corrente no eletrodo ainda se encontra muito elevada, fazendo com que a taxa de fusão do eletrodo seja muito maior que a velocidade de alimentação do arame, aumentando a distância entre a ponta do arame e a poça de fusão, causando a reabertura do arco e, com o aumento de seu comprimento, ocasionando a diminuição da corrente até um valor no qual ela passe novamente a ser baixa o suficiente para que a taxa de fusão seja menor que a velocidade de alimentação. É preciso cuidar para que a corrente, ao fim do curto-circuito, não seja muito elevada, evitando que a taxa de fusão do eletrodo seja tão alta a ponto de ocorrer destacamento da gota antes do próximo curto.

A principal força que atua durante a transferência por curto-circuito, enquanto o arco está aberto, é a de tensão superficial. No instante em que a gota encosta na poça de fusão, a força eletromagnética, por efeito pinch, começa a atuar; a força radial tende a comprimir a área de contato entre as duas, enquanto a força axial tende a separar a gota da poça. Porém, com o aumento da corrente durante o curto, e a formação de um pescoço entre o eletrodo e a gota devido à tensão superficial, uma força eletromagnética de alta intensidade favorece o destacamento da gota por efeito pinch, que possui mais intensidade que a força repulsiva anterior.

A soldagem por curto-circuito é um processo com baixa energia de soldagem, devido ao apagamento do arco durante parte do tempo e às baixas correntes e tensões, o que torna ideal seu uso em chapas finas e fora da posição vertical. A pequena poça de fusão e o arco curto tornam o processo bastante controlável, não se recomendando seu uso para chapas grossas, pelo fato de que pode ocorrer falta de fusão e mordedura. O processo também não é recomendado para soldagem de alumínio, pois a alta taxa de transferência de calor do alumínio acaba solidificando a poça de fusão muito rapidamente, podendo aprisionar gases dentro de seu interior e dificultando a fusão do metal base.

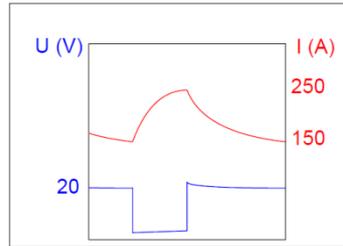


Figura 3.1 – Oscilogramas (corrente de soldagem e tensão do arco elétrico) típicos de MAG por curto circuito convencional

3.3 MAG Curto-Circuito Controlado

No processo MIG/MAG curto-circuito controlado (CCC) [IMC SOLDAGEM, 2009], a transferência do metal ocorre por curto-circuito, tendo como característica principal o controle de corrente, tanto durante o curto-circuito, quanto durante o arco. De uma maneira geral, no CCC busca-se criar as condições para que o contato entre a gota metálica e a poça de fusão ocorra em baixo nível de corrente, no momento em que a ponte metálica formada entre a ponta do arame e a poça de fusão for se romper. Na Figura 3.2 é apresentada a forma de onda para o CCC, onde estão representados os períodos de curto-circuito e de reabertura de arco.

No início do curto-circuito [IMC SOLDAGEM, 2009], a corrente será reduzida para I_{c1} durante o tempo t_{c1} , para assentamento da gota. Em seguida, a corrente irá para o valor I_{c3} e subirá a uma taxa definida por di_3 , até que o sistema de controle detecte a iminência de reabertura de arco, momento em que a corrente será reduzida para I_{c2} . A corrente permanecerá em I_{c2} durante t_{c2} . Após a reabertura do arco, a fonte irá aplicar a corrente I_{a1} durante o tempo t_{a1} , descendo em rampa até I_{a2} , durante o intervalo t_{r1} . Em seguida, a corrente permanece em I_{a2} durante o período t_{a2} . Finalmente, a corrente irá decrescer em rampa até o valor I_{a3} , durante o intervalo t_{r2} , permanecendo nesse valor até que um novo curto ocorra.

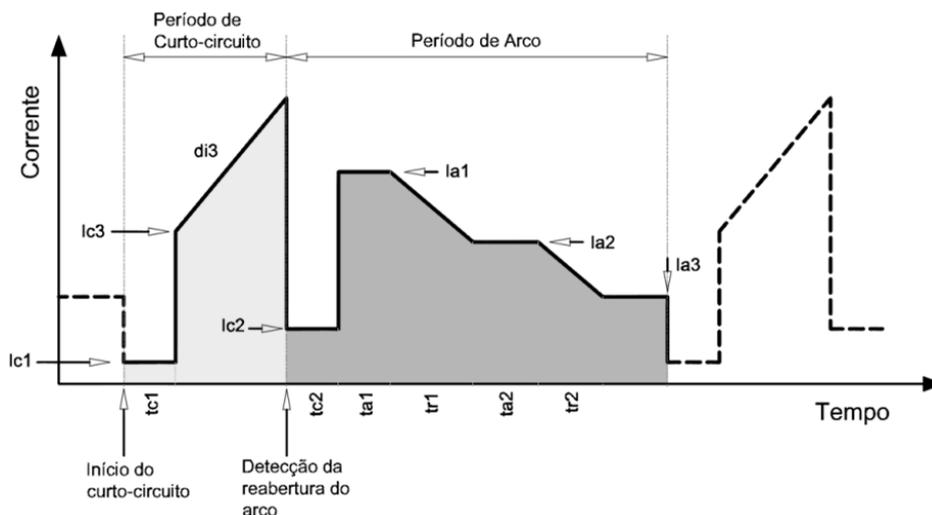


Figura 3.2. Forma de onda para a corrente de soldagem no processo CCCI IMC Soldagem

A corrente deve ser baixa no início do curto-circuito para prevenir as forças que tendem a repelir a gota da poça de fusão antes de haver uma boa molhabilidade entre elas. Sendo essas forças de origem eletromagnética, a corrente mais baixa diminui seu efeito.

A corrente durante o curto deve ser elevada para que, durante o empescoçamento da região de contato entre a gota e o arame, atuem forças eletromagnéticas que facilitarão o destacamento da gota (efeito pinch).

Um pouco antes do destacamento total da gota, abaixa-se a corrente novamente, para que sua transferência não ocorra de maneira violenta (a repulsão causada pelo efeito pinch pode ser muito grande, a ponto de jogar a gota contra a poça de fusão, causando pequenas explosões

na poça). A corrente mais baixa torna os efeitos eletromagnéticos desprezíveis se comparados à força de tensão superficial, permitindo que a gota termine sua transferência de maneira mais suave.

Para a reabertura do arco eleva-se novamente a corrente de soldagem, para gerar a energia necessária para fundir a ponta do arame e propiciar a reabertura do arco elétrico. A corrente não pode permanecer em pico por muito tempo, para que não ocorra um destacamento prematuro da gota.

3.4. Parâmetros do Processo MAG

Os parâmetros que apresentam maior influência na penetração da solda serão listados a seguir. Seu controle correto é vital para a obtenção de um cordão de solda de qualidade. A Figura 4.1 apresenta-os de forma esquemática.

Correntes e Tempos – As corrente e os tempos são os parâmetros mais importantes durante a soldagem MAG CCC. A corrente de soldagem influencia diretamente a penetração, a taxa de deposição e a velocidade de soldagem (maiores correntes acarretam em maiores penetrações), enquanto que os tempos são importantes para o controle do processo de soldagem, para que as interações físicas entre o metal de solda e a poça de fusão ocorram da maneira esperada.

Distância bico de contato peça (DBCP) – é o parâmetro que mede a distância entre o bico de contato da tocha e a chapa. Essa distância determina o quanto de resistência elétrica existe para a corrente de soldagem vencer, sendo que maior DBCP oferece uma maior resistência à corrente de soldagem. Utiliza-se uma menor DBCP quando se deseja uma maior corrente e, por consequência, uma maior penetração. Recomenda-se que a DBCP não seja menor que 10 mm, para não queimar o bico de contato, nem maior que 25 mm, para não superaquecer o arame, fazendo com que ele perca a rigidez mecânica [Scotti, 2008].

Ângulo de trabalho (*work angle*) – este parâmetro indica o ângulo que a tocha forma com relação à superfície do metal de base, num plano perpendicular ao eixo da solda e ao eletrodo. Uma maior quantidade de energia será transmitida para a chapa para a qual a tocha estiver direcionada. Assim, a chapa que recebe mais energia terá uma maior penetração.

Ângulo de deslocamento ou de inclinação do eletrodo (*travel angle*) – ângulo que o eletrodo forma com uma reta de referência, perpendicular ao eixo da solda e ao eletrodo.

A inclinação da tocha, ou ângulo de deslocamento da tocha, é o ângulo entre o eixo do eletrodo e a linha normal ao eixo do cordão de solda. Quando o ângulo é positivo (técnica “puxando”, ou seja, eletrodo apontando para o cordão já formado), o cordão de solda apresenta maior penetração, menos salpicos, é mais estreito e mais convexo, e o arco é mais estável. Quando se utiliza o ângulo negativo (técnica “empurrando”), estão presentes diversas características tais como: menor penetração, mais salpicos, cordão mais plano e mais largo, menor visibilidade para o soldador. Esta técnica é empregada quando grandes valores de penetração não são requeridos. Quando se utiliza ângulo nulo (0°), têm-se características intermediárias aos dois casos citados anteriormente.

Frequência de Oscilação da Tocha – é o parâmetro que mede a oscilação da tocha em relação à junta das chapas. A oscilação ajuda a cobrir uma área maior da junta, distribuindo melhor a energia de soldagem, formando um cordão de solda de maior qualidade.

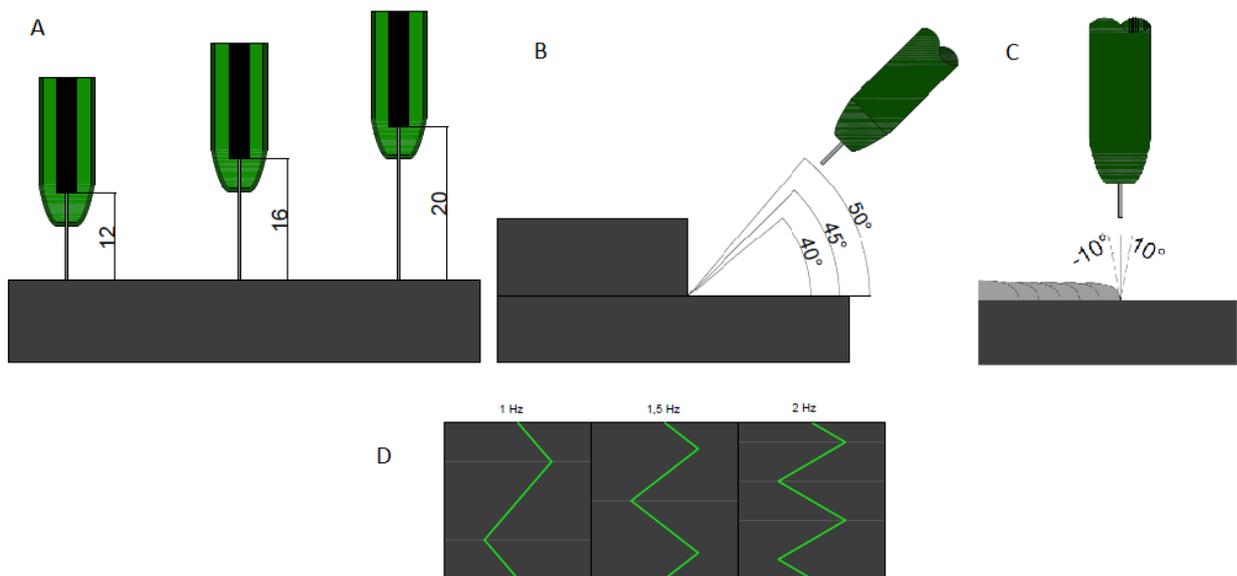


Figura 4.1 – Parâmetros de Soldagem, (A) DBCP, (B) Ângulo de Trabalho, (C) Ângulo de Deslocamento, (D) Frequência de Oscilação.

4. EQUIPAMENTO E MATERIAL

Para a realização dos experimentos práticos foi utilizado o Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC), situado no Centro Tecnológico do Campus do Vale da UFRGS.

Para a soldagem, foi utilizada a fonte DIGPlus A7, uma fonte de soldagem multiprocessos, com um processador de 32 bits do LS&TC.

A fonte pode realizar soldas MAG CCC tanto com CCCI (controle da corrente), quanto com CCCU (controle da tensão). Para o trabalho foi utilizado o modo CCCI.

Os testes foram realizados utilizando-se um sistema de soldagem fabricado pela IMC Soldagem. Esse sistema consiste das seguintes partes: cabeçote alimentador de arame STA-20-2, que contém a tocha de soldagem; fonte de soldagem multiprocessos Digiplus A7 450; microcontrolador ARM 7 de 32 bits, que possibilita o controle e monitoramento dos parâmetros de soldagem; um sistema automatizado CNC Tartilope v.4 com 4 graus de liberdade, que possibilita o controle e a repetitividade dos movimentos da tocha de soldagem e dos parâmetros do processo. A fonte de soldagem foi ajustada para executar o processo MIG/MAG Curto-Circuito Controlado CCCI, utilizando CCEP (corrente contínua eletrodo positivo).

Os testes foram monitorados através de um sistema de aquisição de dados SAP-v4.01, também fabricado pela IMC Soldagem [IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, 2005]. Tal sistema possui sensores para medir os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão de gás de proteção, assim como um software para aquisição e registro destes sinais. A taxa de amostragem utilizada durante a realização dos experimentos foi de 5 kHz.

O metal de adição utilizado foi o arame-eletrodo AWS ER70S-6 de diâmetro 1,0 mm. O arame de 0,8 mm mostrou-se instável para a soldagem em experimentos anteriores, e o arame de 1,2 mm necessita de um maior tempo para a formação da gota em tamanho aceitável.

O gás de proteção empregado foi uma mistura de Argônio e 10% CO₂, a uma vazão de 15 litros por minuto.

As peças a serem soldadas foram barras chatas de dimensões 6,35 mm x 76,20 mm x 250 mm, sobrepostas em barras chatas de 7,94 mm x 76,20 mm x 250 mm. Foi escolhida a posição horizontal junta de filete (2F), para simular a chapa de reforço sobre a tubulação; as espessuras das amostras são as normalmente encontradas em tubulações existentes.

Para o corte das peças foi utilizado um disco de corte, com processo de corte refrigerado; assim, o calor gerado durante o corte não afetou a região da solda para as análises propostas.

Para a preparação das amostras foram feitas seqüências de lixamentos, utilizando lixas de numeração 80, 180, 320, 400 e 600. O lixamento com a lixa 600 é considerado suficiente para a obtenção da macrografia da seção transversal do cordão de solda da junta soldada.

Para o ataque químico foi utilizado Nital 10%. Cada amostra foi atacada 3 vezes, para obter-se a visualização ideal na amostra. Os ataques foram realizados na capela do centro de metalurgia.

As Figuras das macrografias foram obtidas através do escaneamento das amostras, e os dados foram coletados com a utilização do programa Image J.

5. METODOLOGIA

Vários parâmetros influenciam no processo de soldagem. De certa forma, os parâmetros da onda da corrente de soldagem imposta (foi definida para uma relação velocidade de alimentação do arame / velocidade de soldagem constante), da distância bico de contato-peça, do ângulo de deslocamento da tocha, do ângulo de trabalho da tocha, e da frequência de oscilação da tocha durante a soldagem, têm conhecida influência, em maior ou menor grau, nos processos de soldagem. Como o objetivo deste trabalho foi fazer uma análise mais ampla, utilizaram-se os cinco parâmetros citados anteriormente. Os níveis analisados nesta fase foram cuidadosamente escolhidos através de testes preliminares.

Como ponto exploratório, definiu-se utilizar como resposta a geometria do cordão de solda, expressa em termos de: penetração (P1, P2 e P3), área do reforço do cordão de solda (AR), áreas fundidas do metal base (divididas em A2, A3 e A4), e também as pernas horizontal e vertical (H1e H2) Figura 5.1. A área A4 foi considerada como resposta importante.

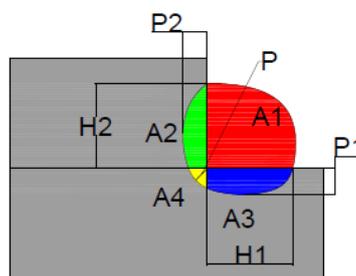


Figura 5.1 – Parâmetros da geometria do cordão de solda.

Utilizou-se, ainda, o planejamento fatorial fracionado em dois níveis, onde cada fator assume um valor máximo e um mínimo, e cinco pontos centrais (n_c). Combinando-se esses níveis entre todos os fatores, obtêm-se ($n_F =$) 2^{k-1} mais n_c experimentos, onde k é o número de fatores analisados. Os valores adotados para os níveis máximos, mínimos e centrais encontram-se na Tabela 5.1. A seqüência de realização dos ensaios foi gerada pelo *software* Minitab, numa ordem aleatória padrão. Neste caso, têm-se $k = 5 \rightarrow 2^{5-1}$ experimentos, ou seja, $n_F = 16$ ensaios, mais $n_c = 5$ pontos centrais, o que totaliza 21 ensaios.

Tabela 5.1 – Níveis máximos, mínimos e centrais dos fatores utilizados.

Parâmetro	Mínimo	Central	Máximo
A: [R] – Relação W/Vs [W] Velocidade de alimentação do arame (m/min) [Vs] Velocidade de soldagem (mm/s)	-1	0	+1
B: [DBCP] Distância Bico de contato – peça (mm)	12	16	20
C: [AT] Ângulo de trabalho da tocha (°)	40	45	50
D: [AD] Ângulo de deslocamento da tocha (°)	-10	0	+10
E: [FO] Frequência de oscilação da tocha (Hz)	1,0	1,5	2,0

Os parâmetros correspondentes à forma de onda MAG Curto-Circuito Controlado, modo CCCI, foram ajustados convenientemente para cada velocidade de alimentação de arame, de modo a obter os níveis de R. Os níveis de R foram obtidos das seguintes relações:

- R = -1 para W = 5,0 m/min e Vs = 5,0 mm/s
- R = 0 para W = 6,0 m/min e Vs = 6,0 mm/s
- R = +1 para W = 7,0 m/min e Vs = 7,0 mm/s

O Planejamento Experimental é uma ferramenta de engenharia criticamente importante para melhorar um processo de fabricação, e é particularmente útil para controlar as variáveis em um processo e determinar quais são mais importantes. Em muitas indústrias, o uso eficaz do planejamento experimental estatístico é a chave para resultados melhores, variabilidade reduzida, redução do tempo ocioso no desenvolvimento, melhores produtos e clientes satisfeitos. O planejamento fatorial (fracionado) de um experimento é um procedimento em que são variados sistematicamente os fatores controláveis de entrada, de modo que possam ser avaliadas as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações [Montgomery, 2009]. A Tabela 5.1 mostra planejamento fatorial fracionado 2^{5-1} + 5 pontos centrais dos ensaios gerados pelo *software*. O uso potencial de planejamento fatorial fracionado de dois níveis é a hipótese de linearidade dos efeitos dos fatores. Naturalmente, não é necessária uma linearidade perfeita, e o sistema 2^{k-1} funcionará muito bem mesmo quando a hipótese de linearidade verificar-se apenas aproximadamente. De fato, observa-se que, quando se acrescenta um termo de interação a um modelo de efeitos principais, introduz-se curvatura na superfície de resposta. Como o planejamento 2^{k-1} suportará um modelo de efeitos principais mais interações, alguma proteção contra a curvatura já é inerente ao planejamento [Montgomery, 2004].

Há um método para acrescentar um ponto a um planejamento fatorial 2^{k-1} que fornecerá alguma proteção contra efeitos quadráticos puros (no sentido de que se pode testar se os termos quadráticos são necessários). Além disso, se esse ponto for explicado, então, pode-se obter uma estimativa independente do erro experimental. O método consiste na adição de pontos centrais no planejamento 2^{k-1} . Esses pontos centrais consistem em n_c replicações rodadas no ponto central ($i = 0, 1, \dots, k$). Uma razão importante para se adicionar rodadas replicadas no centro do planejamento é que os pontos centrais não causam impacto nas estimativas usuais dos efeitos em um planejamento 2^{k-1} . Admite-se que os k fatores sejam quantitativos; de outro modo, não haveria um nível central, ou no “meio”, para o fator. [Montgomery, 2004].

6. RESULTADOS

Realizados os cordões de solda, os corpos de prova foram seccionados transversalmente aos cordões de solda, polidos e atacados quimicamente com nital 10%. Na Tabela 6.1, apresentam-se os valores das respostas obtidas da avaliação da geometria do cordão de solda, expressa em termos de área A4, área do reforço do cordão de solda (AR), áreas fundidas do metal base (AFMB), divididas em A2, A3 e A4, a diluição (D %) e a penetração (P) (Vide Figura 5.1).

Tabela 6.1 – Planejamento fatorial fracionado de experimento dos parâmetros avaliados e resultados obtidos.

Planejamento Fatorial 2^{5-1} + 5 pontos centrais							Respostas				
Sequência Exp. Padrão	Sequência de Soldagem	R (W/Vs)	DBCP (mm)	AT (°)	AD (°)	FO (Hz)	AR (mm ²)	D (%)	AFMB (mm ²)	A4 (mm ²)	P (mm)
13	1	-1	12	50	10	2	11,41	26,39	4,09	0	0
15	2	-1	20	50	10	1	12,2	10,62	1,45	0	0
3	3	-1	20	40	-10	1	12,02	25,85	4,19	0	0
8	4	1	20	50	-10	1	11,77	28,84	4,77	0	0
18	5	0	16	45	0	1,5	11,72	19,78	2,89	0	0
9	6	-1	12	40	10	1	12,49	20,85	3,29	0	0
5	7	-1	12	50	-10	1	12,94	21,67	3,58	0	0
19	8	0	16	45	0	1,5	12,61	21,92	3,54	0	0
16	9	1	20	50	10	2	12,36	17,21	2,57	0	0
11	10	-1	20	40	10	2	12,07	25,03	4,03	0	0
6	11	1	12	50	-10	2	11	18,03	2,42	0	0
2	12	1	12	40	-10	1	12,15	18,57	2,77	0	0
7	13	-1	20	50	-10	2	13,49	10,37	1,56	0	0
4	14	1	20	40	-10	2	12,52	13,42	1,94	0	0
20	15	0	16	45	0	1,5	12,2	13,48	1,9	0	0
12	16	1	20	40	10	1	12,4	13,77	1,98	0	0
10	17	1	12	40	10	2	10,55	5,72	0,64	0	0
17	18	0	16	45	0	1,5	11,02	18,31	2,47	0	0
21	19	0	16	45	0	1,5	12,63	17,5	2,68	0	0
14	20	1	12	50	10	1	12,08	14,08	1,98	0	0
1	21	-1	12	40	-10	2	12,57	22,41	3,63	0	0

6.1. Análise de Variância

Através do *software* Minitab, os dados da Tabela 6.1 foram processados para, então, realizar-se a análise de qual a influência dos fatores nas respostas. Para essa análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa (α) menores que 5%, admitiu-se que a variável de controle em questão é significativa na resposta. Vale ressaltar que, quanto menor for o valor de alfa, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

As seções a seguir apresentarão os gráficos de Pareto, juntamente com o gráfico de probabilidade normal dos efeitos de Pareto nas respostas pretendidas: diluição, área A4, área fundida do metal base e penetração. Eles mostrarão as influências dos parâmetros principais e suas combinações no cordão de solda, e quais deles são significativos.

Logo após, serão apresentados os gráficos de cada parâmetro principal e sua influência na determinada resposta. Através deles é possível verificar o quão representativo o parâmetro individualmente é, na formação do cordão de solda.

Por último serão apresentados os gráficos das interações significativas para a resposta avaliada, onde é possível visualizar o nível de influência das interações mediante a maior amplitude de variação na resposta.

6.2. Análise da Diluição do Cordão de Solda (D%)

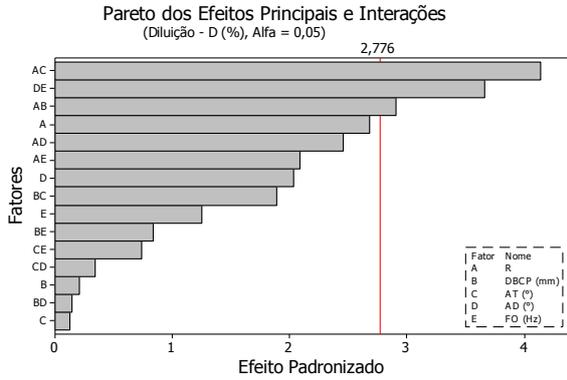


Figura 6.1a – Gráfico de Pareto dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

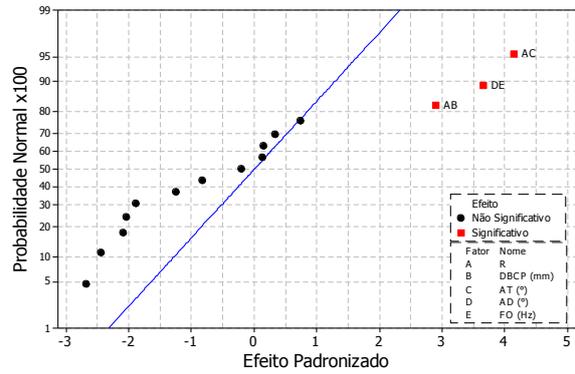


Figura 6.1b – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

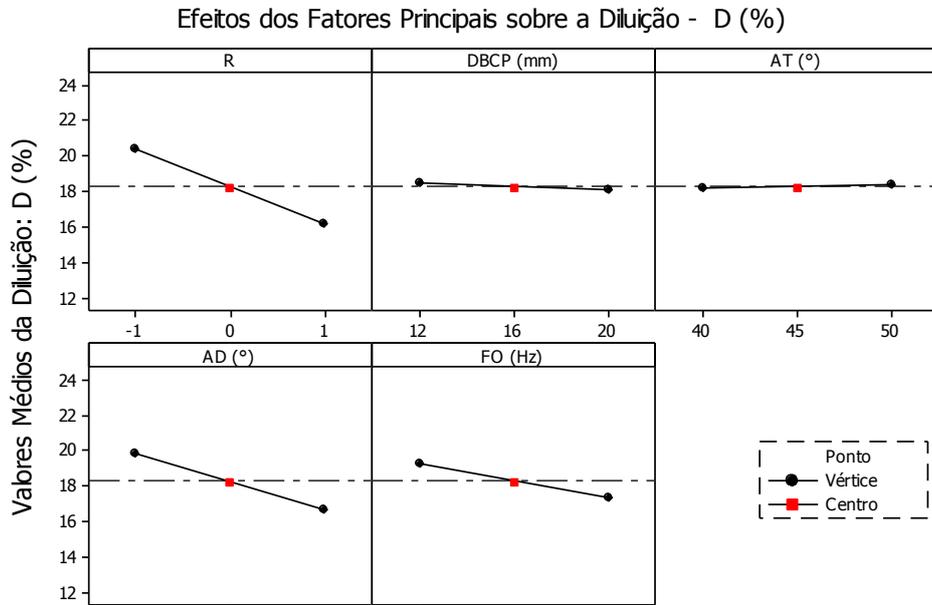


Figura 6.2 – Efeitos dos parâmetros principais sobre a diluição do cordão de solda.

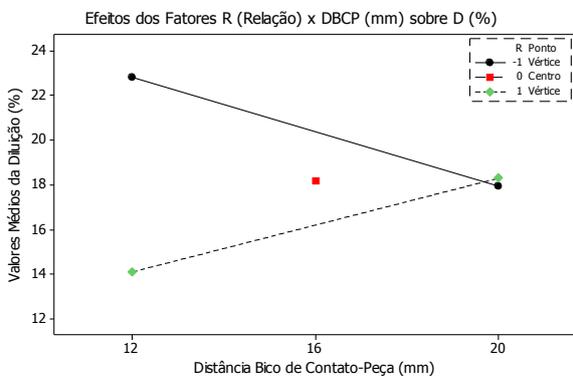


Figura 6.3 – Efeito dos parâmetros Relação [R] e distância bico de contato-peça [DBCP (mm)] sobre a diluição [D (%)].

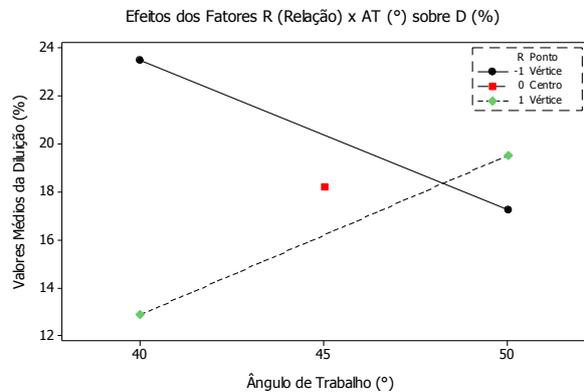


Figura 6.4 – Efeito dos parâmetros Relação [R] e o ângulo de trabalho [AT (°)] sobre a diluição [D (%)].

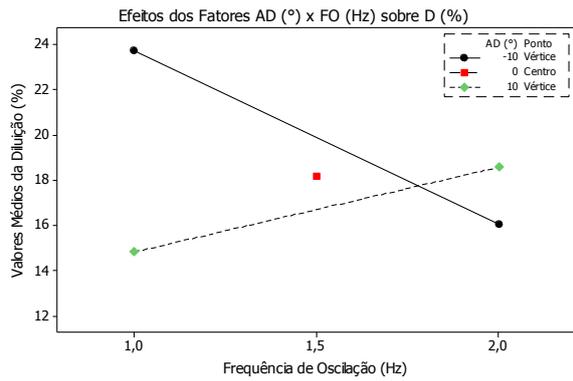


Figura 6.5 – Efeito dos parâmetros ângulo de deslocamento [AD (°)] e a frequência de oscilação [FO (Hz)] sobre a diluição [D (%)].

6.3. Análise da Área Fundida do Metal Base do Cordão de Solda (AFMB mm²)

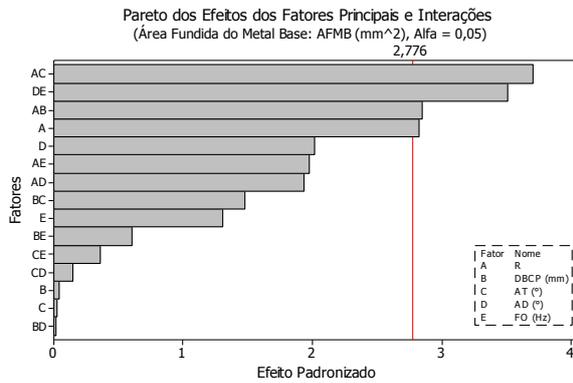


Figura 6.6a – Gráfico de Pareto dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

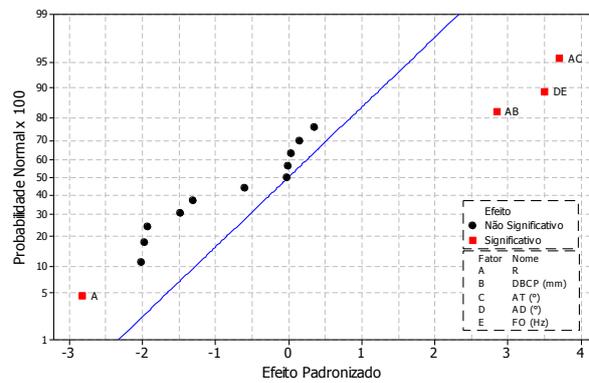


Figura 6.6b – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

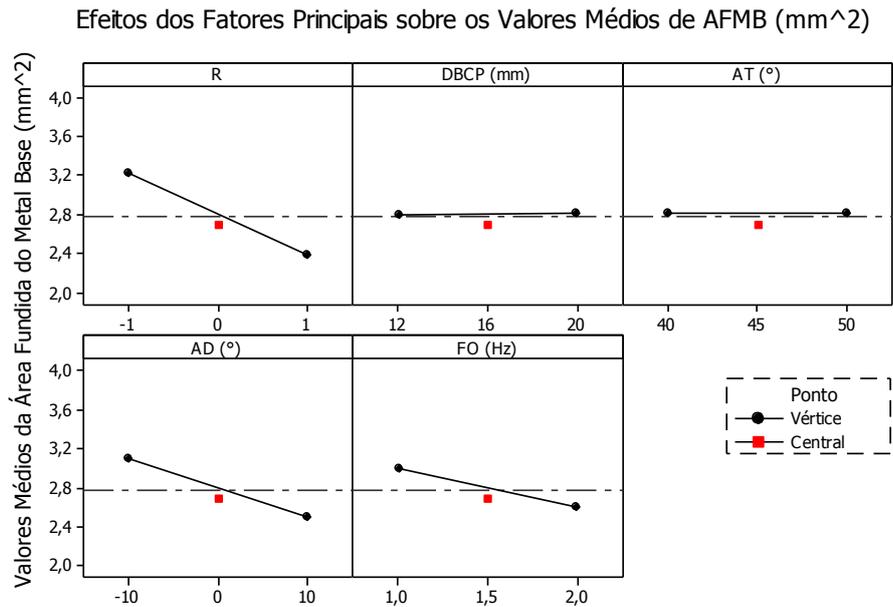


Figura 6.7 – Efeitos dos parâmetros principais sobre a área fundida do metal base.

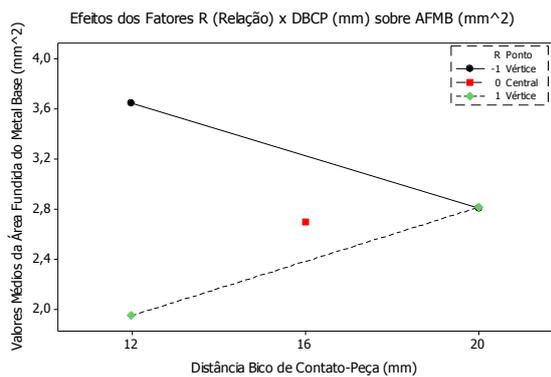


Figura 6.8 – Efeito dos parâmetros Relação [R] e a distância bico de contato-peça [DBCP (mm)] sobre a área fundida do metal base (mm²).

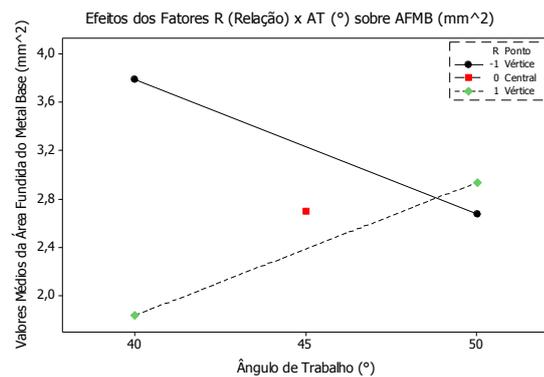


Figura 6.9 – Efeito dos parâmetros Relação [R] e o ângulo de trabalho [AT (°)] sobre a área fundida do metal base (mm²).

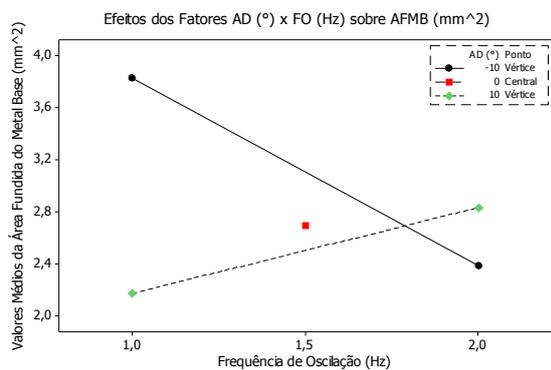
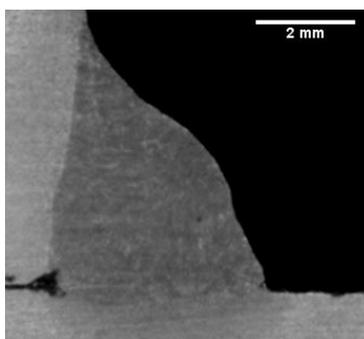


Figura 6.10 – Efeito dos parâmetros ângulo de deslocamento [AD (mm)] e a frequência de oscilação [FO (Hz)] sobre a área fundida do metal base (mm²).

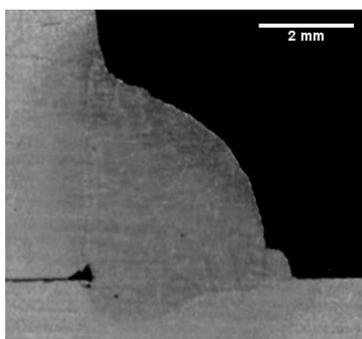
6.4. Análise da Área A4 e Penetração (A4-mm² e P-mm)

Analisando as macrografias das amostras é possível visualizar que não existe penetração e nem a formação da área A4 nelas. Ocorre penetração na chapa superior e na chapa inferior, porem na junta não ocorre.

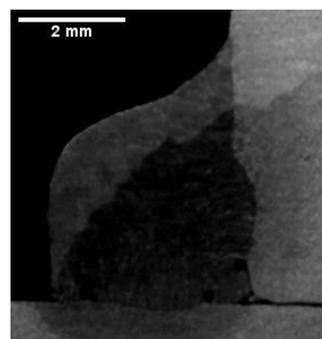
Algumas amostras apresentam deposição de material próximo a junta, mas a maioria das amostras apresentam um espaço entre a junta e o cordão de solda como pode ser visualizado na Figura 6.11.



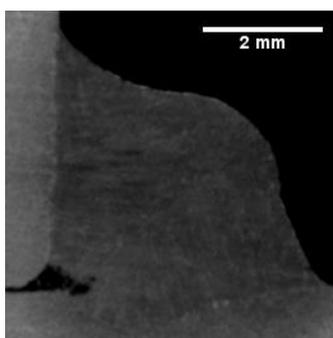
Cordão de solda 1



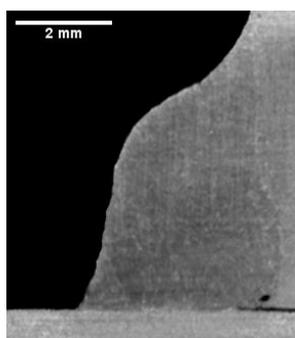
Cordão de solda 2



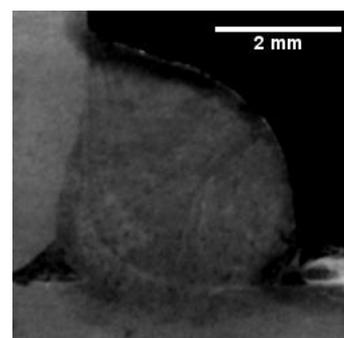
Cordão de solda 3



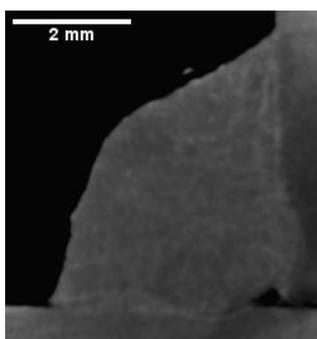
Cordão de solda 4



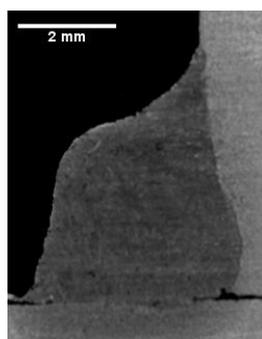
Cordão de solda 5



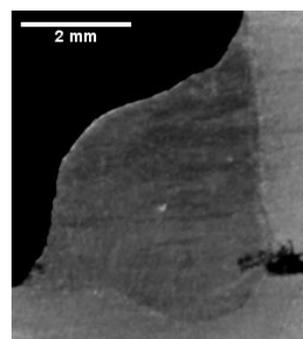
Cordão de solda 6



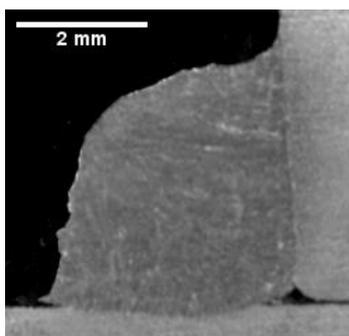
Cordão de solda 7



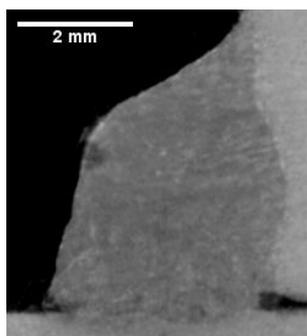
Cordão de solda 8



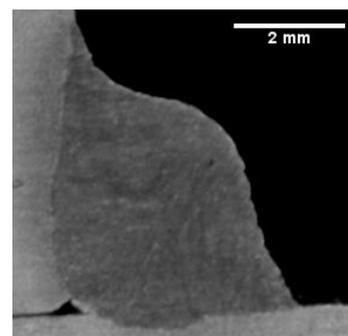
Cordão de solda 9



Cordão de solda 10



Cordão de solda 11



Cordão de solda 12

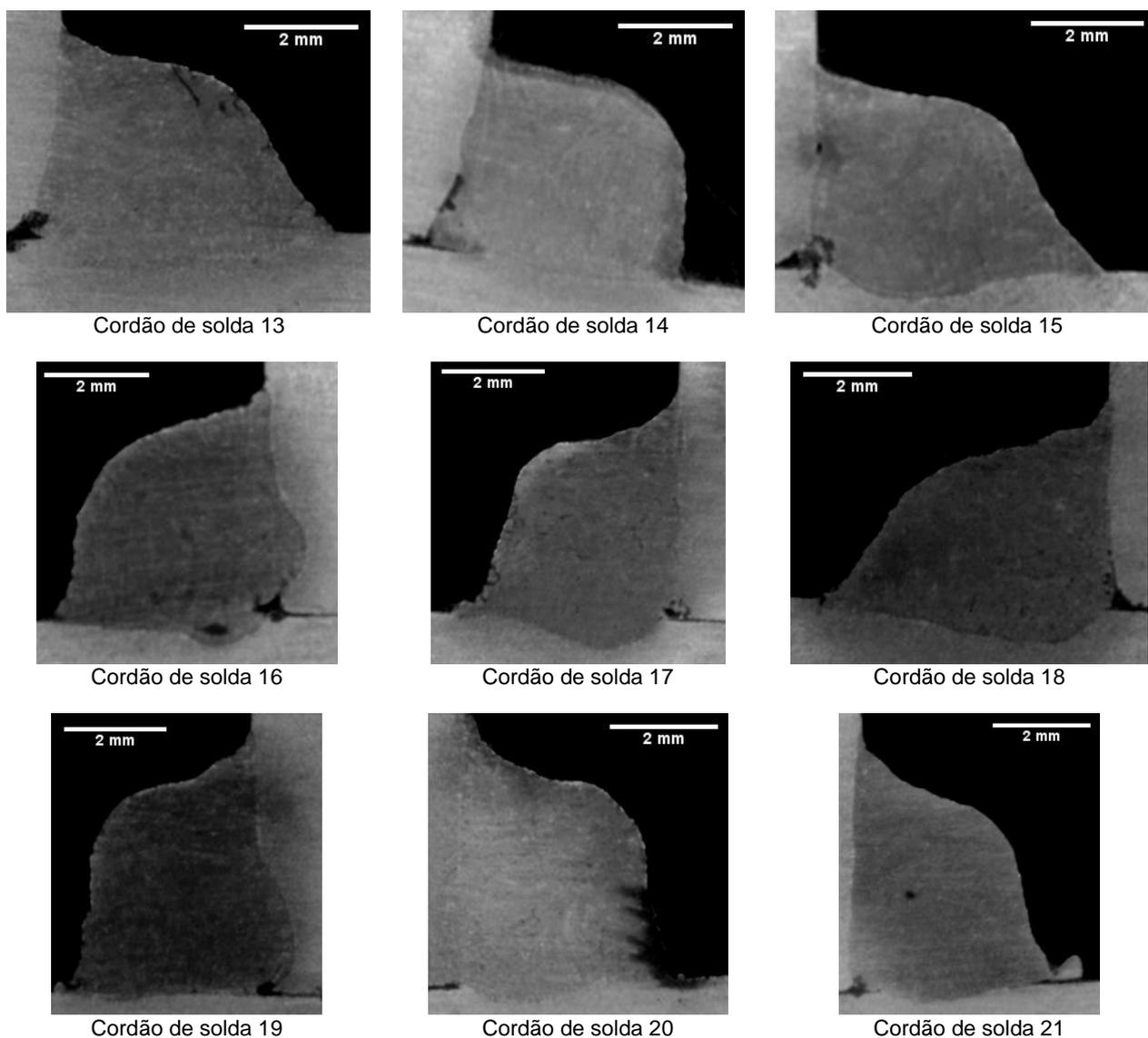


Figura 6.11 – Macrografias dos cordões de solda na sequência experimental padrão (segundo a Tabela 6.1)

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O primeiro resultado, facilmente observado durante a soldagem dos corpos de prova, foi a baixíssima geração de salpicos durante a soldagem (algumas vezes inexistente), e sua baixa energia de soldagem (tensões e correntes médias baixas durante o processo). Esses fatores tornam o método adequado para soldagem de chapas extremamente finas.

O parâmetro que mostrou maior influência nos resultados da diluição e a área fundida do metal base foi o ângulo de trabalho da tocha, sendo que sua posição a 40° mostrou os melhores resultados. Isso possivelmente ocorreu por ser um método de baixa energia de soldagem, fornecendo o jato de plasma extremamente fraco e a deposição do material sofre grande influência da força da gravidade, que acaba depositando a gota formada na chapa inferior. O ângulo de 40° ajuda o jato de plasma e a proteção gasosa a empurrar a gota um pouco mais para a chapa superior, além da aproximação do arame ser feita de maneira a ocorrer uma penetração maior na chapa superior. Essa combinação de elementos, que favorecem a uma

penetração na chapa superior, é suficiente para equilibrar a ação gravitacional, tornando assim possível uma penetração na junta.

O ângulo de deslocamento mostrou resultados contrários aos encontrados na literatura. Isso possivelmente ocorreu devido à instabilidade do arco durante a soldagem utilizando os parâmetros de maior energia ($R = +1$), e puxando a tocha. Essa instabilidade causou aumento na geração de salpicos e em consequência diminuição na penetração.

Segundo a análise de variância foi observado que os parâmetros, individualmente, exercem pouca influência sobre o cordão de solda, sendo necessária a combinação entre eles para obter-se resultados significativos.

Entende-se que devido ao baixo número de amostras, apenas um corpo de prova foi extraído de cada cordão de solda para avaliar a resposta, talvez fosse conveniente obter mais corpos de prova de cada cordão de solda, já que foi observado que a penetração variou ao longo do mesmo, possivelmente devido à frequência de oscilação.

8. CONCLUSÃO

Considerando-se os objetivos deste trabalho de análise dos parâmetros na soldagem do processo MAG CCC, conclui-se que:

.- A análise da Diluição (D) do cordão de solda, realizada mediante a Análise de Variância, comprovou que as interações entre os parâmetros controláveis produziram efeitos significativos na resposta de D. As interações significativas – em ordem decrescente de significância – foram $R \times AT$, $AD \times FO$ e $R \times DBCP$. Neste caso, o modelo matemático obtido foi considerado satisfatório ($R^2=0,944$ – Tabela II.1 do Apêndice II).

.- A análise da Área de Metal Base Fundido obteve resultados similares ao da Diluição. Por se manter constante a relação velocidade de alimentação pela velocidade de soldagem para todas as combinações de parâmetros avaliados com isso a Diluição é proporcional a Área de Metal Base Fundido.

.- A avaliação da área A4 foi realizada através da visualização das macrografias onde foi possível constatar que não a penetração na junta, apenas nas superfícies das chapas inferior e superior.

.- A soldagem realizada utilizando a Relação de nível superior ($R = +1$), apresentou-se instável, em particular quando utilizado um ângulo de deslocamento positivo.

.- Foi observado que o processo MAG Curto-Circuito Controlado, utilizando como gás de proteção uma mistura de Argônio e 10% CO_2 , pode produzir cordões de solda com quantidade reduzida de salpicos, ou até mesmo totalmente isentos deles, fato que representa um avanço em relação ao processo com curto-circuito convencional.

- O processo MAG Curto-Circuito Controlado mostrou-se totalmente insatisfatório para o objetivo proposto, visto que as penetrações obtidas foram inexistentes, o que torna o processo inadequado para realizar o passe de raiz de chapas relativamente espessas em juntas sobrepostas na posição 2F.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS, Welding Handbook, “**Welding Processes, Part 1**”, 9th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, 2004.

MONTGOMERY, D. C. “**Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**”, 4. ed., LTC, 2009.

MONTGOMERY, D. C. “**Introdução ao controle estatístico da qualidade**”, 4. ed., LTC, 2004.

IMC SOLDAGEM, Manual da fonte de soldagem Digiplus A7 450, 2009, www.imc-soldagem.com.br

IMC SOLDAGEM & LABSOLDA UFSC, Manual do sistema de aquisição de dados SAP v4.01, 2005, www.imc-soldagem.com.br, www.labsolda.ufsc.br

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. “**Soldagem MIG/MAG**”, 1. ed., Artliber, 2008

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. “**Soldagem: Processos e Metalurgia**” 1. ed., Edgard Blücher, 1992

APÊNDICE I – ENERGIA DE SOLDAGEM

A energia de soldagem é um parâmetro importante para obter-se o conhecimento de quanto será afetado o material-base em sua microestrutura. Quanto menor a energia de soldagem, menos se afeta o metal-base e, por consequência, suas propriedades mecânicas.

A energia de soldagem pode ser calculada por:

$$E = \frac{P_m}{V_s} \quad (J/mm) \quad (I.1)$$

TABELA I.1 – Energia de soldagem

Amostra	Vs (mm/s)	Pm (W)	E (J/mm)
1	5,05	2600	515
2	7,35	3200	435
3	5,25	2280	434
4	7,07	3000	424
5	5,25	2580	491
6	7,07	3000	424
7	5,05	2400	475
8	7,35	3150	428
9	5,25	2600	495
10	7,07	2900	410
11	5,05	2380	471
12	7,35	3080	419
13	5,05	2600	515
14	7,35	2700	367
15	5,25	2380	453
16	7,07	3100	438
17	6,18	2890	467
18	6,18	2900	469
19	6,18	2840	459
20	6,18	2800	453
21	6,18	2880	466

APÊNDICE II – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DAS RESPOSTAS AVALIADAS

Tabela II.1: Análise de variância (ANOVA) dos fatores R; DBCP; AT; AD e FO sobre D (%)

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para D (%) (unidades codificadas)					
Fator	Efeitos	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant		18,301	0,7822	23,40	0,000
R	-4,193	-2,096	0,7822	-2,68	0,055
DBCP (mm)	-0,326	-0,163	0,7822	-0,21	0,845
AT (°)	0,201	0,100	0,7822	0,13	0,904
AD (°)	-3,184	-1,592	0,7822	-2,04	0,112
FO (Hz)	-1,959	-0,980	0,7822	-1,25	0,279
R*DBCP (mm)	4,536	2,268	0,7822	2,90	0,044
R*AT (°)	6,473	3,237	0,7822	4,14	0,014
R*AD (°)	-3,833	-1,917	0,7822	-2,45	0,070
R*FO (Hz)	-3,259	-1,630	0,7822	-2,08	0,106
DBCP (mm)*AT (°)	-2,957	-1,478	0,7822	-1,89	0,132
DBCP (mm)*AD (°)	0,226	0,113	0,7822	0,14	0,892
DBCP (mm)*FO (Hz)	-1,304	-0,652	0,7822	-0,83	0,451
AT (°)*AD (°)	0,533	0,267	0,7822	0,34	0,750
AT (°)*FO (Hz)	1,155	0,578	0,7822	0,74	0,501
AD (°)*FO (Hz)	5,716	2,858	0,7822	3,65	0,022
Ct Pt		-0,103	1,6029	-0,06	0,952

S = 3,12863
R-Sq = 94,38%

Coefficientes estimados da equação de regressão linear para a determinação da Diluição (%) em função dos fatores não codificados.

Fator	Coef.
Constant	-24,4638
R	-35,4092
DBCP (mm)	3,77471
AT (°)	0,856282
AD (°)	-1,30177
FO (Hz)	-7,1408
R*DBCP (mm)	0,566951
R*AT (°)	0,647344
R*AD (°)	-0,191672
R*FO (Hz)	-3,25931
DBCP (mm)*AT (°)	-0,0739224
DBCP (mm)*AD (°)	0,0028215
DBCP (mm)*FO (Hz)	-0,325981
AT (°)*AD (°)	0,0053335
AT (°)*FO (Hz)	0,231049
AD (°)*FO (Hz)	0,571619
Ct Pt	-0,10320

.- Em geral, um modelo de regressão é a equação da forma:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{i < j} \sum_j b_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Os coeficientes de regressão do modelo são estimados pelo método de mínimos quadrados; isto é, os b 's são escolhidos de modo a minimizar a soma dos quadrados dos erros (os ϵ 's). É muito útil expressar os resultados de um experimento planejado em termos de um modelo que ajuda na interpretação do experimento.

Tabela II.2: Análise de variância (ANOVA) dos fatores R; DBCP; AT; AD e FO sobre AFMB (mm²)

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para AFMB (mm ²) (unidades codificadas)					
Fator	Efeitos	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant		2,8056	0,1497	18,74	0,000
R	-0,8437	-0,4219	0,1497	-2,82	0,048
DBCP (mm)	0,0113	0,0056	0,1497	0,04	0,972
AT (°)	-0,0062	-0,0031	0,1497	-0,02	0,984
AD (°)	-0,6037	-0,3019	0,1497	-2,02	0,114
FO (Hz)	-0,3912	-0,1956	0,1497	-1,31	0,261
R*DBCP (mm)	0,8512	0,4256	0,1497	2,84	0,047
R*AT (°)	1,1087	0,5544	0,1497	3,70	0,021
R*AD (°)	-0,5788	-0,2894	0,1497	-1,93	0,125
R*FO (Hz)	-0,5912	-0,2956	0,1497	-1,97	0,120
DBCP (mm)*AT (°)	-0,4413	-0,2206	0,1497	-1,47	0,215
DBCP (mm)*AD (°)	-0,0038	-0,0019	0,1497	-0,01	0,991
DBCP (mm)*FO (Hz)	-0,1813	-0,0906	0,1497	-0,61	0,578
AT (°)*AD (°)	0,0437	0,0219	0,1497	0,15	0,891
AT (°)*FO (Hz)	0,1062	0,0531	0,1497	0,35	0,741
AD (°)*FO (Hz)	1,0488	0,5244	0,1497	3,50	0,025
Ct Pt		-0,1096	0,3069	-0,36	0,739

S = 0,598941
R-Sq = 93,57%

Coefficientes estimados da equação de regressão linear para a determinação da Área A4 (mm²) em função dos fatores não codificados.

Fator	Coef.
Constant	-4,19750
R	-6,22688
DBCP (mm)	0,565781
AT (°)	0,144000
AD (°)	-0,206438
FO (Hz)	-0,62250
R*DBCP (mm)	0,106406
R*AT (°)	0,110875
R*AD (°)	-0,0289375
R*FO (Hz)	-0,591250
DBCP (mm)*AT (°)	-0,0110313
DBCP (mm)*AD (°)	-0,00004688
DBCP (mm)*FO (Hz)	-0,0453125
AT (°)*AD (°)	0,00043750
AT (°)*FO (Hz)	0,0212500
AD (°)*FO (Hz)	0,104875
Ct Pt	-0,109625