

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

EFEITO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO MIG/MAG C-CC SOBRE A GEOMETRIA DO
CORDÃO DE SOLDA.

por

Ronnan Binotto

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, novembro de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

EFEITO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO MIG/MAG C-CC SOBRE A GEOMETRIA DO
CORDÃO DE SOLDA
por

Ronnan Binotto

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. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. José Antonio E. Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo amor, carinho, incentivo e suporte ao longo de minha vida.
Aos meus amigos, pela amizade e apoio durante toda a minha trajetória acadêmica.
Ao professor Arnaldo Ruben por me auxiliar nesse projeto e sempre com dedicação e paciência pode me auxiliar com maestria.
Aos bolsistas do LS&TC pela ajuda na realização dos experimentos.

BINOTTO, R. EFEITO DOS PARÂMETROS AO PROCESSO MIG/MAG C-CC SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O trabalho consiste no estudo da influência dos parâmetros sobre a geometria do cordão de solda realizado sobre a superfície livre (*bead-on-plate*). Para isso, utilizou-se do processo de soldagem MIG/MAG curto-circuito controlado, empregando arame ER70S-6 de 1,0 mm e gás ativo de proteção Ar+10%CO₂, para a execução dos cordões de solda sobre a chapa de aço SAE 1020. Os parâmetros do processo analisados foram I_{a1} , I_{a2} e t_{a2} correspondentes aos da fase de arco elétrico. Esses parâmetros são controláveis e independentes cujos valores foram sistematicamente variados de acordo com a matriz do projeto de experimentos Box-Behnken para execução dos cordões de solda. Diante disso, o trabalho tem como objetivo de avaliar a influência desses parâmetros que afetam as respostas das características geométricas do cordão de solda, especificamente a área de reforço e a área de metal base. A corrente I_{a1} apresentou maior influência na geometria do cordão de solda.

PALAVRAS-CHAVE: (MIG/MAG curto-circuito controlado, influência dos parâmetros, área de reforço, área de metal base)

BINOTTO, R. EFFECT OF THE PARAMETERS MIG/MAG WELDING PROCESS C-CC MODE ON WELD BEAD GEOMETRY 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The work consists in the study the influence of the parameters on the geometry of the bead-on-plate welds. For this, it was used the MIG/MAG welding process with controlled Short-Circuit using 1.0 mm diameter ER70S-6 wire and active gas of protection Ar + 10% CO₂, for the execution of weld beads in SAE 1020 steel sheets. The parameters of the electric arc phase analyzed were I_{a1} , I_{a2} and t_{a2} . These parameters are controllable and independent, whose value are systematically varied according to the Box-Behnken experiment design matrix for the execution of the weld beads. The aim of this work is to evaluate the influence for these parameters that affect the responses of the geometric characteristics of the weld bead, specifically the reinforcement area and the base metal area. The current I_{a1} presented the greatest influence on the weld bead geometry.

KEYWORDS: Controlled Short-Circuit MIG/MAG Welding, parameters' influence, reinforcement area, area of the molten base metal.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1	Introdução ao processo MIG/MAG.....	1
2.2	O processo MIG/MAG por curto-circuito controlado.....	2
2.2	Manufatura Aditiva.....	3
3	METODOLOGIA.....	4
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	6
4.1	Resultados área de reforço.....	8
4.2	Resultados área de metal base.....	9
4.3	Método “Desirability”.....	11
4.4	Validação do modelo de Regressão.....	12
4.5	Manufatura Aditiva.....	13
5	CONCLUSÕES	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	Apêndice	16

1. INTRODUÇÃO

A medida que as comunidades foram crescendo, os artesãos foram desenvolvendo novos conhecimentos que possibilitaram aumentar a produtividade. Já com o advento dos processos de fabricação, fez-se necessário unir materiais de mesma ou de diferente natureza. Nesse cenário, a soldagem mostrou-se como uma enorme vantagem para a construção de novos projetos e criação de produtos que, crescentemente, requerem pesquisa e tecnologia, principalmente na área dos metais.

O processo de soldagem MIG/MAG com transferência do metal do tipo curto-circuito convencional é uma das variantes do processo *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*), no qual um arame-eletrodo continuamente alimentado é depositado durante repetidos curtos-circuitos em um intervalo de frequência de 20-150 Hz. Este processo possui relativo baixo custo e opera com relativamente baixa energia de soldagem, além de permitir a soldagem de materiais com pequenas espessuras e em todas as posições. Todas essas características justificam sua ampla aplicação em vários segmentos da indústria [Silva et al, 2008; Machado, 1996].

À medida que a eletrônica de potência e os sistemas de controle e monitoramento dos sinais evoluem, surgem novas possibilidades de inovação dos processos de soldagem, induzindo os centros de pesquisa a diversificarem sua atuação em um ritmo cada vez mais intenso. Dentro desse contexto, diversas universidades e centros de pesquisa brasileiros tem focado seus esforços na validação de processos visando as mais diferentes aplicações industriais. Um exemplo deste tipo de esforço é o trabalho que vem sendo realizado na tentativa de substituir os processos de soldagem TIG e Eletrodo Revestido (ER), na construção e reparo em operação de oleodutos e gasodutos, pelo processo MIG/MAG. Na última década, algumas pesquisas têm sido realizadas e experimentos conduzidos com intuito de comprovar os benefícios desta substituição e, para isso, processos com o MIG/MAG com curto-circuito controlado tem sido utilizado [Silva, 2005].

Uma forma de aperfeiçoamento é justamente o processo MIG/MAG com controle da transferência do metal. Entende-se aqui este controle como o domínio do sinal da corrente, de uma forma imposta e cíclica, visando a otimização das características favoráveis de cada transferência para obter soldas mais adequadas para situações especiais [Scotti e Ponomarev, 2008].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros I_{a1} , I_{a2} e t_{a2} na fase de arco elétrico do processo de soldagem MIG/MAG curto-circuito controlado sobre as respostas das características geométricas do cordão de solda depositado sobre a superfície livre (*bead-on-plate*). Esses parâmetros são importantes para obter maior regularidade na transferência do metal. Para isso, determina-se a combinação de parâmetros para as características geométricas, áreas do metal base fundido e do reforço do cordão de solda, que permitam obter três cordões de solda empilhados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução ao processo MIG/MAG

Os processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas) baseiam-se na utilização da fonte de calor de um arco elétrico mantido por um gás ionizado entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (Argônio ou Hélio) ou gás ativo (Dióxido de Carbono, Oxigênio), também, podem ser utilizadas misturas desses gases. O arame consumível, também denominado de arame-eletrodo, passa a atuar como condutor elétrico a partir do bico de contato, ponto do último contato elétrico junto à tocha de soldagem [Machado, 1996; Wainer et., 2002]

As principais características deste processo de soldagem são a variação dos modos de transferência do metal, desde o eletrodo à peça, a soldagem pode ser executada em todas as posições com elevada taxa de fusão do arame, não há necessidade de remoção de escória, facilidade de operação, o metal de solda depositado possui baixo potencial de hidrogênio difusível, alta velocidade de soldagem e conveniências para automatização e robotização.

Os modos transferência do metal do processo MIG/MAG convencional são o curto-circuito, o globular, o globular repelido e o aerossol. Ainda pode-se subdividir o modo de transferência aerossol em axial projetado, aerossol com alongamento e aerossol rotacional [Lancaster, 1984].

2.2 O processo MIG/MAG com Curto-circuito Controlado

Uma das maiores novidades demonstradas nos últimos anos tem sido o processo MIG/MAG com o controle da transferência de metal. No início, as pesquisas com o MIG/MAG C-CC buscavam um processo com as vantagens da transferência metálica por curto-circuito (menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, menor gasto de energia) suprimindo os inconvenientes do processo. Atualmente, as finalidades desse processo baseiam-se em uma melhoria dos aspectos visuais do cordão, menor quantidade de salpicos, uma poça de fusão de pequeno volume e estável termicamente e uma relação penetração/taxa de deposição controlada.

Estudos recentes do processo MIG/MAG por curto circuito controlado têm permitido um melhor controle dos parâmetros do processo e uma redução do calor adicionado ao metal base durante a soldagem.

De uma forma geral, consistem em uma forma de onda de corrente e tensão que pode ser descrita como sendo composta em fases conforme Figura 2.1.

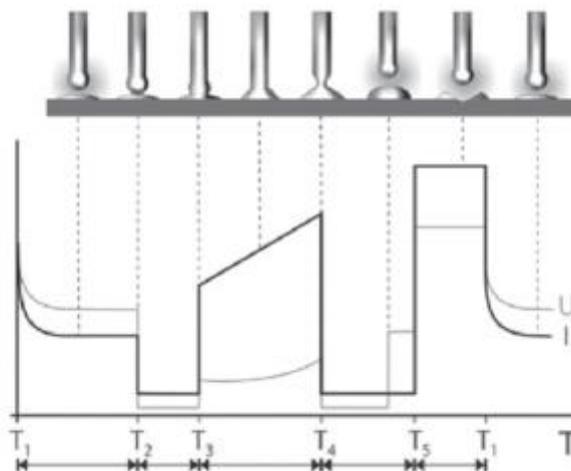


Figura 2.1 – Forma de onda da corrente [Dutra e Silva, 2008].

A corrente é governada pela tensão através de um circuito de controle. Entre os curtos-circuitos, a corrente, denominada corrente de base, é mantida em valor relativamente baixo (fase entre T1 e T2), suficiente para manter a gota líquida na ponta do arame-eletrodo e o aquecimento do metal base. O nível de corrente de base é função do tipo do gás de proteção, da velocidade de alimentação e do material e do diâmetro do arame eletrodo, porém, não deve exceder 70 A [Possebon, 2009; Dutra e Silva, 2008].

O processo vai para a fase 2, quando há curto-circuito. Nesta fase, de tempo regulável, a corrente é reduzida ainda mais, reduzindo a tendência de respingos, pois a gota se assenta suavemente sob ação da tensão superficial, força preponderante no curto-circuito.

A próxima etapa é caracterizada por aplicação de um curto-circuito (T3). Com essa alta corrente de curto-circuito, a força eletromagnética cresce consideravelmente, resultando no “empescoçamento” da ponte metálica através da ação do Efeito *Pinch*. A redução da seção transversal da ponte metálica provoca o aumento da resistência, detectada por um circuito especial através da variação da tensão por unidade de tempo (dU/dt), o qual gera um sinal de saída que serve de indicação que o curto-circuito está chegando ao fim. Então, a corrente de curto-circuito é reduzida a níveis abaixo da corrente base, da ordem de 30 A, possibilitando a interrupção da ponte metálica de forma suave e com mínima produção de salpicos. Nota-se que durante essa fase de baixa corrente (fase entre T4 e T5) a tensão aumenta, o que evidencia que o arco elétrico foi reaberto [Possobon, 2009; Dutra e Silva, 2008].

A próxima fase é composta por um pulso de corrente, destinado à formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo e fusão das faces (entre T5 e T1). A energia deste pulso deve corresponder à necessidade para que se forme uma nova gota de mesmo tamanho que a anterior. Cita-se também que deve causar uma depressão na poça, evitando contato prematuro desta com a gota em formação [Possobon, 2009; Dutra e Silva, 2008].

À forma de transição para um novo circuito, são atribuídas as funções de amortecimento da poça, pela redução suave da corrente e pelo controle do aporte térmico e fluidez do material fundido.

2.3 Manufatura Aditiva

O processo de fabricação por manufatura aditiva divide a fabricação do componente em sucessivas camadas depositadas, estas multicamadas podem ser depositadas por processo de soldagem tradicionais ou aperfeiçoados. É possível fabricar peças com geometrias complexas ou com materiais de alto custo, os quais seriam impraticáveis pelos processos tradicionais ou com custos elevados [Williams, 2016].

Comparada com métodos como a usinagem, por exemplo, a Manufatura Aditiva apresenta algumas vantagens que a tornam uma alternativa competitiva na fabricação de peças metálicas. É possível automatizar todo o processo de produção via Manufatura Aditiva, desde o desenho à fabricação em ambiente CAD/CAM, reduzindo o tempo de produção e intervenção humana necessária. Ainda, é possível a fabricação de peças únicas de geometria complexa que seriam impossíveis de produzir por rotas convencionais de fabricação [Ding et al., 2015].

Os equipamentos principais para a manufatura aditiva abrangem um sistema de movimentação (robô), uma fonte de calor (arco elétrico) e material de adição (eletrodo ou arame) para manufaturar o componente. Os componentes fabricados são em geral de média e grande escala, e com geometrias de baixa a média complexidade. Em alguns casos é necessária a usinagem posterior dos componentes feitos por soldagem devido ao acabamento superficial. A Figura 2.2 exemplifica a ideia.



Figura 2.2 – Exemplo de uma amostra executada por manufatura aditiva [Direct Industry, 2018].

3. METODOLOGIA

A parte experimental foi desenvolvida no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas do CT-UFRGS.

O sistema utilizado para realização dos ensaios de soldagem consiste de algumas das seguintes partes: um Tartilope V4, robô CNC de solda orbital, que possibilita o avanço com controle de velocidade e conserva a distância do bocal da tocha com a peça. Para que o sistema fique adequadamente alinhado, utilizou-se de um nível. Os cordões de solda foram realizados sobre a superfície livre (*bead-on-plate*) e posição plana (1G).

Os valores de velocidade de alimentação do arame, corrente e tensão foram obtidos pelo equipamento IMC Soldagem SAP4.01.

A Figura 3.1 mostra os equipamentos tartilope, Notebook, sistema de aquisição de dados usados no experimento.



Figura 3.1 – Robô CNC (Tartilope) à esquerda e SAP4.01 à direita.

O gás de proteção foi o AR+10%CO₂ com vazão de 15 l/min. A chapa usada para a soldagem é de aço SAE 1020 e o metal de adição é o ER70S-6, de 1,0 mm de diâmetro.

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros I_{a1} , I_{a2} e t_{a2} da fase de arco elétrico da curva de corrente de soldagem sobre a geometria do cordão de solda. Estes parâmetros foram escolhidos para obter maior estabilidade na transferência do metal. A Figura 3.2 mostra a forma de onda de corrente do processo MAG C-CC. Na tabela 3.1 são mostrados os parâmetros controláveis do processo, ou seja, aqueles fatores cujos valores foram sistematicamente variados durante a realização dos experimentos com o objetivo de estudar quantitativamente sua influência nas respostas.

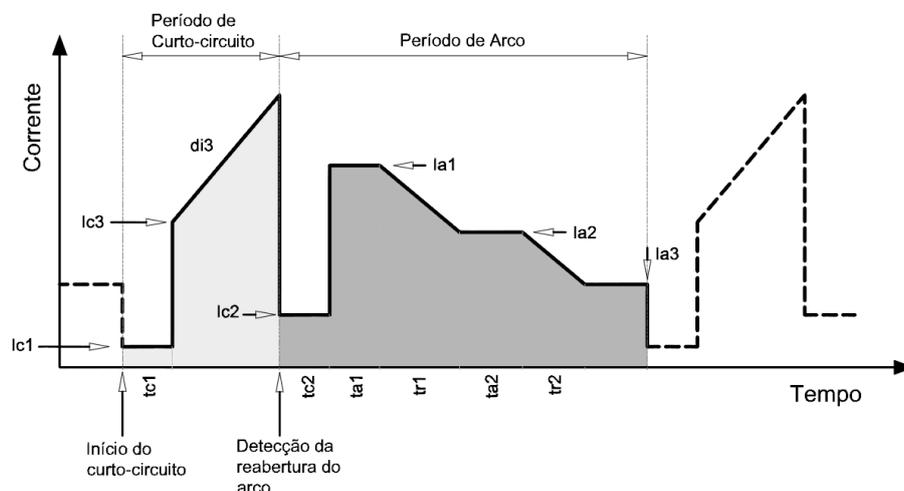


Figura 3.2 – Forma de onda para a corrente de soldagem no processo MAG CCC.

Tabela 3.1 – Níveis dos parâmetros de processo controláveis com seus respectivos valores.

Parâmetros Controláveis	Níveis		
	Mínimo	Intermediário	Máximo
	-1	0	1
Corrente Ia1 (A)	220	260	300
Corrente Ia2 (A)	60	90	120
Tempo ta2 (ms)	2	4	6

A Tabela 3.2 mostra os valores dos parâmetros da fase curto-circuito da curva de corrente de soldagem e os demais parâmetros que foram mantidos constantes durante a realização dos cordões de solda.

Tabela 3.2 – Parâmetros de processo da fase do Curto-Circuito.

Parâmetros Constantes (Fase Curto Circuito)	Valor
tc1 (ms)	1,0
Ic1 (A)	30
tc2 (ms)	0,5
Ic3 (A)	180
di_3/dt (A/ms)	80
Ucc (V)	8,0
Kr	1,15
tr1 (ms)	1,0
tr2 (ms)	0,1
Ia3 (A)	30

Os demais parâmetros que foram mantidos constantes durante a realização dos experimentos são apresentados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros de processos constantes

Parâmetros do Processo	Valores Constantes
Velocidade de Soldagem (Vs) (mm/s)	4,0
Ângulo de trabalho (neutro) (°)	0
Distância bico de contato peça (DBCP) (mm)	15
Vazão gás de proteção (l/min)	15
Posição de soldagem	Plana (1G)
Técnica	Linear

O projeto de experimentos Box-Behnken gerado para esse estudo é mostrado pela Tabela 4.1. Nota-se a combinação de três fatores: Ia1, Ia2, ta2, cada um em três níveis, de forma que os 15 experimentos possam fornecer uma resposta estatística confiável sobre a relação existente entre os parâmetros de processo controláveis e a geometria do cordão de solda. Também é importante mencionar que a coluna “Sequência padrão” significa que os cordões de solda foram executados em uma sequência aleatória, seguindo as premissas estatísticas.

Em avaliação, entendeu-se que um enfoque específico na Área de Metal Base fundido e na Área do Reforço seriam mais pertinentes na busca das melhores características para o empilhamento de cordões.

Finalizados os cordões, iniciou-se o processo de geração e tratamento das amostras.

Primeiramente é executado o corte transversal dos cordões de solda para depois as peças serem embutidas a frio utilizando resina acrílica.

Após serem embutidas a frio, realizou-se o lixamento das amostras. Começando por lixa de granulometria grossa de 80 até uma lixa fina de 1200 para obter amostras isentas de riscos.

Posteriormente, procedeu-se o ataque químico com Nital 10% para em seguida fazer as macrografias e medir as características geométricas do cordão de solda. As imagens macroscópicas serão obtidas usando a lupa do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas da UFRGS e estas serão avaliadas no software livre ImageJ.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.1 mostra o perfil de um cordão de solda obtido nos experimentos com o processo MAG CCC onde representa a área transversal fundida do metal base (Amb) e a área transversal de reforço do cordão de solda (Ar).

A Tabela 4.1 representa a sequência arbitrária dos ensaios conforme os três parâmetros de processo controláveis e com os valores obtidos para as características geométricas dos cordões de solda da área de reforço, área de metal base.

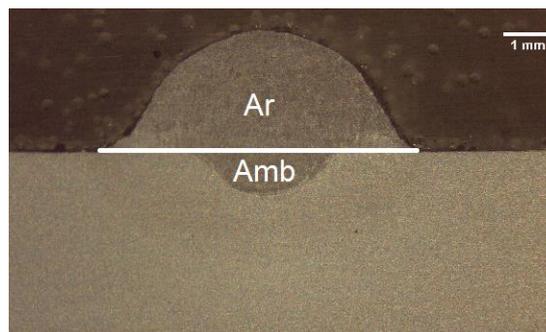


Figura 4.1 –Macrografia da seção transversal obtida do cordão de solda #10.

Tabela 4.1 - Parâmetros do Processo MAG C-CC (matriz de experimentos) e as respostas.

Sequência	Sequência padrão	la1 (A)	la2 (A)	ta2 (ms)	Ar (mm ²)	Amb (mm ²)
#1	5	220	90	2,0	8,87	1,272
#2	1	220	60	4,0	9,46	1,51
#3	3	220	120	4,0	7,62	0,85
#4	7	220	90	6,0	8,67	1,45
#5	8	300	90	6,0	10,51	1,92
#6	12	260	120	6,0	10,62	2,09
#7	11	260	60	6,0	9,11	1,29
#8	13	260	90	4,0	10,20	1,71
#9	15	260	90	4,0	10,36	2,09
#10	2	300	60	4,0	10,33	1,81
#11	9	260	60	2,0	9,50	1,62
#12	14	260	90	4,0	10,13	2,01
#13	4	300	120	4,0	12,32	2,02
#14	10	260	120	2,0	9,23	2,06
#15	6	300	90	2,0	11,39	1,81

Para obter os resultados (Ar, Amb) da tabela 4.1, foi realizado o corte dos corpos de prova, embutimento com resina acrílica, lixamento e ataque com Nital 10%. Após esse processo, as amostras foram medidas no software ImageJ.

Na Figura 1A do Apêndice estão as macrografias dos 15 cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz de experimentos Box-Behnken.

Na Figura 4.2, apresentam-se os resultados de áreas de reforço e do metal base. Observa-se as variações das áreas do reforço desde 7,6 mm² até 12,3 mm², para a faixa de valores variados dos parâmetros controláveis. A segunda resposta independente avaliada é a área do metal base, também, apresenta variação desde 0,9 mm² até 2,1 mm².

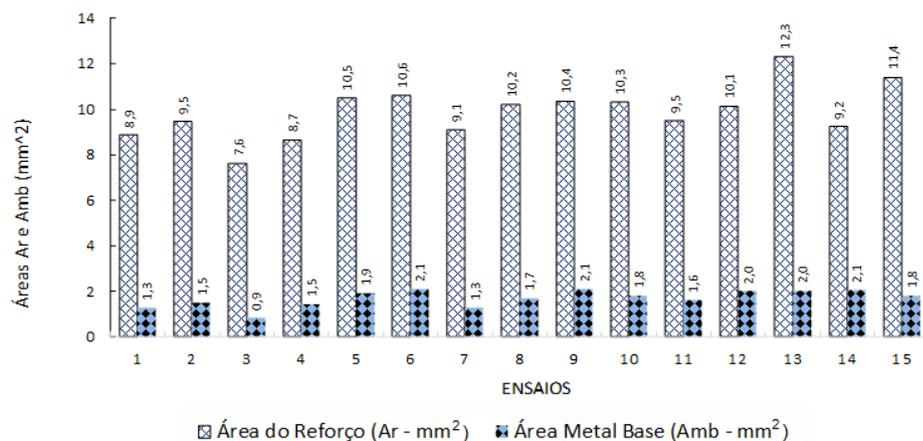


Figura 4.2 – Valores da Área do Reforço e Área do Metal Base

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos (linear e quadrático) dos fatores principais empregados e as interações de dois fatores sobre as respostas observadas, estas foram (parâmetros) submetidas à análise de variância.

Através do *software Statistica*®, os dados da Tabela 4.1 foram processados para a análise de qual parâmetro e/ou interação exerce efeito nas respostas (Ar e Amb). 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 *Valor-p*, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

As seções a seguir apresentarão a tabela ANOVA, o gráfico de Pareto, gráficos de interação, da superfície de resposta, do contorno da superfície de resposta. Eles mostrarão as influências dos parâmetros principais e suas combinações na resposta, e quais deles são significativos.

4.1 Resultados Área de Reforço

Para avaliação da significância dos parâmetros avaliados (la1, la2, ta2) no experimento e as interações sobre as respostas (Ar) foram submetidas a Análise de Variância (ANOVA). Na Tabela 4.2 estão presentes os resultados avaliados para a área de reforço (Ar). Nota-se que la1 foi o fator significativo com uma contribuição de 65,90% da resposta acompanhado da interação la1·la2 com 19,60% e em terceiro com apenas 4,24% a interação entre la2·ta2.

Tabela 4.2 – Resultados da Análise de Variância realizada para área de reforço.

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p	Contribuição %
Modelo	17,7853	9	1,9761	10,98	0,0080	95,18%
la1 (A)	12,3132	1	12,3132	68,40	0,0000	65,90%
la2 (A)	0,2426	1	0,2426	1,350	0,2980	1,30%
ta2 (ms)	0,0008	1	0,0008	0,000	0,9480	0,00%
la1 (A)·la1 (A)	0,0013	1	0,0024	0,010	0,9120	0,01%
la2 (A)·la2 (A)	0,2224	1	0,2714	1,510	0,2740	1,19%
ta2 (ms)·ta2 (ms)	0,4366	1	0,4366	2,430	0,1800	2,34%
la1 (A)·la2 (A)	3,6615	1	3,6615	20,34	0,0060	19,60%
la1 (A)·ta2 (ms)	0,1149	1	0,1149	0,640	0,4610	0,62%
la2 (A)·ta2 (ms)	0,7921	1	0,7921	4,4	0,0900	4,24%
Erro	0,9000	5	0,1800			
Falta de ajuste	0,8722	3	0,2907	20,92	0,0460	
Erro puro	0,0278	2	0,0139	*	*	
Total	18,6854	14				

Nota: SQ: Soma dos Quadrados; GDL: Graus de Liberdade; MQ: Média dos Quadrados;

A Tabela 4.2 mostra a ANOVA e, também, a contribuição de cada fator na resposta (Ar). Na Figura 4.3 são plotadas no gráfico de Pareto os valores de contribuição de cada fator. É interessante avaliar a curva em linha preta contínua, que é o percentual acumulado de todos os fatores, onde 85,5% são representados pela corrente la1 e a interação das correntes la1-la2.

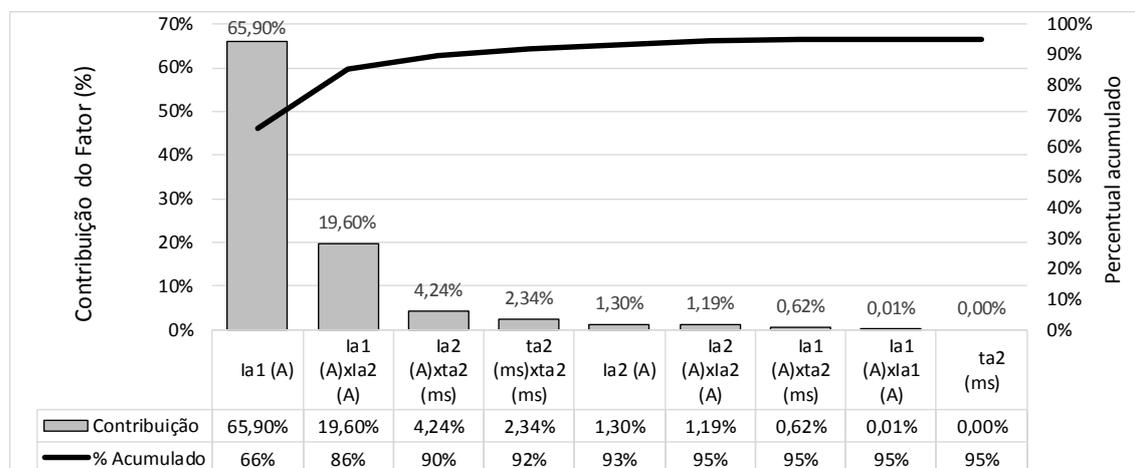


Figura 4.3 – Gráfico de Pareto da contribuição do fator sobre a área do reforço.

Usualmente a forma da relação existente entre a variável resposta e os fatores do processo é desconhecida. Para o desenvolvimento do modelo matemático (polinômio de segundo grau) para a resposta, foi considerada a significância de cada variável e suas interações. Os coeficientes de regressão para cada variável e suas interações foram estimados utilizando unidades não codificada, o que resultou na Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Ar (mm}^2\text{)} = & 15,9 - 0,0239 \cdot \text{la1 (A)} - 0,1769 \cdot \text{la2 (A)} + 0,566 \cdot \text{ta2 (ms)} \\
 & - 0,000016 \cdot \text{la1 (A)} \cdot \text{la1 (A)} - 0,000301 \cdot \text{la2 (A)} \cdot \text{la2 (A)} - 0,0860 \cdot \text{ta2 (ms)} \cdot \text{ta2 (ms)} \\
 & + 0,000797 \cdot \text{la1 (A)} \cdot \text{la2 (A)} - 0,00212 \cdot \text{la1 (A)} \cdot \text{ta2 (ms)} + 0,00742 \cdot \text{la2 (A)} \cdot \text{ta2 (ms)}
 \end{aligned}
 \quad (4.1)$$

Foi possível comparar valores da corrente I_{a1} e I_{a2} em relação a área de reforço utilizando t_{a2} igual a 4 ms. Quando é utilizada a corrente $I_{a1} = 300$ A, verificou-se um aumento da área de reforço quando aumentamos a corrente I_{a2} . O mesmo não se comprova no momento que é utilizado I_{a2} igual a 220 A e aumentamos I_{a2} . Nesta configuração ocorre o inverso, quando é aumentada a corrente I_{a2} , pode-se atingir valores inferior a 8 mm^2 de área de reforço. Portanto, caso alguma situação exija uma maior região de reforço, é aconselhável usar corrente $I_{a1} = 300$ A e $I_{a2} = 120$ A. A Figura 4.4 demonstra os resultados.

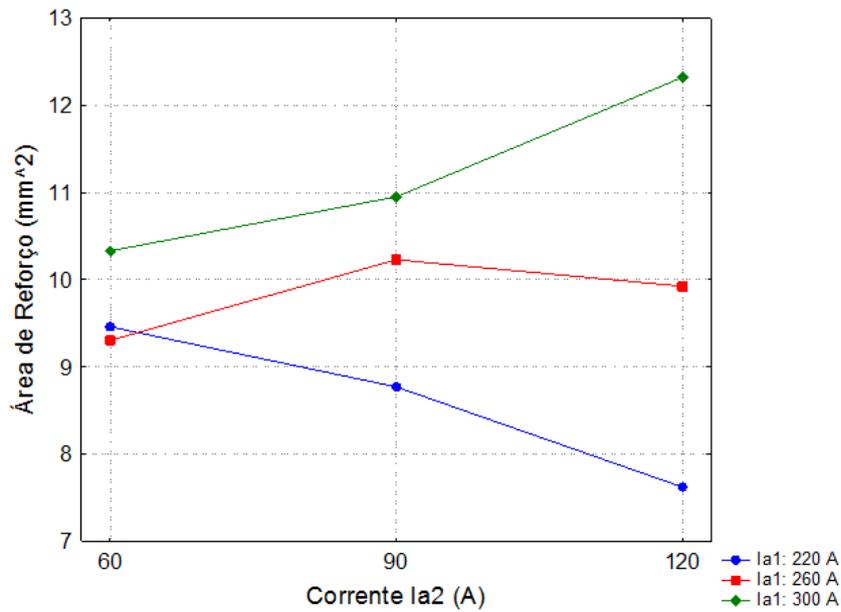


Figura 4.4 – Efeito da interação I_{a1} - I_{a2} sobre a Área de Reforço do cordão de solda.

4.2 Resultados Área do Metal Base

Os resultados da Área do Metal Base ($A_{mb} - \text{mm}^2$) foram analisados através da Análise de Variância (ANOVA), e a Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos. Dessa Tabela (4.3) obtém-se que a corrente I_{a1} é o principal fator com contribuição de 40,75%, seguido do quadrado da corrente I_{a1} e em menor proporção a interação da corrente I_{a1} - I_{a2} . Os resultados são plotados no gráfico da Figura 4.5. Nota-se pela curva da porcentagem de acumulado, que os fatores da corrente I_{a1} e o quadrado da corrente I_{a1} representam mais de 50% da contribuição de resposta.

O polinômio de segundo grau para a área de metal base ($A_{mb} - \text{mm}^2$) em termos dos valores não codificados dos fatores e interação é expressa na Equação 4.2 de regressão.

$$\begin{aligned}
 A_{mb} (\text{mm}^2) = & -8,52 + 0,0802 \cdot I_{a1} (\text{A}) - 0,0261 \cdot I_{a2} (\text{A}) + 0,026 \cdot t_{a2} (\text{ms}) \\
 & - 0,000169 \cdot I_{a1} (\text{A}) \cdot I_{a1} (\text{A}) - 0,000132 \cdot I_{a2} (\text{A}) \cdot I_{a2} (\text{A}) - 0,0133 \cdot t_{a2} (\text{ms}) \cdot t_{a2} (\text{ms}) \\
 & + 0,000181 \cdot I_{a1} (\text{A}) \cdot I_{a2} (\text{A}) - 0,00021 \cdot I_{a1} (\text{A}) \cdot t_{a2} (\text{ms}) + 0,00150 \cdot I_{a2} (\text{A}) \cdot t_{a2} (\text{ms})
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Tabela 4.3 – Resultados da Análise de Variância realizada para Área de Metal Base.

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	Valor-p	Contribuição
Modelo	1,3766	9	0,152955	1,51	0,339	73,08%
la1 (A)	0,76756	1	0,76756	7,57	0,04	40,75%
la2 (A)	0,07801	1	0,078012	0,77	0,421	4,14%
ta2 (ms)	0,00002	1	0,000018	0	0,99	0,00%
la1 (A)·la1 (A)	0,24913	1	0,270334	2,67	0,164	13,22%
la2 (A)·la2 (A)	0,0487	1	0,051921	0,51	0,506	2,58%
ta2 (ms)·ta2 (ms)	0,0104	1	0,010404	0,1	0,762	0,55%
la1 (A)·la2 (A)	0,18922	1	0,189225	1,87	0,23	10,04%
la1 (A)·ta2 (ms)	0,00116	1	0,001156	0,01	0,919	0,06%
la1 (A)·ta2 (ms)	0,0324	1	0,0324	0,32	0,596	1,72%
Erro	0,50718	5	0,101436			
Falta de ajuste	0,42691	3	0,142304	3,55	0,228	
Erro puro	0,08027	2	0,040133	*	*	
Total	1,88377	14				

Nota: SQ: Soma dos Quadrados; GDL: Graus de Liberdade; MQ: Média dos Quadrados

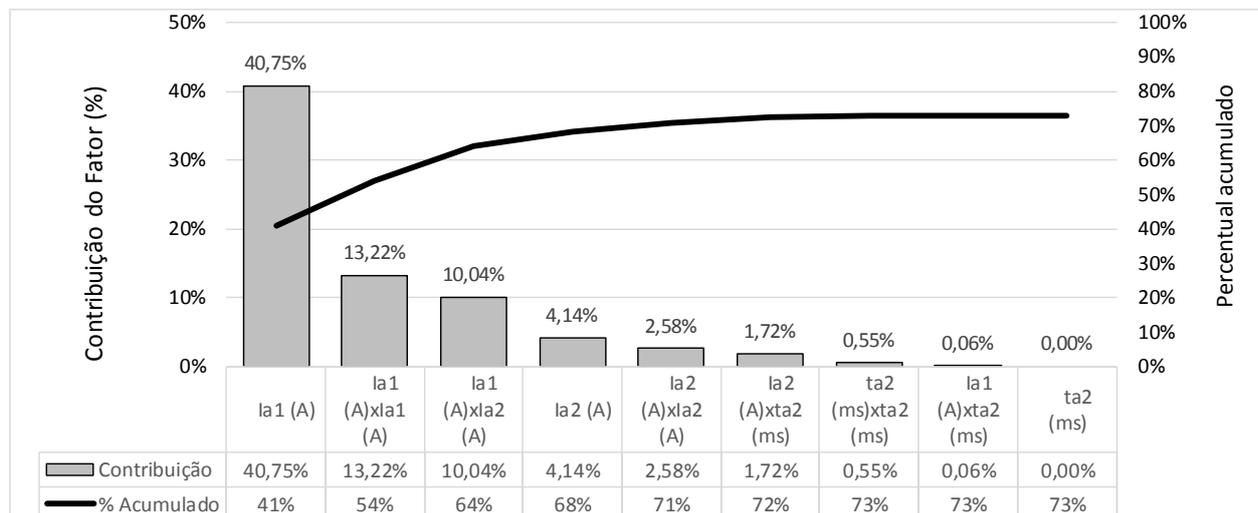


Figura 4.5 – Gráfico de Pareto da contribuição do fator sobre a área de metal base.

A figura 4.6a representa a superfície de resposta (3D) da área fundida do metal base em função de la1·la2 e ta2 = 4,0 ms. Entretanto, a Figura 4.6b mostra o contorno da superfície de resposta (2D) da área fundida do metal base em função de la1·la2 e ta2 = 4,0 ms.

Tanto na Figura 4.6a como na Figura 4.6b, pode-se observar que para um valor de corrente la1 maior que 280 A e uma corrente la2 maior que 90 A, obtém-se o maior valor para a área de metal base fundido que ultrapassa o valor de 2 mm². Também é possível atingir valores menores que 1,2 mm² utilizando corrente la1 = 220 A e la2 = 120 A, para ta2 = 4,0 ms.

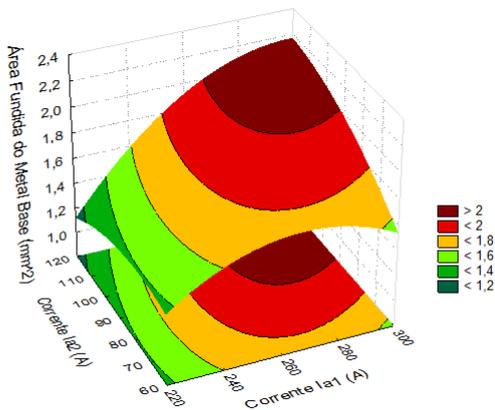


Figura 4.6a – Superfície de resposta 3D da área do metal base em função de $I_{a1} \cdot I_{a2}$ e $t_{a2} = 4,0$ ms.

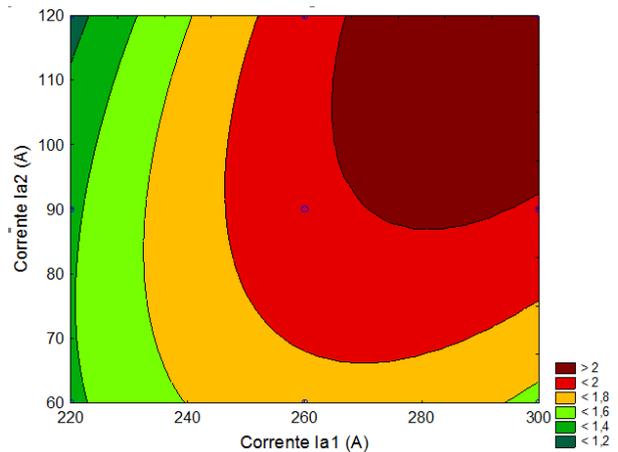


Figura 4.6b – Contorno da superfície de resposta (2D) da área do metal base em função de $I_{a1} \cdot I_{a2}$ e $t_{a2} = 4,0$ ms.

4.3 O Método “Desirability”

Derringer e Suich (1980) encontraram uma das soluções para otimizar várias respostas, desenvolvendo a função de conveniência ou método *desirability*, que tem sido amplamente utilizada desde então na indústria. Esta função é baseada na ideia de que a qualidade de um produto ou processo que tem muitos recursos é completamente inaceitável, se um deles estiver fora de um limite "desejável". O seu objetivo é encontrar condições que garantam a conformidade com os critérios de todas as respostas envolvidas e, ao mesmo tempo, fornecer o melhor valor na resposta conjunta sendo esse o valor desejável. Isto é conseguir converter as múltiplas variáveis respostas em uma única, combinando as respostas individuais em uma função composta, seguida por sua otimização.

A função desejabilidade ou de conveniência de Derringer permite encontrar as condições experimentais (níveis de fator) para alcançar, simultaneamente, o valor alvo (objetivo) para todas as variáveis avaliadas, incluindo as prioridades dos pesquisadores durante o processo de otimização.

A metodologia geral é primeiro converter a resposta em desejabilidade (desirability) individual (d_i) que varia de 0 a 1 (menor conveniência para maior conveniência). As pontuações de cada desejabilidade (desirability) individual para os valores previstos para cada variável dependente são então combinadas em função de conveniência geral ou desejabilidade global chamada de $D = \sqrt[m]{d_1 \cdot d_2 \dots d_m}$ (onde m é o número de respostas avaliadas) e pode variar de 0 a 1.

Foi determinada a função desejabilidade global para as respostas objetivos $A_{mb} = 1,3$ mm² e $A_r = 9,0$ mm², através do software Minitab®. Desta forma, quanto mais próximo de 1 for o valor obtido, mais próximo estarão os valores ótimos relacionados a cada resposta individual. O ponto ótimo encontrado pela avaliação dos resultados experimentais foi caracterizado como um ponto que possui um valor de $D = 0,9983$ para a desejabilidade global mostrando que é possível obter $A_{mb} = 1,3$ mm² e $A_r = 9,0$ mm², para os valores de $I_{a1} = 222$ A, $I_{a2} = 62$ A e $t_{a2} = 5,7$ ms.

A Figura 4.7 representa os valores dos parâmetros de controle que permitem obter os valores $A_{mb} = 1,3$ mm² e $A_r = 9,0$ mm² do cordão de solda.

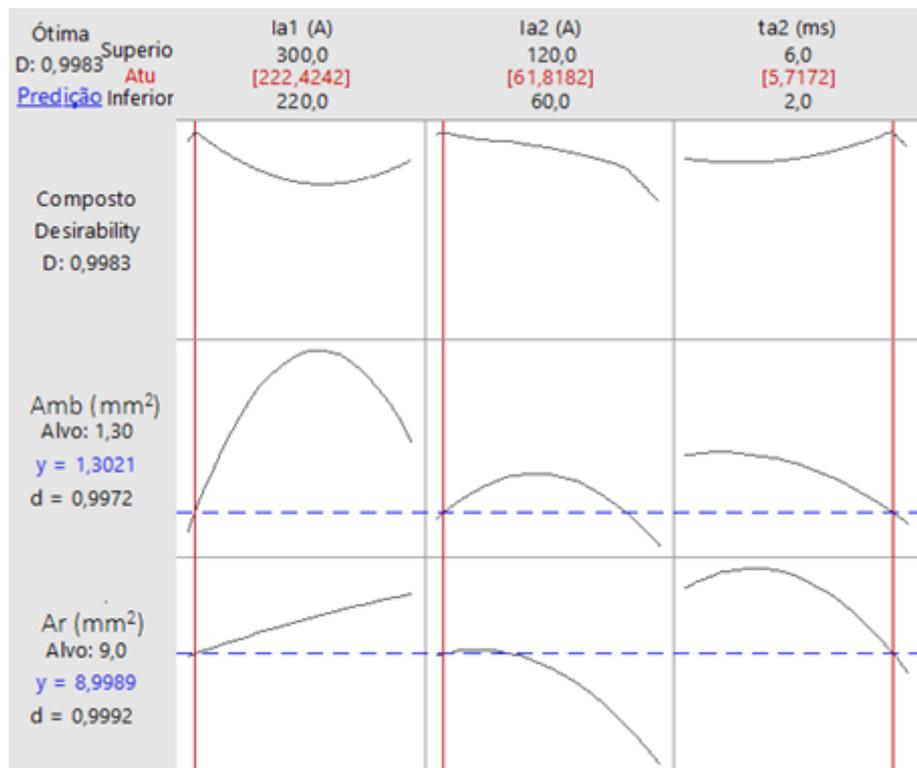


Figura 4.7 – Valores dos parâmetros de controle que permitem obter os valores alvos Amb = 1,3 mm² e Ar = 9,0 mm² do cordão de solda – valores não codificados.

4.4. Validação do Modelo de Regressão

A validação de um modelo matemático é sua comprovação, dentro de seu domínio de aplicabilidade e para uma faixa satisfatória de precisão, coerente com o sistema real e a sua aplicação prevista. Para isso, foi definida a equação 4.3 para o cálculo do Erro (%).

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Valor observado} - \text{Valor estimado}}{\text{Valor estimado}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Para a obtenção da área de reforço estimado e da área de metal base estimado, fez-se uso da equação de regressão para ambas as áreas (Equações 4.1 e 4.2) onde os valores utilizados nas equações e nos ensaios, estão na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados para validação.

Sequência	la1(A)	la2(A)	ta2(ms)
#1V	222	62	5,7
#2V	220	60	4,0
#3V	220	120	4,0

Na Figura 2A do Apêndice estão as imagens dos cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz Box-Behnken para validação.

A Tabela 4.5 e 4.6 apresenta o percentual de erro entre os valores observados e os valores estimados.

Tabela 4.5 – Percentagem do erro para área de reforço.

Sequência	Ar Observado (mm ²)	Ar Estimado (mm ²)	Erro (%)
#1V	9,26	9,00	2,84
#2V	9,42	9,47	0,53
#3V	8,34	7,91	5,43

Tabela 4.6 – Percentual de erro para área do metal base.

Sequência	Amb Observado (mm ²)	Amb Estimado (mm ²)	Erro (%)
#1V	1,18	1,29	8,57
#2V	1,21	1,35	10,37
#3V	1,22	1,12	8,91

4.5 Resultado Manufatura aditiva

Após a avaliação dos resultados, realizou-se o empilhamento de três cordões de solda conforme Figura 4.8.

Os parâmetros utilizados para realizar o empilhamento dos cordões estão na sequência #1V da Tabela 4.4.

Uma característica que fica evidente na Figura 4.8 é baixa penetração em relação à altura do reforço. Esse aspecto é benéfico pois auxilia para que os cordões empilhados possam aumentar a altura e não acabem por tomar uma forma achatada. A Tabela 4.3 mostra os resultados da área de reforço (Ar), altura do reforço (H), penetração (P), área do metal fundido (Amb).

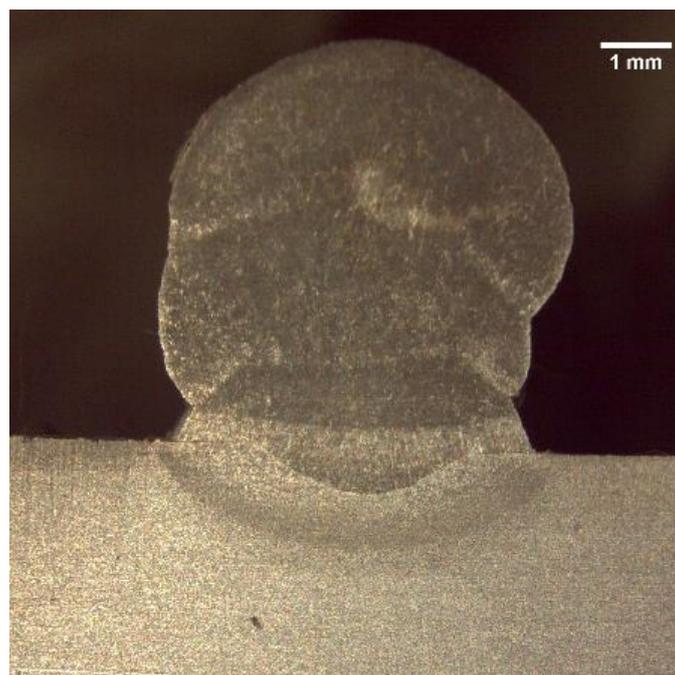


Figura 4.8 – Macrografia do empilhamento de cordões de solda.

Tabela 4.3 – Resultados da manufatura aditiva.

Ar (mm ²)	Amb (mm ²)	H (mm)	P (mm)
27,84	1,23	5,75	0,67

5. CONCLUSÃO

Concluídos todos os experimentos, foi possível verificar que para área de reforço, a corrente la1 é o parâmetro mais significativo com 65,9%, seguido da interação la1·la2 com 19,6% e da interação la2·ta2 com 4,24%, respectivamente. Em relação aos valores da área de metal base fundida, a corrente la1 também foi significativa, mas com 40,75%, seguida da interação quadrática de la1 com 13,22% e a interação de la1·la2 com 10,04%.

Na validação do modelo matemático, foi possível perceber que de acordo com os valores observados e os valores estimados através da equação de regressão, chegou-se a variações entre 0,53% e 10,37.

No empilhamento dos cordões, obteve-se baixa penetração em relação à altura do reforço.

O método de desejabilidade mostrou-se eficiente para alcançar condições que assegurem a conformidade com os critérios de todas respostas envolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Direct Industry, <http://www.directindustry.com/pt/prod/dmg-mori/product-5973-1597452.html> acesso 20/10/2018

Dutra, J. C.; Silva, R. G. **“MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente – Sistemas CCC e STT”** – Fundamentos. 2008.

Fogliatto, A.A.B.; Gonzalez, A.R.; Mazzaferro, J.A.E.; Freitas, D.A.; Machado, I.G. **“Análise da Influência dos Parâmetros do Processo MIG/MAG Curto-Circuito Controlado sobre a Geometria do Cordão de Solda utilizando um Projeto de Experimento Composto”**. In: CONSOLDA 2012 - XXXVIII Congresso Nacional de Soldagem, Ouro Preto - MG, 2012.

George Derringer; Ronald Suich (1980) **Simultaneous Optimization of Several Response Variables**, Journal of Quality Technology, 12:4, 214-219, DOI: [10.1080/00224065.1980.11980968](https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968)

IMC Soldagem. **“Manual de Instruções”**, DIGIPlus A7, 2ª edição, 2011.

IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, **“Manual do sistema de aquisição de dados SAP v4.01”**, 2005.

Lancaster, J. F. **“The Physics of Welding”**. ed J F Lancaster (Oxford: Pergamon). 1984.

Machado, I. G. **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**. Editado pelo Autor. Porto Alegre. 1996.

Montgomery, D.C. **“Design and Analysis of Experiments”**, 7th ed., J. W. & Sons Inc., 2009.

Myers, R.; Montgomery, D.C. **“Response Surface Methodology”**, 2nd ed. J. W. & Sons Inc., 2002.

Possebon S. **“Utilização de MIG/MAG Curto-Circuito Controlado na Soldagem e Operação”**, Dissertação de Mestrado, PP3GM, p114. 2009.

Scotti, A., Ponomarev, V., Yago, H. **“Soldagem MIG/MAG”**, Artliber, 2008.

Silva, R. H. G. **“Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe Raiz”** 2005.

Wainer, E. **“Soldagem – Processos e Metalurgia”**. Editora Edgard Blucher Ltda, 2002.

Willians, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G; Colegrove, P. **Wire + Arc Additive Manufacturing**, Materials Science and Technology, v. 32, 2016

APÊNDICE

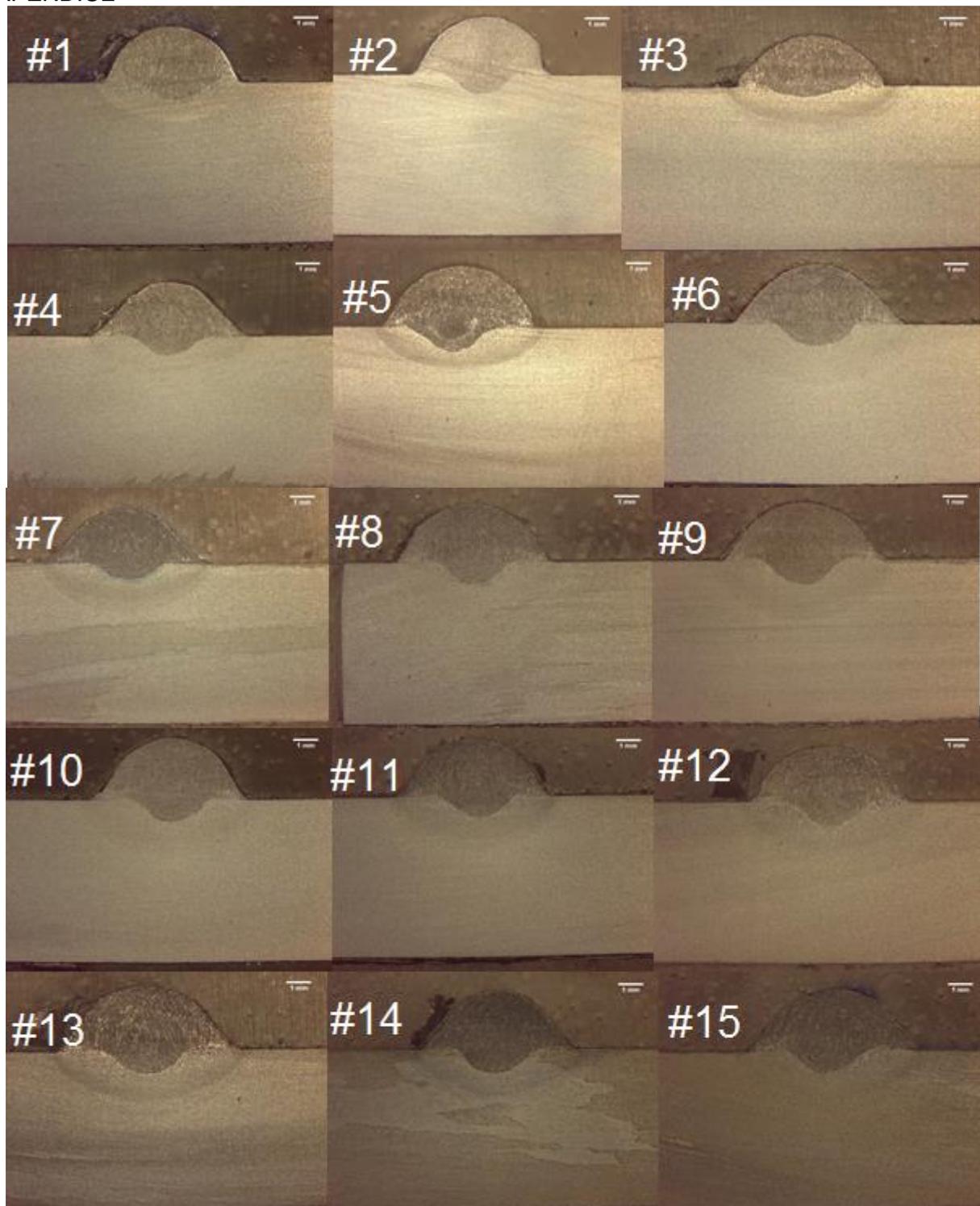


Figura 1A – Imagem dos 15 cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz de experimentos Box-Behnken (Tabela 4.1).

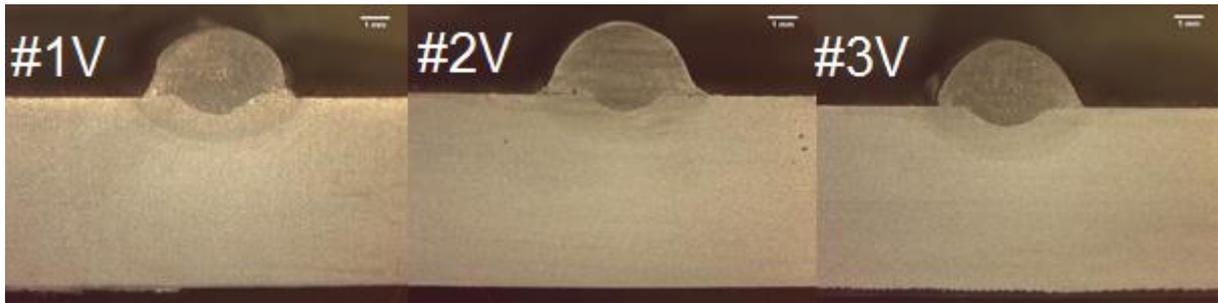


Figura 2A – Fotos dos cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz de experimentos Box-Behnken para validação (Tabela 5.1).

Tabela 1A – Parâmetros utilizados para validação.

Sequência	Ia1(A)	Ia2(A)	ta2(ms)
#1V	222	62	5,7
#2V	220	60	4,0
#3V	220	120	4,0