

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

EFEITO DOS PARÂMETROS DA POLARIDADE NEGATIVA DO PROCESSO MIG/MAG-
PV NO EMPILHAMENTO DE CORDÕES DE SOLDA

por

André Pandolfi Endres

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 de 2018.

EFEITO DOS PARÂMETROS DA POLARIDADE NEGATIVA DO PROCESSO MIG/MAG-
POLARIDADE VARIÁVEL NO EMPILHAMENTO DE CORDÕES DE SOLDA

por

André Pandolfi Endres

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado discernimento, saúde e condições para que este trabalho pudesse ser realizado.

À minha família, que sempre foi e será minha base para tudo, à minha mãe Inês que me deu esperança e força, mesmo quando eu mesmo duvidei de mim, ao meu pai Agilberto que jamais deixou que faltasse nada fosse material ou em forma de apoio, ao meu irmão Marcos que tem sido o melhor companheiro que eu poderia ter escolhido neste longo caminho para trilhar meu sonho.

Ao LS&TC-UFRGS, principalmente ao professor Arnaldo Ruben Gonzalez pela orientação excepcional e grande atenção que destinou para que eu pudesse realizar este trabalho.

À minha namorada Kelly de Quadros Cerbaro e sua família por ter sido um porto seguro, onde pude sempre obter apoio incondicional em tudo e principalmente por toda a compreensão e confiança depositados.

Aos meus familiares, amigos e conhecidos que, de qualquer forma, influenciaram positivamente para que este momento chegasse.

Sem mais para isto: Muito Obrigado!

ENDRES, A. **Efeito dos parâmetros da polaridade negativa do processo MIG/MAG PV no empilhamento de cordões 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 principal objetivo é avaliar os efeitos dos parâmetros da polaridade negativa, variação de Tempo e Corrente, sobre a geometria do cordão de solda (sobre a superfície livre), discutindo a influência de cada um e suas consequências no processo, particularmente para empilhamento de cordões de solda. Fatores avaliados são os de caráter geométrico tais como, área do reforço e área do metal base fundido. É empregado o processo de soldagem MAG com Polaridade Variável, utilizando-se arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e gás ativo de proteção Ar+10%CO₂, para a execução dos cordões de solda em chapas de aço SAE 1020. Para tal, realizou-se um modelo seguindo o projeto de experimentos Box-Behnken onde as três variáveis mais significativas são selecionadas para a confecção de 15 cordões. Feito isso, passa-se à avaliação e otimização dos resultados obtidos em cada cordão e assim, é aplicada a Metodologia da Superfície de Respostas que apontou as condições mais assertivas para que as características pretendidas fossem alcançadas. Buscando a combinação dos três parâmetros para uso simultâneo, o método da superposição gráfica de resposta é empregado. No momento em que a parte prática e a parte matemática-estatística são comparadas, testa-se a robustez do método. Observa-se o erro experimental, determinado entre o valor observado e o valor estimado, está compreendido entre 4,6% até 10,4%.

PALAVRAS-CHAVE: MIG/MAG Polaridade Variável; Parâmetros Negativos, Empilhamento de cordões; Projeto Experimento Box-Behnken; Metodologia da Superfície de Respostas.

ENDRES, A. **Efeito dos parâmetros da polaridade negativa do processo MIG/MAG PV no empilhamento de cordões 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.

ABSTRACT

The main objective is to evaluate the effects of the parameters of the negative polarity, Time and Current variation, on the geometry of the weld bead (on the free surface), discussing the influence of each one and its consequences in the process, particularly for stacking soldering cords. Factors evaluated are those of geometric character such as, reinforcement area and area of the molten base metal. The MAG welding process with Variable Polarity is used, 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. For this, a model is used in accordance with the Box-Behnken experiments project where the three most significant variables are selected for the preparation of 15 strands. Once this is done, we proceed to the evaluation and optimization of the results obtained in each cord and thus, the Response Surface Methodology are applied which pointed out the most assertive conditions so that the desired characteristics are reached. Searching for the combination of the three parameters for simultaneous use, the graphical overlap method is used. At the moment the practical part and the mathematical-statistical part are compared, the robustness of the method is tested. The experimental error, determined between the observed value and the estimated value, is between 4.6% and 10.4%.

KEYWORDS: MIG/MAG Variable Polarity; Negative Parameters, Stacking of cords; Box-Behnken Experiment Design; Response Surface Methodology

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1. Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável	1
2.2. Metodologia da Superfície de Resposta e Projeto de Experimentos Box-Behnken.....	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	6
4.1 Otimização de Parâmetros de Processo.....	10
4.1.1 Múltiplas Respostas – Gráficos de Superposição	10
5. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	13
6. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE.....	16

1. INTRODUÇÃO

Com o advento dos processos de fabricação, principalmente após a consolidação do processo de produção em grande escala, a necessidade de se unir materiais de mesma ou de diferente natureza se fez cada vez mais necessário. Neste contexto, a soldagem surgiu como um grande aliado para a elaboração de projetos e criação de produtos que, cada vez mais, demandam pesquisa e tecnologia, principalmente na área dos metais.

Existe hoje, no setor industrial, uma predominância, quando falamos em processo de soldagem, na utilização do método de arco elétrico, sendo MIG/MAG largamente empregado, tanto para revestimento quanto preenchimento. Segundo Nascimento e Vilarinho o processo MIG/MAG foi patenteado em 1930 por Hobart e Devers e chamado de GMAW (Gas Metal Arc Welding), e hoje, este é mundialmente difundido e largamente empregado, sendo o principal método de soldagem utilizado, segundo Miranda e Ferraresi. Tal realidade se dá pela grande gama de vantagens que o processo provém, tais como a alta taxa de produtividade, uma considerável e indiscutível qualidade do cordão de solda aliados a um custo moderado de produção do processo.

Com o constante aumento de demanda de produtividade, surgiu a necessidade de que o processo de soldagem se tornasse mais objetivo e a otimização e constante melhora do processo MIG/MAG fez com que sua variante denominada Polaridade Variável, chamada assim em processos onde o pulso possui onda quadrada (também conhecida como Corrente Alternada, mais empregada em ondas de característica senoidal), acabasse se difundindo no processo produtivo. Este processo tem como característica principal a alta taxa de fusão de material, justamente algo necessário para a realização do estudo deste trabalho onde o objetivo é o empilhamento de cordões de solda, procedimento muito importante para manufatura aditiva [Baumgaertner, 2017].

Existe, em contrapartida, um porém no processo MIG/MAG PV que é justamente o ajuste dos seis parâmetros da curva de corrente, (I_p , T_p , I_b , T_b , I_n , T_n), correntes e tempos de pico, base e negativos, para que sejam gerados cordões de solda em condições satisfatórias, tal ajuste é alcançado pelo método de tentativa e erro até o ponto em que se atinge uma lacuna de valores de parâmetros que atendam as expectativas [Baumgaertner, 2017].

Basicamente as variáveis alteradas em cada um dos parâmetros deste trabalho são: Tempo do pulso negativo (T_n) em (ms), Corrente do pulso negativo (I_n) em (A), e Tempo de corrente de base (T_b) em (ms).

Particularmente, neste caso, busca-se principalmente duas características do cordão de solda, a área fundida do metal base e a área do reforço, parâmetros importantes quando se busca avaliar boas condições de empilhamento, sobreposição de sucessivos cordões de solda verticalmente, visto que existe necessidade de que a cada cordão, obtenha-se a maior altura possível do mesmo, o que resultará em maior produtividade. Para tal, o experimento do processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para empilhamento de cordões de solda visa controle acurado das geometrias dos cordões. E é este método que proporciona o melhor controle de penetração, menor diluição e ainda como vantagem, uma menor distorção [Baumgaertner, 2017].

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável

O processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados atualmente para a produção de cordões de solda em grandes extensões, como no revestimento de superfícies, resistentes ao desgaste, à corrosão, ao calor, entre outros. Todavia, normalmente alguns problemas são encontrados, principalmente no revestimento realizado por soldagem, como por exemplo, excesso de fusão que produz elevada diluição e distorções. De acordo com Tong et al., 2001, o processo de soldagem MIG/MAG com a utilização de uma corrente alternada seria o ideal para resolver algumas das dificuldades listadas acima.

Na literatura são definidas duas nomenclaturas distintas: corrente alternada pulsada (CA) ou polaridade variável (PV). Segundo Nascimento e Vilarinho, 2006, as duas formas de nomenclatura estão relacionadas com a utilização da polaridade negativa no processo de soldagem. Entretanto, a corrente alternada está vinculada à forma de onda senoidal, onde a parte positiva e a parte negativa são muito próximas, de igual grandeza. Logo, a expressão polaridade variável está mais relacionada com formas de onda com variação entre as polaridades, positiva e negativa na curva de corrente de soldagem, podendo conter maior tempo e intensidade em sua parte positiva, ou do mesmo modo na negativa.

A polaridade negativa altera de maneira drástica o comportamento do processo MIG/MAG, modificando a distribuição de energias entre o eletrodo e a peça. Segundo Kim et al., 2007, na Figura 2.1, no processo com corrente contínua constante e eletrodo positivo (CCEP), a maior concentração de calor acontece na peça. No entanto, em eletrodo negativo (CCEN), essa situação se inverte sendo grande parte do calor concentrado no eletrodo, e com isso ocorre aumento da taxa de fusão, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura na peça e redução da penetração.

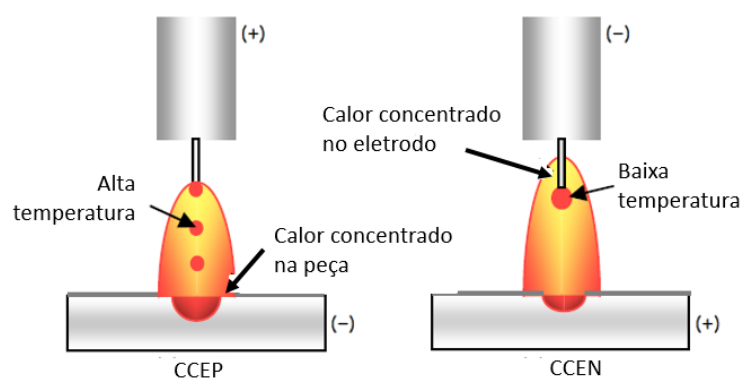


Figura 2.1 – Comportamento do arco elétrico em CCEP e CCEN. Adaptado de Kim et al., 2007

Segundo Tong et al., 2001, a utilização do eletrodo negativo (CCEN) comparado com o MIG/MAG convencional apresenta menores valores de temperatura na peça. Consequência disto, verificaram uma redução da deformação da peça final, assim como uma menor penetração. Este benefício também foi comprovado por Park et al., 2009, os quais verificaram a redução na temperatura da peça soldada com o aumento da utilização do eletrodo negativo.

No processo MIG/MAG PV, é possível obter maior taxa de fusão, aliada à baixa temperatura no metal base gerando grandes instabilidades no arco elétrico e na transferência do metal desde a ponta do eletrodo à peça, na grande maioria das situações impossibilitando a utilização de CCEN no processo MIG/MAG. A instabilidade é explicada por Talkington, 1998 principalmente pelo modo de transferência metálica, que se limita ao modo globular para CCEN. Mas para minimizar a instabilidade do arco e assim utilizar os benefícios do eletrodo negativo, como a redução da penetração, redução da temperatura no metal base, é aplicado ao processo o eletrodo positivo, o qual traz consigo a estabilidade do arco elétrico. De acordo com Joseph et al., 2003, cada polaridade apresenta um balanço de calor, mas combinadas possibilitam controle do calor da peça e eletrodo, assim como o controle da penetração, e segundo Dutra et al., 2015, esta combinação gera baixas temperaturas aliadas a aumentos da taxa de produtividade no processo de soldagem.

2.1.1. Formas de ondas do Processo MIG/MAG PV

A curva de corrente do processo de MIG/MAG com polaridade variável apresenta três partes: pulso positivo, base positiva e pulso negativo, conforme a Figura 2.2.

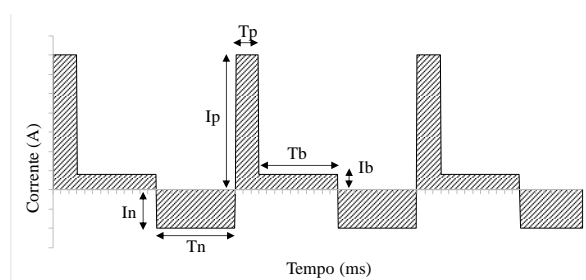


Figura 2.2 - Curva de corrente MIG/MAG Polaridade Variável.

A forma de onda da Figura 2.2 é composta de seis parâmetros independentes entre si, corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p), corrente de base (I_b), tempo de base (T_b), corrente negativa (I_n) e tempo de corrente negativa (T_n), tornando o entendimento da variação desses parâmetros um procedimento muito complexo.

A forma da onda de corrente é um tópico bastante explorado atualmente, Farias et al., 2005 estudou três variações de forma de onda, buscando entender a relação entre a forma da curva e a geometria do cordão de solda. As ondas estudadas estão relacionadas na Figura 3.

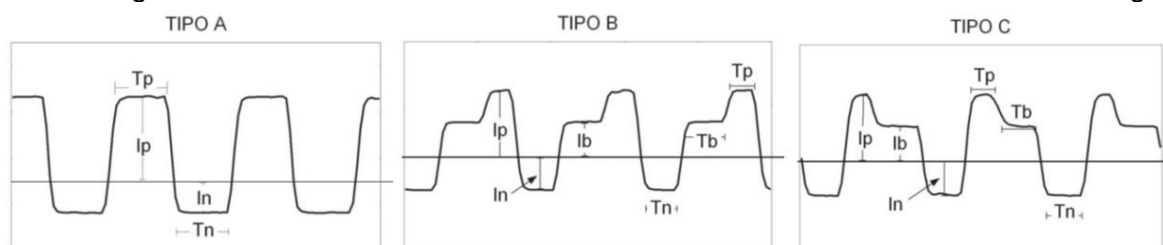


Figura 2.3 – Formas de onda estudadas por Farias et al., 2005.

Segundo Nascimento et al., 2008, a corrente de base é fundamental para as mudanças severas de polaridade, e evita salpicos no processo de soldagem.

Os três tipos de ondas contemplam, a não utilização do tempo de base (tipo A), utilização do tempo de base anterior ao da corrente de pico positiva (tipo B) e a corrente de base posterior ao pico positivo (tipo C). Os resultados obtidos mostraram que a forma da onda não tem influência significativa sobre a geometria do cordão de solda, mas sim existe efeito significativo da interação da geometria do cordão de solda com os parâmetros da polaridade negativa.

2.2. Metodologia da Superfície de Resposta e Projeto de Experimentos Box-Behnken

Nos últimos anos, o projeto de experimentos tem sido frequentemente aplicado para otimizar métodos analíticos devido às suas vantagens, como a redução no número de ensaios que precisam ser executadas, o que resulta em menor consumo e consideravelmente menos trabalho de laboratório, Ferreira et al., 2007. Embora muitos métodos de projeto experimental estejam disponíveis para otimizar a qualidade do produto e o processo de fabricação. O método aplicado consiste em planejamento fatorial e Metodologia da Superfície de Resposta. Nesse método são realizados projetos robustos e otimização de processos de produtos usando métodos estatísticos. Box e Wilson, 1951, usaram o MSR para explorar as relações entre variáveis independentes e respostas mediante a estatística. Quando muitos fatores e interações afetam a resposta desejada, o MSR é uma ferramenta eficaz para otimizar o processo.

O MSR é uma forma de visualização que permite aos engenheiros compreender melhor as características de um processo e a relação entre eles, fornecendo suporte para avaliar pontos na região, Khuri, 2006. Na maioria dos problemas de MSR, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. O objetivo do MSR é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação funcional entre eles, Montgomery, 2013. Como as características de qualidade de um processo de produção podem não ser lineares com as variáveis de entrada, o polinômio de segunda ordem é empregado em algumas regiões das

variáveis independentes se houver curvatura no sistema. Uma grande quantidade de evidências empíricas mostrou que o modelo quadrático (ou, muito ocasionalmente, algum polinômio de ordem superior) é geralmente suficiente para a região ótima, Myers & Montgomery, 2002. A superfície de resposta pode ser usada graficamente para fazer julgamentos sobre a relação entre variáveis independentes (ou de controle) e respostas. O conhecimento dessa relação é importante para encontrar a combinação de tratamento que forneça a resposta desejada Hinkelmann & Kempthorne, 2007. Existem muitas aplicações importantes na concepção, desenvolvimento e formulação de novos produtos, bem como na melhoria dos designs de produtos existentes, Myers & Montgomery, 2002. O projeto Box-Behnken, é um projeto de experimentos que pode ser usado na MSR, foi proposto usando apenas três níveis de cada fator e ao mesmo tempo com um número "razoável" de pontos experimentais, Hinkelmann & Kempthorne, 2007.

O projeto de experimentos Box-Behnken, 1960, é uma classe de projetos de segunda ordem rotacional ou quase rotativos baseados em modelo fatorial incompletos de três níveis. O projeto Box-Behnken aplicado neste trabalho é para três fatores, e na Tabela 3.1 se mostram os valores de cada combinação de fatores (tratamentos). O projeto consiste em três partes de quatro execuções. Dentro de cada parte, dois fatores são organizados em um projeto fatorial completo de dois níveis, enquanto o nível do terceiro fator é definido como zero. Os pontos situam-se na superfície de uma esfera centrada na origem do sistema de coordenadas e tangenciais ao ponto médio de cada aresta do cubo. O projeto Box-Behnken para três fatores requer apenas 12 execuções (k) mais as réplicas no ponto central (C_0). Em geral, o número de pontos experimentais é dado por $2k(k - 1) + C_0$.

Além disso, cada fator é estudado em apenas três níveis, uma característica importante em algumas situações experimentais. O projeto Box-Behnken não contém combinações em que todos os fatores estejam em níveis mais altos ou mais baixos, eles podem ser úteis para evitar experimentos sob condições extremas, para os quais resultados insatisfatórios podem ocorrer. Por outro lado, eles não são indicados para situações em que se deseja conhecer as respostas nos extremos, isto é, nos vértices do cubo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

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

A fonte de soldagem utilizada foi a DIGIPlus A7 450. Utilizou-se um Tartilope V4, robô CNC de soldagem orbital, onde foi fixada a tocha de soldagem para que se garantisse um avanço com controle de velocidade e a manutenção da distância do bocal da tocha com a peça, tudo foi devidamente alinhado com auxílio de um nível para que o sistema ficasse horizontal.

A aquisição de dados ficou por conta do equipamento da IMC Soldagem, o SAP4.01 que coletou os valores de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e desta forma mostrou em forma gráfica as condições do processo em tempo real.

A Figura 3.1 mostra ilustrativamente os equipamentos utilizados no experimento.



Figura 3.1 – Equipamentos utilizados, esquerda SAP e direita Tartilope e Fonte.

Os cordões de solda foram realizados sobre a superfície livre (*bead-on-plate*) e posição 1G, em chapas de aço SAE 1020 150x60x6,35 mm e o metal de adição é o ER70S-6, de 1 mm de diâmetro. O gás de proteção foi o Ar+10%CO₂ com vazão de 15 l/min.

A curva da corrente de polaridade variável utilizada neste trabalho (Figura 2.2) é composta de parâmetros (fatores) independentes, dos quais os três deles foram variados, I_n , T_n e T_b . Os demais parâmetros I_p , T_p e I_b foram mantidos constantes para todos os cordões de solda realizados.

Com o objetivo de analisar o comportamento da polaridade negativa foram variados a corrente negativa (I_n) entre -100, -70 e -40 A, o tempo de corrente negativa (T_n) entre 5, 10 e 15 ms. O tempo de corrente de base positiva (T_b) foi variado entre 5, 10 e 15 ms. A determinação dos níveis de variação de I_n , T_n e T_b , assim como os parâmetros mantidos constantes no experimento foram: intensidade da corrente de pico (I_p) de 300 A, tempo de pico positivo (T_p) de 2,5 ms, e para a não extinção do arco elétrico, a corrente de base (I_b) foi mantida constante em 30 A, conforme a Tabela 3.2. Com esses valores para cada combinação foram obtidos estabilidade do arco elétrico, mediante o ajuste da velocidade de alimentação do arame.

Os demais parâmetros do processo de soldagem foram mantidos constantes conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do Processo de Soldagem

Parâmetros do Processo	Valores Constantes
Velocidade de Soldagem (V_s) (cm/min)	18
Ângulo de deslocamento da tocha (empurrando)(°)	-10
Distância bico de contato peça (DBCP) (mm)	18
Vazão gás de proteção (l/min)	15

Tabela 3.2 – Parâmetros da Curva de Corrente do Processo MIG/MAG Polaridade Variável

Parâmetros	Símbolo	Nível		
		Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (+1)
Descrição				
Corrente negativa (A)	I_n	-100	-70	-40
Tempo de corrente negativa (ms)	T_n	5	10	15
Tempo de corrente de base positiva (ms)	T_b	5	10	15
Corrente de pico (A)	I_p	Constante = 300		
Tempo de pico positivo (ms)	T_p	Constante = 2,5		
Corrente de base (A)	I_b	Constante = 30		

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

O primeiro passo foi realizar o corte transversal dos cordões afim de se obter trechos de aproximadamente 1,5 cm de comprimento de cordão. Depois as peças foram embutidas a frio utilizando resina.

No momento em que curaram os embutimentos, iniciou-se o processo de lixa das amostras, que partiram de uma granulometria grossa de 60 até uma lixa 1200 para que a superfície ficasse com boas condições de ataque.

No passo seguinte ocorreu o ataque com Nital 10% que revelou as características da estrutura de forma macrográfica.

As imagens macroscópicas tiradas no microscópio foram processadas no software livre ImageJ e diversos parâmetros foram medidos 3 vezes cada, gerando assim uma média, que é mais confiável, para enriquecer o trabalho.

Finalmente os dados escolhidos para o processamento do experimento foram: Área do Reforço (Ar) e a Área do Metal Base fundido (Amb).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4.1 se apresenta a sequência aleatorizada de soldagem dos corpos de prova de acordo com a combinação dos níveis dos fatores controláveis e as respostas consideradas neste trabalho (Ar e Amb).

Tabela 4.1 – Sequência (aleatorizada) e combinação dos parâmetros segundo o projeto de experimentos Box-Behnken para a soldagem dos corpos de prova, e as respostas.

Ensaio	In (A)	Tn (ms)	Tb (ms)	Ar (mm ²)	Amb (mm ²)	Diluição (%)
1	-100	10	5	23,970	1,746	6,8
2	-70	10	10	15,520	1,375	8,1
3	-100	10	15	15,874	1,128	6,6
4	-40	5	10	17,594	0,881	4,8
5	-40	15	10	10,497	0,541	4,9
6	-70	10	10	15,139	1,448	8,7
7	-70	15	5	15,884	1,814	10,2
8	-40	10	15	9,386	0,692	6,9
9	-40	10	5	11,677	1,294	10,0
10	-70	5	15	10,093	0,814	7,5
11	-70	15	15	12,712	0,971	7,1
12	-100	15	10	21,550	1,633	7,0
13	-70	5	5	21,317	2,952	12,2
14	-70	10	10	14,276	1,627	10,2
15	-100	5	10	15,020	1,794	10,7

Os resultados da tabela 4.1 são provenientes da medição das características geométricas de cada cordão, no ImageJ após seu corte, embutimento e lixamento. Além disso, cada medida foi tomada três vezes, para posterior cálculo da média, conferindo maior precisão aos dados.

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

Na figura 4.1, estão as imagens de alguns dos 15 cordões gerados pelo experimento Box-Behnken, as macrografias de todos os cordões estão na Figura 3A do apêndice.



Figura 4.1– Cordões de solda gerados pelo método Box-Behnken com as combinações 7, 8 e 11

A figura 4.2 mostra o gráfico das Áreas dos Reforços de cada amostra pareada com a medida de suas Áreas de Metal Base fundido. Pode-se observar que as proporções entre estas medidas são diferentes, ou seja, a variação dos parâmetros (para cada tratamento) de soldagem influencia as respectivas quantidades de metal base fundido e metal de adição depositado, em consequência, existem diferentes diluições para cada tratamento.

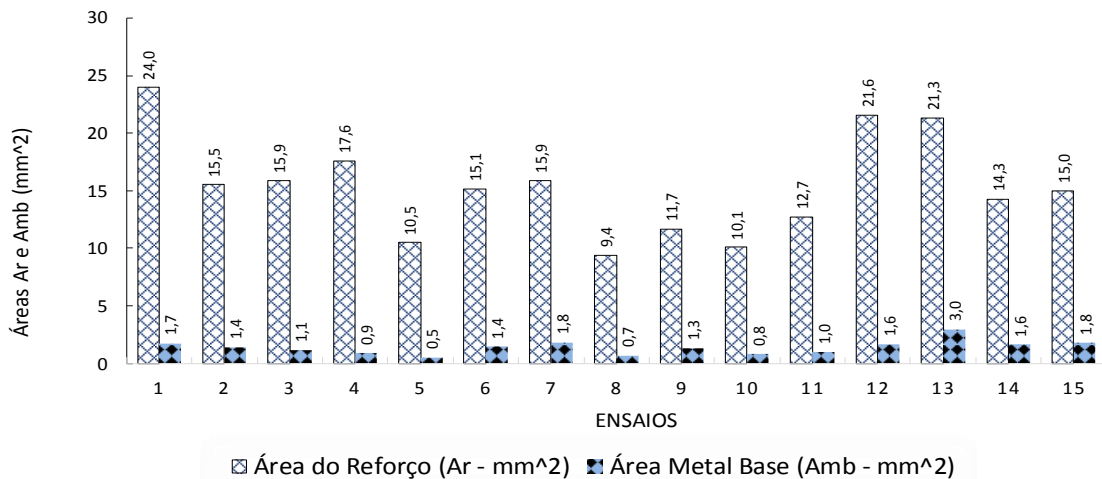


Figura 4.2 – Valores de Área do Reforço e da Área do Metal Base fundido

A Análise de Variância (ANOVA) da Área do Reforço (Ar) em função dos parâmetros principais e interações avaliados é apresentada na Tabela 1A do apêndice. Da ANOVA para a área do reforço do cordão e foi possível constatar que: In foi o fator mais importante com 35,4% de significância seguido de Tb com 29,2% e em terceiro a interação In*Tn com 17,7%.

A partir das ANOVA da Tabela 1A, obtém-se o gráfico de Pareto mostrado na Figura 4.3, no qual a corrente de pulso negativo (In – A), apresenta efeito significativo com uma proporção de 35,4%, seguida do tempo do pulso de base Tb e posteriormente interação entre o tempo do pulso negativo (Tn) e o tempo do pulso de base (Tb).

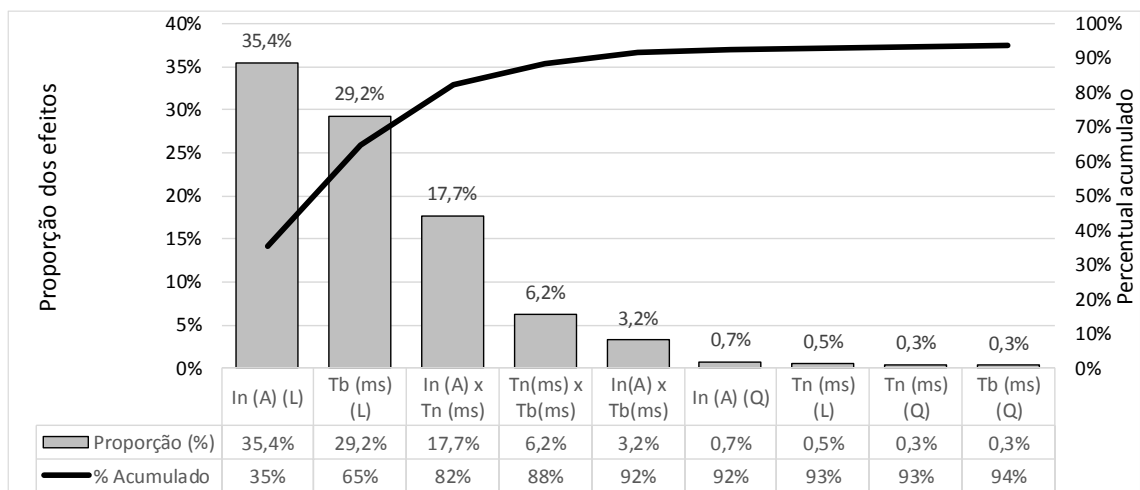


Figura 4.3 – Gráfico de Pareto proporção dos efeitos sobre a área do reforço.

Mediante a equação de regressão de segundo grau pode obter-se a relação da variável de resposta em função dos parâmetros independentes, relação geralmente desconhecida, utilizados no projeto de experimentos de Box-Behnken.

Com base nos resultados obtidos a partir do projeto de experimentos Box-Behnken, um modelo de regressão de segunda ordem para a área do reforço (Ar – mm²) foi desenvolvido em função dos valores reais (não-codificado) dos fatores e interações avaliados, Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Ar (mm}^2\text{)} = & 35,2 + 0,127 \cdot \text{In (A)} - 2,864 \cdot \text{Tn (ms)} - 0,381 \cdot \text{Tb (ms)} + 0,00078 \cdot \text{In (A)} \cdot \text{In (A)} \\
 & + 0,0192 \cdot \text{Tn (ms)} \cdot \text{Tn (ms)} - 0,0183 \cdot \text{Tb (ms)} \cdot \text{Tb (ms)} - 0,02271 \cdot \text{In (A)} \cdot \text{Tn (ms)} \quad (4.1) \\
 & + 0,00968 \cdot \text{In (A)} \cdot \text{Tb (ms)} + 0,0805 \cdot \text{Tn (ms)} \cdot \text{Tb (ms)}
 \end{aligned}$$

Para a área do reforço, ocorrem efeitos contrários variando-se o tempo da corrente negativa (T_n), considerando T_n igual a 5 ms, existe um aumento da Área do Reforço enquanto decresce o valor da corrente negativa (I_n). Enquanto que, para T_n de 10 ou 15 ms, e a diminuição da corrente negativa gera também diminuição da área do reforço, estas características podem ser verificadas na Figura 1A nos apêndices no gráfico da interação dos fatores para a área do reforço em relação à interação de $I_n \cdot T_n$.

Na Figura 4.4a se mostra a superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do reforço em função da interação $T_n \cdot I_n$ para o valor constante de $T_b = 10$ ms. Entretanto, na Figura 4.4b mostra o contorno da superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do reforço em função da interação $T_n \cdot I_n$ para $T_b = 10$ ms. Avaliando as Figuras 4.4a, 4.4b, para uma área de reforço de mm^2 é necessário selecionar os parâmetros, tempo da corrente negativa (T_n) de 15 ms e a corrente negativa (I_n) de 100 A, com $T_b = 10$ ms. No entanto, para um valor mínimo da corrente negativa (I_n) de 40 A e mantendo constante $T_n = 15$ ms e $T_b = 10$ ms, pode ser obtida uma área de reforço menor que 10 mm^2 .

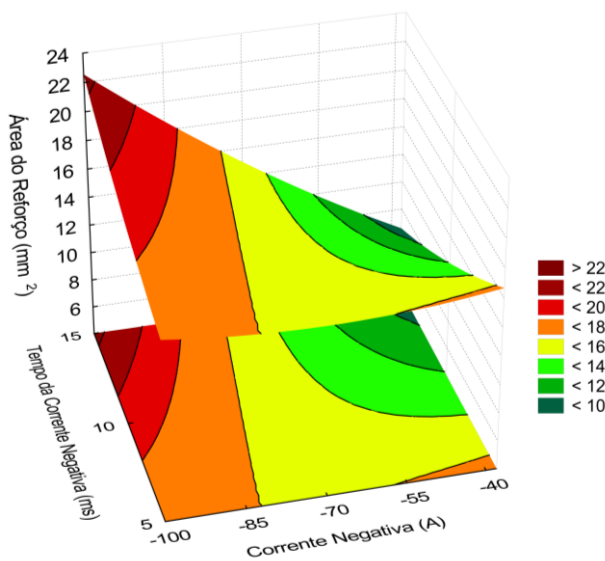


Figura 4.4a – Superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do reforço em função da interação $T_n \cdot I_n$ para $T_b = 10$ ms

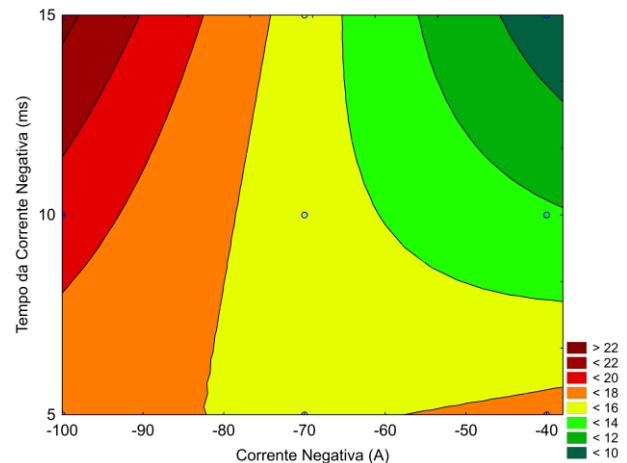


Figura 4.4b – Contorno de Superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do reforço em função da interação $T_n \cdot I_n$ para $T_b = 10$ ms

A análise da Área do Metal Base fundido foi realizada, inicialmente, avaliando-se a ANOVA para determinar a significância dos parâmetros principais e suas interações. A Tabela 2A da análise de variância (ANOVA) da área do metal base fundido ($A_{mb} - \text{mm}^2$), encontra-se no apêndice. Da Tabela da ANOVA obtém-se que o principal fator é o tempo de base T_b com um efeito sobre a A_r de 43,9%, seguido da corrente do pulso negativo (I_n) com 29,3% e em menor proporção a interação $T_n \cdot T_b$ com 8,3%. Esses efeitos são plotados e mostrados no gráfico de Pareto da Figura 4.5, existe predominância de 43,43% do tempo de base T_b , seguido da corrente negativa (I_n) com 20,6%. Nota-se que a corrente negativa quadrática e a interação dos tempos negativo e de base com efeitos de proporção semelhante, ficando próximos de 8,5%.

A equação de regressão para a área do metal base ($A_{mb} - \text{mm}^2$) em termos dos valores reais (não codificado) dos fatores e interações é expressa na Equação 4.2.

$$\begin{aligned}
 A_{mb} (\text{mm}^2) = & 2,27 - 0,0633 I_n (\text{A}) - 0,248 T_n (\text{ms}) - 0,296 T_b (\text{ms}) - 0,000385 I_n (\text{A}) I_n (\text{A}) \\
 & + 0,00303 T_n (\text{ms}) T_n (\text{ms}) + 0,00314 T_b (\text{ms}) T_b (\text{ms}) - 0,00030 I_n (\text{A}) T_n (\text{ms}) \quad (4.2) \\
 & + 0,00003 I_n (\text{A}) T_b (\text{ms}) + 0,01295 T_n (\text{ms}) T_b (\text{ms})
 \end{aligned}$$

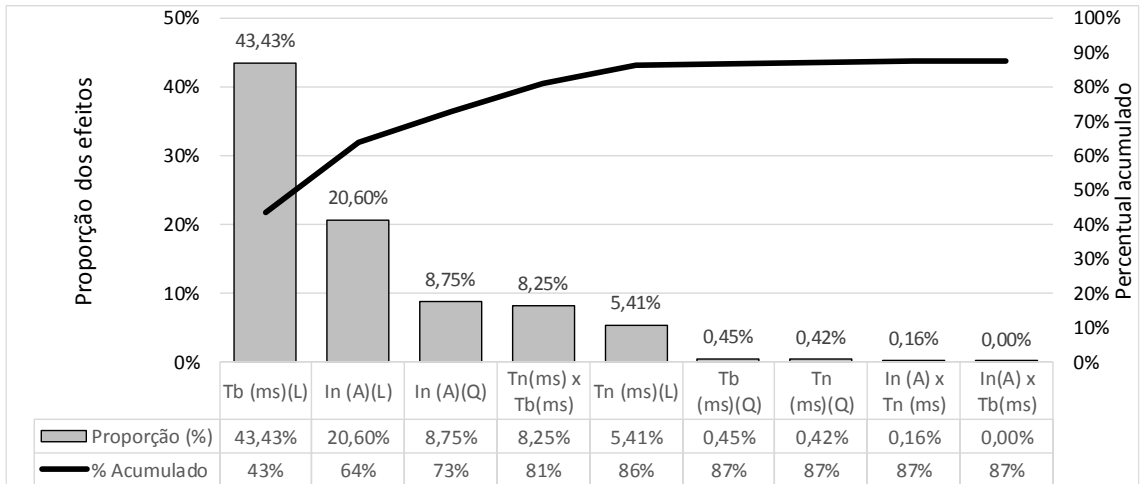


Figura 4.5 – Gráfico de Pareto da estimativa da proporção dos efeitos por fator para a área do metal base fundido (Amb).

Na Figura 4.6 (In, Tn e Tb) mostra os efeitos dos parâmetros principais e observar-se que a área do metal base sofre um pequeno acréscimo quando a corrente negativa (In) reduz em módulo de -100 a -70 A, e, para uma redução do valor da corrente negativa em módulo, de -70 A a -40 A a área Amb passa a decrescer de aproximadamente 1,6 para 0,9 mm². O tempo da corrente negativa (Tn) reduz a área Amb conforme aumenta seu valor. Para Tn = 5 ms, Amb tem valor aproximado de 1,6 mm², quando esse valor passa a 10 ms, a área Amb diminui para um valor para aproximadamente 1,3 mm² e chega a 1,2 mm² quando Tn é 15 ms. Entretanto, para o tempo de base, a área é a maior para o menor valor de Tb = 5 ms, alcançando a 2 mm²; para Tb = 10 ms, o valor já passa a ser 1,3 mm² e chega a 0,9 mm² quando Tb chega a 15 ms. Quanto maior for a Tb com a corrente de base (Ib = 30 A) constante, a peça não recebe calor porque a corrente de base é usada apenas para manter o arco elétrico [Gonzalez, 1997].

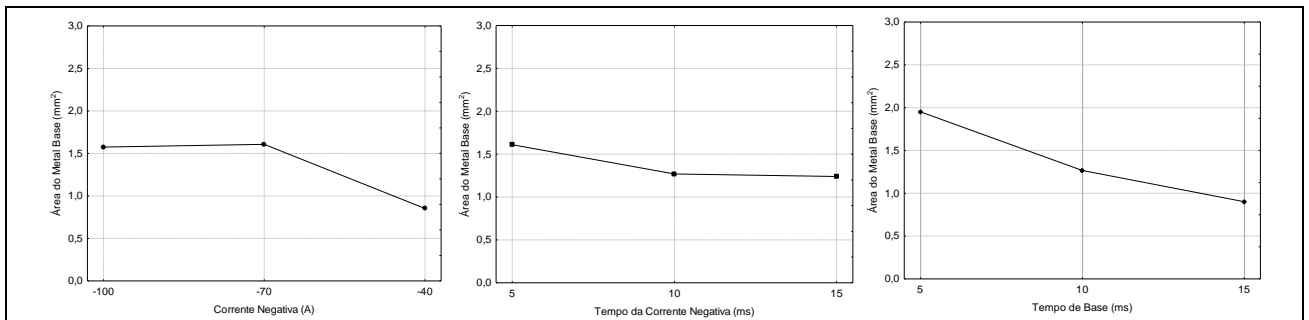


Figura 4.6 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais (In, Tn e Tb) sobre a área do metal base fundido.

A Figura 4.7a mostra o gráfico da superfície de resposta do valor esperado da área do metal base em função da interação do tempo da corrente negativa (Tn) e o tempo de base (Tb) para In = -70 A, e a Figura 4.7b mostra o gráfico de contorno obtido a partir dessa superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do metal base fundido em função da interação Tn*Tb para In = -70 A.

Na Figura 4.7a, 4.7b, pode observar-se que a maior área de metal base (Amb = 2,4 mm²) é possível obter para os seguintes parâmetros: In = -70 A, Tn = 5 ms e Tb 5 ms. Pode ser reduzida a área do metal base, de 2,4 para 1,2 mm², aumentando o tempo de base de 5 para 15 ms, e mantendo constante In = -70 A e Tn = 5 ms.

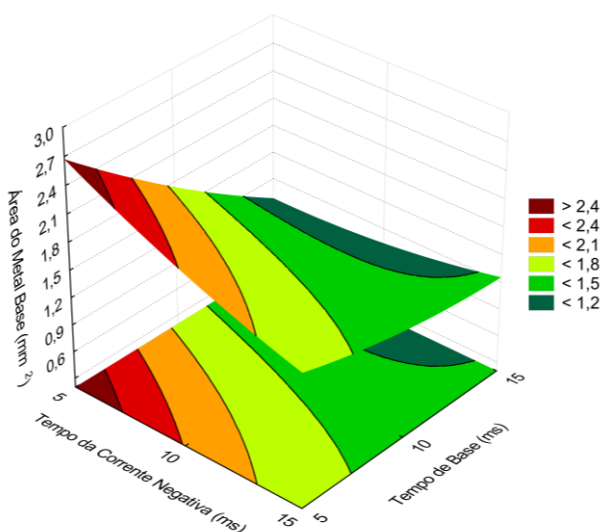


Figura 4.7a – Superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do metal base em função da interação $T_n \cdot T_b$, para $I_n = -70$ A

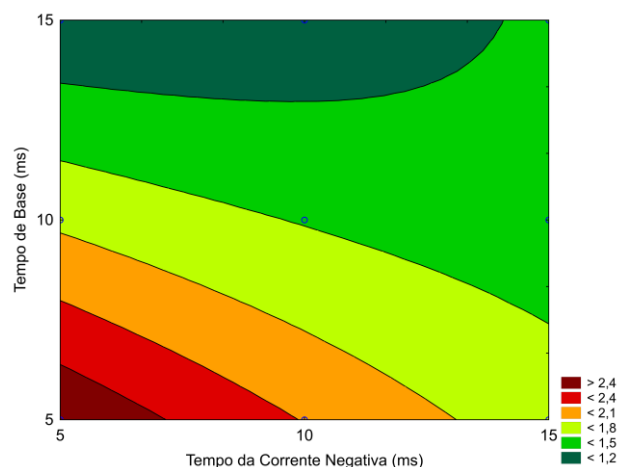


Figura 4.7b – Contorno da Superfície de resposta, mostrando o valor estimado da área do metal base em função da interação $T_n \cdot T_b$, para $I_n = -70$ A

4.1 Otimização de Parâmetros de Processo

A metodologia da superfície de resposta utiliza a equação de regressão para obter a superfície de resposta gráfico em 3D e o gráfico do contorno da superfície de resposta.

Analisando as respostas individuais apresentadas na MSR em função dos parâmetros escolhidos, observou-se que cada resposta tem efeitos diferentes de parâmetros e interações de parâmetros, cada um indica áreas no escopo de avaliação, onde se encontram as características desejadas ao experimento que se está realizando, estes resultados são previstos, e tidos como uma função da resposta. Quando o objetivo é obter, não só uma, mas várias condições que regem o processo, visando múltiplas respostas estimadas, pode ser feita a superposição dos gráficos.

A avaliação é feita tomando simultaneamente todas as respostas envolvidas e montar um modelo de superfície apropriado a cada resposta. Após é necessário encontrar os valores de parâmetros que otimizem todas as respostas dentro de um intervalo de valores que se esteja buscando.

4.1.1 Múltiplas Respostas – Gráficos de Superposição

Na análise da resposta individual foi apresentada a otimização em função dos parâmetros nos níveis avaliados. Foi observada que cada resposta apresenta efeito de parâmetros diferentes e interações, que indicam áreas na região de avaliação, onde é susceptível obter resultados desejáveis, o termo “desejável” pode ser uma função da resposta prevista no processo. No entanto, em muitos casos, o termo “desejáveis” é uma função de mais do que uma resposta. Portanto, quando o objetivo é obter o conjunto de condições do processo que forneça as múltiplas respostas estimadas alvo ou objetivo, os gráficos de contornos podem ser superpostos.

O procedimento resumido para poder avaliar simultaneamente múltiplas respostas envolvidas, primeiro é necessário construir um modelo de resposta de superfície apropriado para cada resposta, por exemplo, a área do reforço (A_r) e a área do metal base (A_{mb}). Seguidamente, é necessário tratar de determinar o conjunto de valores dos parâmetros que otimize todas as respostas no intervalo de valores desejados. Para estender o estudo sobre problemas de múltiplas respostas pode ser consultado Myers e Montgomery, 2002.

Os gráficos de contorno e superposição foram montados atendendo as seguintes faixas de valores: Área do Reforço entre 1,6 e 3 mm²; Área do Metal Base fundido entre 14 e 21 mm²; Cada um foi gerado fixando o tempo do pulso de base T_b em 5, 7 e 9 ms.

O primeiro, na Figura 4.8 teve seu tempo T_b fixado em 5 ms, a primeira condição de contorno é a área do reforço estipulada entre 14 e 21 mm² e também área do metal base (A_{mb}) entre 1,6 e 3 mm². A parte sombreada representa valores que de forma alguma não se encaixam na faixa de resposta pretendida, assim é válido apenas o montante de combinações da área clara. Percebe-se que para este T_b , se a corrente negativa (I_n) for maior que aproximadamente 90 A, não será possível obter resultado dentro do esperado, independente dos valores dos demais parâmetros.

O gráfico da Figura 4.9 representa a superposição das superfícies de resposta com os mesmos parâmetros, desta vez o tempo de base T_b passou a 7 ms. Porém, com a mudança de uma única variável, é possível obter uma grande variação na região de respostas desejadas. Utiliza-se então o valor máximo em módulo da corrente negativa ($I_n = -100$ A) desde que T_n seja menor que 7,6 ms, por exemplo.

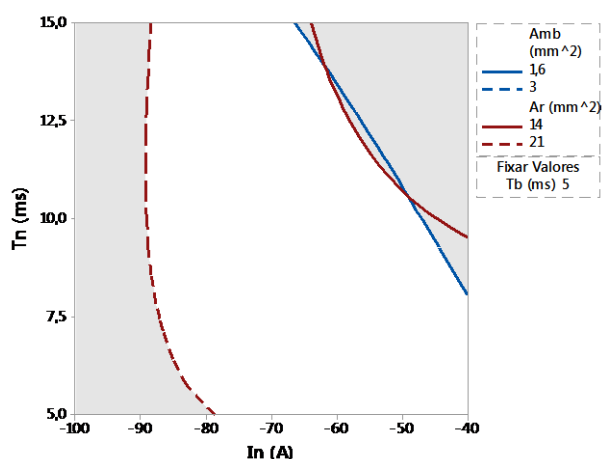


Figura 4.8 – Gráfico da superposição de fatores para A_{mb} e A_r em função I_n , T_n e com $T_b = 5$ ms.

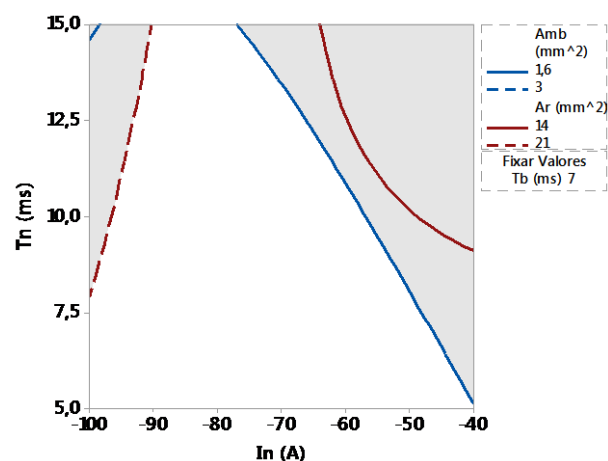


Figura 4.9 – Gráfico da superposição de fatores para A_{mb} e A_r em função I_n , T_n e com $T_b = 7$ ms.

A Figura 4.10 representa a superposição para o caso em que o tempo de base é 9 ms, e nessa região a resposta a área é reduzida e concentra-se próximo aos valores máximo em módulo da corrente negativa (I_n) e os valores menores do tempo negativa (T_n).

A partir da avaliação detalhada das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, determina-se que os parâmetros para a validação dos modelos estatísticos de regressão, mediante a realização de cordões de solda com esses parâmetros, e na Tabela 4.2 são apresentados esses valores.

Desta forma, foram selecionados parâmetros para se gerar os cordões para validação. Foram mantidos os parâmetros fixos do método Box-Behnken, (tais como I_p , T_p , I_b , velocidade de soldagem, ângulo da tocha, vazão do gás de proteção) e regiões do gráfico superposição de contornos, selecionadas para que os parâmetros utilizados permanecessem na região clara, onde as características de A_{mb} e A_{ref} fossem aferidas e comparadas.

A tabela 4.2 mostra os parâmetros variáveis escolhidos para a realização destes cordões.

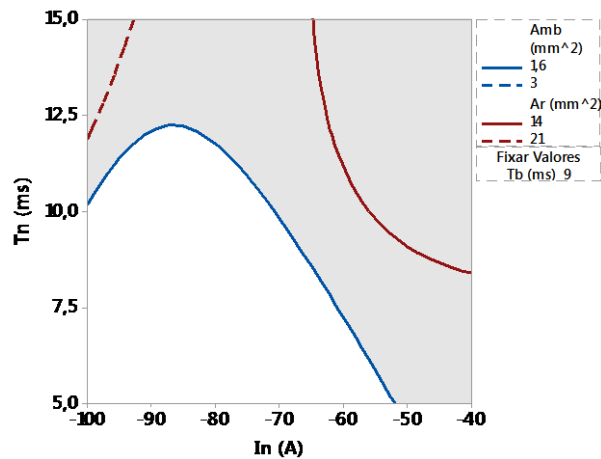


Figura 4.10 – Gráfico da superposição de fatores de Amb e Ar em função In, Tn e com Tb = 9ms.

Tabela 4.2 – Variáveis selecionadas utilizadas para soldagem de empilhamento.

CORDÃO	In (A)	Tn (ms)	Tb (ms)
1	-70	7,0	7,0
2	-80	5,0	7,0

Outra característica favorável do processo MIG/MAG PV ao empilhamento é a baixa penetração (vide Figura 4.11) em relação à altura do reforço, algo que auxilia para que os cordões empilhados possam aumentar a altura e não acabe por tomar uma forma achatada.

A Figura 4.11 ilustra a macrografia dos cordões feitos, aplicando os parâmetros da Tabela 4.2 e também expõe o gráfico real do comportamento da corrente.

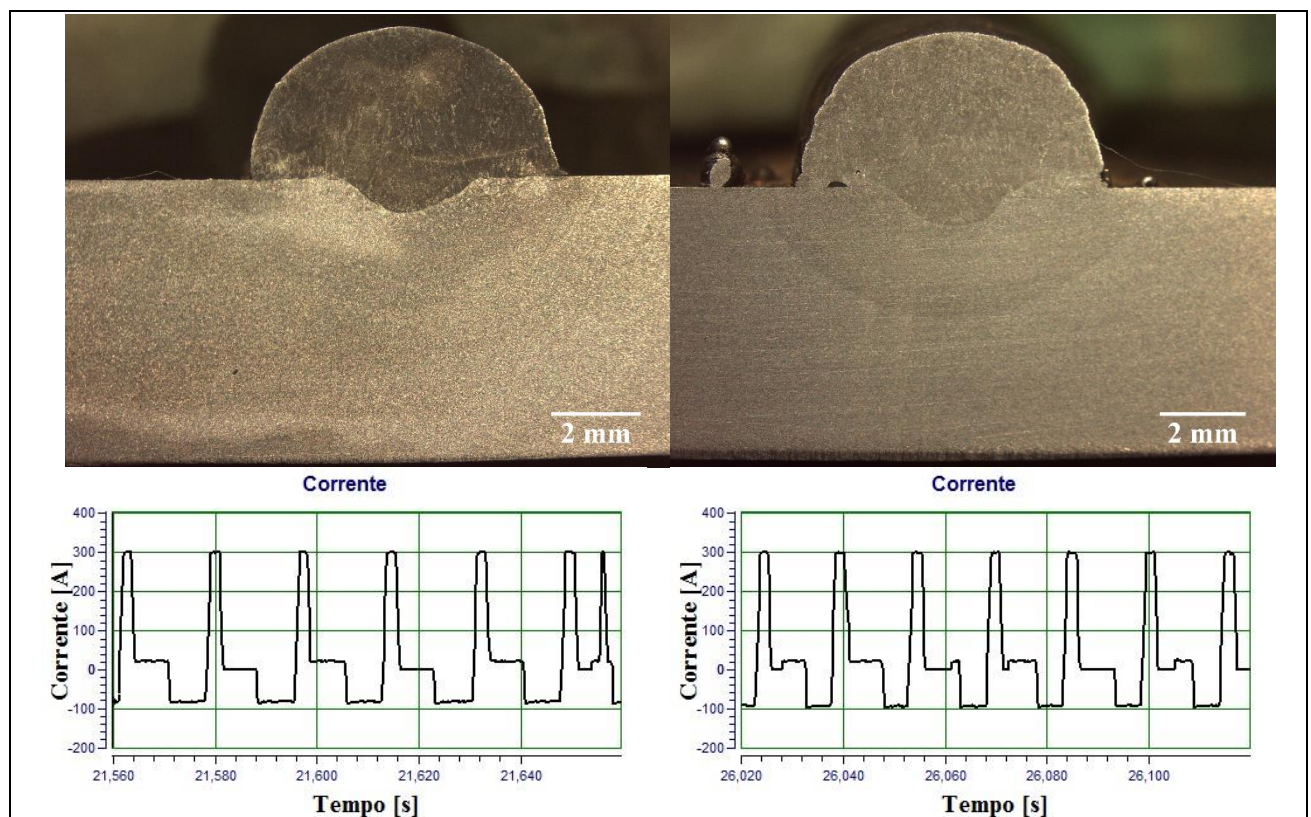


Figura 4.11 – Cordões referentes às variáveis da Tabela 4.2 (1-esquerda, 2-direita) e seus respectivos gráficos dos pulsos de corrente.

A medição pelo ImageJ (recurso gráfico para determinação de parâmetros geométricos em imagens) aponta os seguintes valores para as áreas dos cordões.

Tabela 4.3 – Áreas de Reforço e de Metal Base para os cordões empilhados.

CORDÃO	Ar (mm ²)	Amb (mm ²)
1 (In = -70 A; Tn = 7 ms; Tb = 7 ms)	20,437	1,975
2 (In = -80 A; Tn = 5 ms; Tb = 7 ms)	21,468	2,183

5. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para a validação do modelo matemático/estatístico referente às áreas Amb e Ar, em função dos parâmetros da Tabela 4.2, foi definida uma equação para o cálculo do Erro (%), esta aplicação informará se o modelo previamente calculado será próximo do valor medido usando o software livre ImageJ, o erro pode ser determinado aplicando a Equação 5.1.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Valor observado} - \text{Valor estimado}}{\text{Valor estimado}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

O valor estimado para as áreas Amb e Ar é obtido de uma forma simples através das duas equações de regressão para o reforço e para o metal fundido (Equações 4.1 e 4.2) onde apenas devem ser substituídos os valores utilizados da Tabela 4.2.

Obtendo-se o valor estimado, o próximo passo é calcular o Erro (%) para cada área.

Tabela 5.1 são apresentados os valores observados, obtidos experimentalmente dos cordões de solda 1 e 2 usando os parâmetros da Tabela 4.3.

Tabela 5.1 – Percentagem do erro entre o valor observado e estimada para cada condição de soldagem

Amostra	Resposta	Valor Observado (mm ²)	Valor Estimado (mm ²)	Erro (%)
1	Ar1	20,437	22,800	10,36
	Amb1	1,975	2,070	4,58
2	Ar2	21,468	22,854	6,06
	Amb2	2,183	2,344	6,86

6. CONCLUSÃO

Baseado em todo o estudo realizado para empilhamento de cordões de solda com variação dos parâmetros corrente negativa, tempo da corrente negativa e tempo de base pode concluir-se que mediante a seleção adequada dos parâmetros, o resultado da validação obtido é muito próximo do valor estimado mediante a equação de regressão, variações entre 4,6% e 10,4%.

Para o processo MAG-PV a aplicação do método de experimentos Box-Behnken é adequado para estimar os valores das áreas de reforço e de metal base.

Para a área do reforço, a corrente negativa (I_n), o tempo de base T_b e a interação da corrente negativa e o pulso negativo ($I_n \cdot T_n$) são altamente significativos, enquanto as demais interações e parâmetros tem significância reduzida. Já para a área de metal base fundido, o tempo do pulso de base T_b é o fator mais influente, seguido pela corrente do pulso negativo (I_n).

O método da superfície de resposta provou ser uma ferramenta adequada e de grande utilidade para o caso deste trabalho, onde era necessário estimar o campo de otimização dos parâmetros, aliada ao método da superposição, pode proporcionar resultados bem próximos entre resposta e estimativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baumgaertner, A. J.; **“Análise dos Parâmetros da Polaridade Negativa na Curva de Corrente de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável Aplicados à Soldagem para Revestimento”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 75 p, 2017.

Box, G.E.P.; Behnken, D.W.; **“Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables”**, Technometrics 2 (4) 455–475, 1960.

Box, G. E. P., & Wilson, K. B. **“On the experimental attainment of optimum conditions”**. Journal of the Royal Statistical Society, 13(1), 1–45. 1951.

Dutra, J. C.; Gonçalves e Silva, R. H.; Savi, B. M.; Marques, C.; Alarcon, O. E. **“New methodology for AC-pulsed GMAW parametrization applied to aluminum shipbuilding”**, The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015.

Farias, J. P.; Miranda, H. C.; Motta, M. F.; Paiva, F. D. Q.; Pessoa, E. F. **“Efeito da Soldagem MIG/MAG com Corrente Alternada sobre a Geometria da Solda”**, Soldagem e Inspeção, v. 10, n.4, p.173-181, São Paulo, Out/Dez 2005.

Ferreira, S. L. C.; Bruns, R. E; Ferreira, H. S.; Matos, G. D.; David, J. M.; Brandão, G. C.; et al.; **“Box–Behnken design: An Alternative for the Optimization of Analytical Methods”**, Analytica Chimica Acta, 597(2), 179–186, 2007.

Gonzalez, A.R.; **“Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada”**, Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – UFRGS. p 207. 1997.

Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. **“Design and analysis of experiments: Introduction to experimental design (2nd ed.)”**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.

Joseph, A.; Webb, C.; Haramia, M.; Yapp, D. **“Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet”**, 56th IIW International Conference, Bucharest, July/2003.

- Khuri, A. I. (2006). **“Response surface methodology and related topics”**. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Kim, T. J.; Lee, J. P.; Min, B. D.; Yoo, D. W.; Kim, C. U. **“Characteristics of Pulse MIG Arc Welding with a Wire Melting Rate Change by Current Polarity Effect”**, Journal of Electrical Engineering and Technology, v. 2 (3), p. 366-372, 2007.
- Montgomery, D. C. **“Design and analysis of experiments (8th ed.)”**. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. **“Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (2nd ed.)”**. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2002.
- Nascimento, A. S.; Fernandes, D. B.; Mota, C. A. M.; Vilarinho, L. O. **“Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável, Soldagem e Inspeção”**, v. 13, n. 2, p. 97-104, São Paulo, Abr/Jun 2008.
- Nascimento, A. S.; Vilarinho, L. O. **“Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA”**, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.
- Park, H. J.; Rhee, S.; Kang, M. J.; Kim, D. C. **“Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding”**, Materials Transactions, v. 50 (9), p. 2314-2317, 2009.
- Talkington, J. **“Variable Polarity Gas Metal Arc Welding”**, Msc Dissertation”, The Ohio State University, 1998.
- Tong, H.; Ueyama, T.; Harada, S.; Ushio, M. **“Quality and productivity improvement in aluminum alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system”**, Science and Technology of Welding and Joining, v. 6 (4), p. 203-208, 2001.

APÊNDICE

Tabela 1A – ANOVA da Área do Reforço (A_r - mm^2) para os fatores I_n , T_n e T_b avaliados.

Fator	SQ	GDL	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)	Significância
I_n (A)(L)	92,8884	1	92,88845	228,6517	0,004345	35,4	Significativo
I_n (A)(Q)	1,8408	1	1,84081	4,5313	0,167064	0,7	Não Signif.
T_n (ms)(L)	1,4289	1	1,4289	3,5173	0,20156	0,5	Não Signif.
T_n (ms)(Q)	0,8537	1	0,85366	2,1014	0,284209	0,3	Não Signif.
T_b (ms)(L)	76,7746	1	76,77464	188,9864	0,00525	29,2	Significativo
T_b (ms)(Q)	0,7734	1	0,77339	1,9037	0,301665	42	Não Signif.
I_n (A)xT_n (ms)	46,4238	1	46,42378	114,2755	0,008638	17,7	Significativo
I_n(A)xT_b(ms)	8,4245	1	8,42451	20,7375	0,044992	3,2	Significativo
T_n(ms)xT_b(ms)	16,2087	1	16,20868	39,8988	0,024159	6,2	Significativo
Falta de ajuste	15,9065	3	5,30218	13,0517	0,072002		Não Signif.
Erro puro	0,8125	2	0,40624				
Total SQ	262,483	14					

Nota: SQ: soma dos quadrados; GDL: graus de liberdade; MQ: média dos quadrados; L: linear; Q: quadrático
 $R^2 = 93,63\%$

Tabela 2A – ANOVA para a Área do Metal Base (A_{mb} - mm^2) para os fatores I_n , T_n e T_b avaliados.

Fator	SQ	GDL	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)	Significância
I_n (A) L+Q	1,490555	2	0,745277	44,3292	0,022061	29,3	Significativo
T_n (ms) L+Q	0,295774	2	0,147887	8,79634	0,102079	5,8	Não Signif.
T_b (ms) L+Q	2,228851	2	1,114426	66,2862	0,014862	43,9	Significativo
I_n (A)x T_n (ms)	0,00801	1	0,00801	0,47645	0,561374	0,2	Não Signif.
I_n (A)x T_b (ms)	0,000064	1	0,000064	0,00381	0,956414	0	Não Signif.
T_n(ms)xT_b(ms)	0,419256	1	0,419256	24,93742	0,037839	8,3	Significativo
Falta de ajuste	0,572401	3	0,1908	11,34884	0,08206		
Erro puro	0,033625	2	0,016812				
Total SQ	5,079355	14					

Nota: SQ: soma dos quadrados; GDL: graus de liberdade; MQ: média dos quadrados; L: linear; Q: quadrático
 $R^2 = 88,07\%$

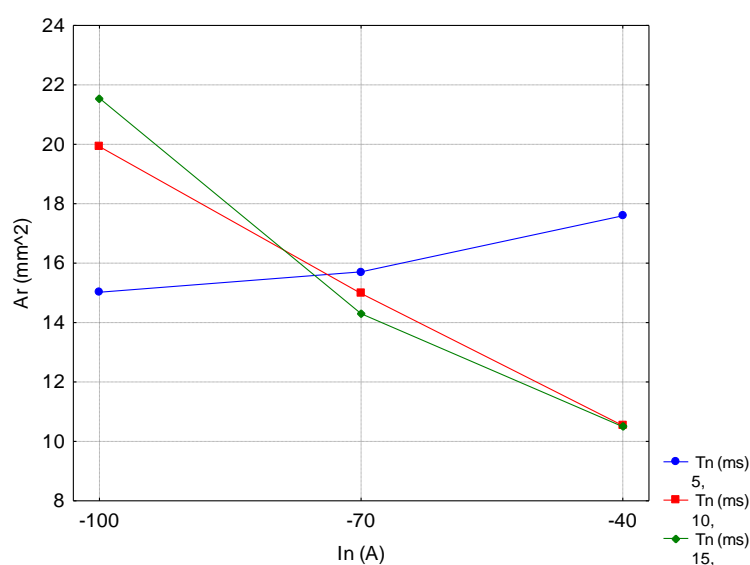


Figura 1A – Efeito da interação da corrente negativa e tempo da corrente negativa sobre a Área do Reforço (A_r mm^2).

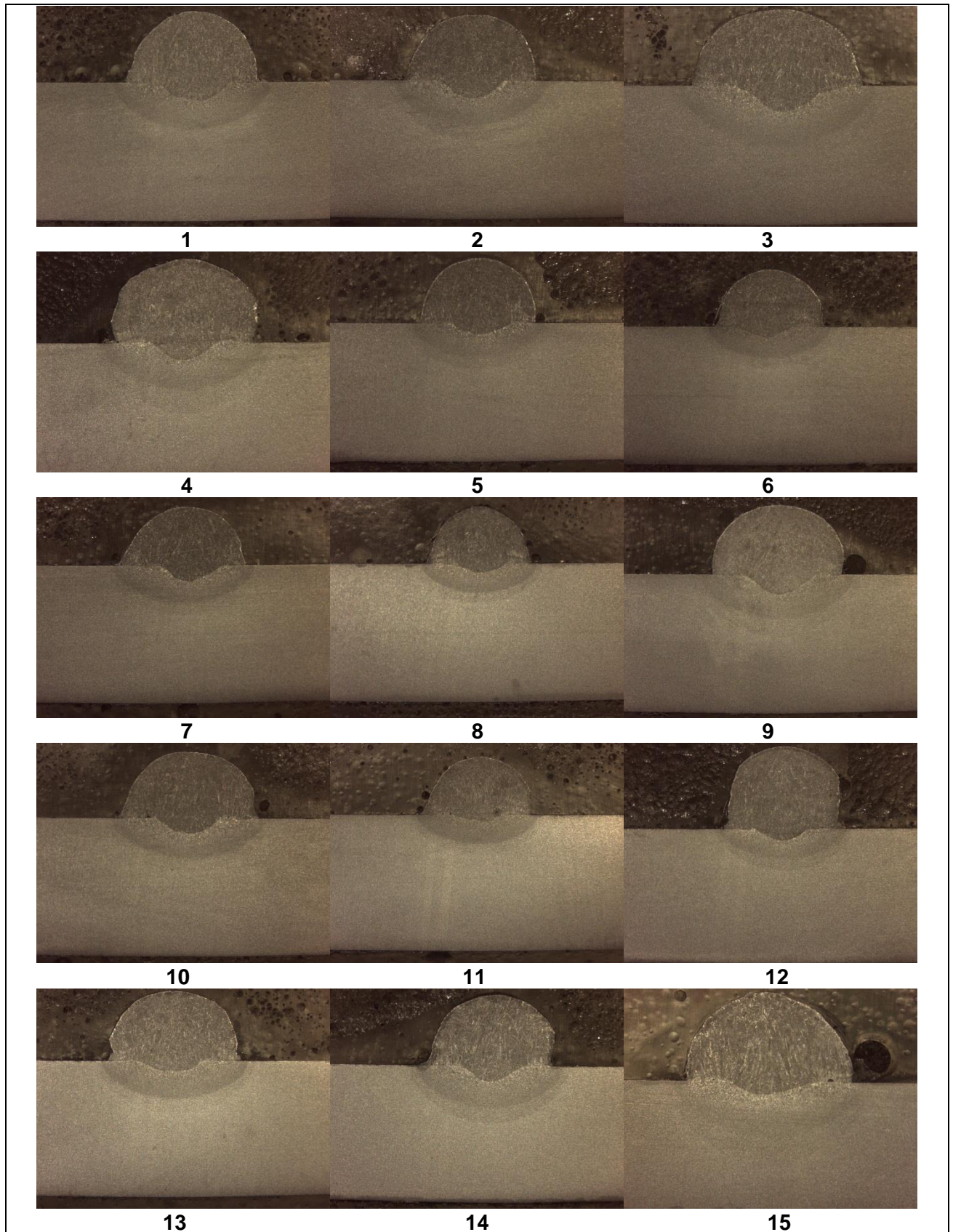


Figura 3A – Imagens dos 15 cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz de experimentos Box-Behnken (Tabela 4.1).

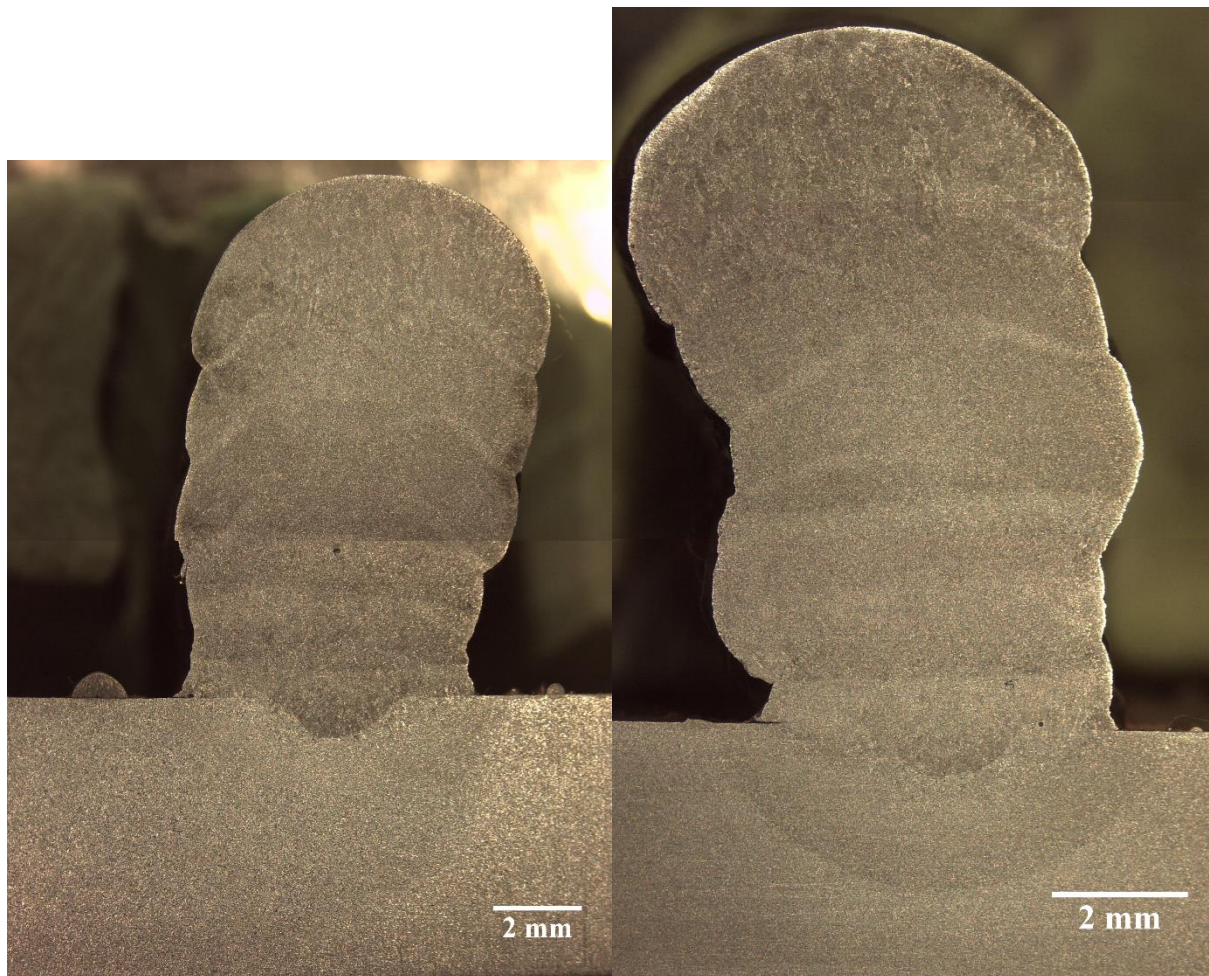


Figura 4A – Imagens dos dois cordões de solda empilhados (foto esquerda cordão de solda 1; direita cordão de solda 2).