

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO DO PROCESSO TIG – PULSADO
AUTÓGENO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

por

Leonardo da Silva Beltrão

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 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Beltrão, Leonardo da Silva
EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO DO PROCESSO TIG -
PULSADO AUTÓGENO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA
/ Leonardo da Silva Beltrão. -- 2021.
25 f.
Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. soldagem TIG autógena. 2. parâmetros de pulso.
3. geometria do cordão de solda. 4. projeto de
Box-Behnken. I. Gonzalez, Arnaldo Ruben, orient. II.
Titulo.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Leonardo da Silva Beltrão

EFEITO DOS ARÂMETROS DE PULSO DO PROCESSO TIG – PULSADO
AUTÓGENO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof^a. Dr. Cíntia Cristine Petry Mazzaferro

Prof. Dr. José Antônio Mazzaferro

Porto Alegre, Novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado todas as oportunidades.

Agradeço ao professor Arnaldo Ruben, por toda a ajuda, atenção e colaboração para que fizéssemos um bom trabalho.

À minha família, por sempre ter apoiado minhas escolhas e por ter me dado toda orientação desde criança, à minha mãe Lilian, ao meu pai Fernando e aos meus irmãos, Thiago e Luiza.

Ao LS&TC-UFRGS, por ter fornecido toda a estrutura para a realização dos experimentos.

Ao aluno de doutorado, Jaderson, por ter me ajudado durante toda a fase experimental.

Aos meus amigos do colégio, que compartilho minhas experiências há quase 10 anos e por propiciarem um ambiente colaborativo e de crescimento mútuo.

Aos meus familiares, amigos e conhecidos que, de alguma forma, me apoiaram positivamente.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA
MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PULSO DO PROCESSO TIG –
PULSADO AUTÓGENO SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE
SOLDA

Beltrão, Leonardo da Silva

leobeltrao15@gmail.com

Resumo. O objetivo principal desse trabalho é avaliar a influência da corrente de pico, tempo de pico e tempo de base sobre a geometria do cordão de solda. Os fatores avaliados na geometria do cordão de solda são a penetração e a largura. Utilizou-se o processo de soldagem TIG pulsado autógeno, ou seja, sem metal de adição e variando a intensidade da corrente elétrica entre níveis de maior e menor energia. Em relação ao procedimento experimental a ser seguido, utilizou-se a metodologia de projeto de Box-Behnken, o qual combina os parâmetros corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b) para a confecção de 15 corpos de prova a serem ensaiados e analisados. O metal base utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o SAE 1020, com dimensões 150x50x6,4 mm. O processo de soldagem TIG Pulsado foi empregado, utilizando Argônio (Ar) como gás de proteção e eletrodo EWTh-2 de 2,4 mm. Após a parte experimental, processou-se os dados obtidos para a geometria do cordão de solda e, através da análise de variância e dos gráficos de superfície de resposta. Foi possível concluir que o tempo de base (T_b) foi o parâmetro mais significativo sobre a penetração, entretanto na largura do cordão de solda foram significativos T_b e a interação I_p*T_p .

Palavras-chave: soldagem TIG autógena, parâmetros de pulso, geometria do cordão de solda, projeto de Box-Behnken.

Effect of the Pulse Parameters of the Process TIG-Pulsed Autogenous on the Weld Bead Geometry

Abstract. The aim objective of this study is to evaluate the influence of the peak current, peak time and base time on the weld bead geometry. The factors evaluated in the weld bead geometry are penetration and width. The TIG-pulsed autogenous welding process was used, that is, without filler metal and varying the intensity of the electric current between higher and lower energy levels. Regarding the experimental procedure, the Box-Behnken project methodology was chosen, which combines the parameters of peak current (I_p), peak time (T_p) and base time (T_b) for the preparation of 15 specimens to be tested and analyzed. The base metal used to make the specimens was SAE 1020 with dimensions 150x50x6.4 mm. The TIG-pulsed welding process was used, using Argon (Ar) as a shielding gas and 2.4 mm EWTh-2 electrode. After the experimental part, the data obtained for the weld bead geometry were processed through analysis of variance and response surface graphs. It was possible to conclude that the base time (T_b) was the most significant parameter on penetration, however, in the weld bead width, T_b and I_p*T_p interaction were significant.

Keywords: *autogenous TIG welding, pulse parameters, weld bead geometry, Box-Behnken design.*

NOMENCLATURA

Símbolos

C	Carbono	
Mn	Manganês	
P	Fósforo	
S	Enxofre	
Ip	Corrente de Pico	[A]
Tp	Tempo de Pico	[s]
Tb	Tempo de Base	[s]
d_i	Desejabilidade Individual	
D	Desejabilidade Global	

Abreviaturas e acrônimos

CCEN	Corrente contínua eletrodo polaridade negativa
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Positiva
CA	Corrente Alternada
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
ANOVA	Análise de Variância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1. Soldagem TIG	1
2.2. Polaridade da Corrente	2
2.2.1. Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Negativa (CCEN).....	2
2.2.2. Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Positiva (CCEP).....	3
2.2.3. Corrente Alternada (CA)	3
2.3. Soldagem TIG Pulsada	3
2.4. Parâmetros do Processo TIG Pulsado.....	3
2.4.1. Corrente de Pico e de Base	3
2.4.2. Velocidade de Soldagem	4
2.5. Projeto de Experimento Box-Behnken.....	4
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	5
3.1. Corpos de Prova	5
3.2. Fonte de Potência, Gás de Proteção e Eletrodo	5
3.3. Parâmetros de Entrada	5
3.4. Processo de Soldagem	6
3.5. Preparação das Amostras.....	6
3.6. Análise Metalográfica.....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
4.1. Penetração do Cordão de Solda.....	8
4.2. Largura do Cordão de Solda.....	10
4.3. O Método “Desirability”	12
5. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE A – OSCILOGRAMAS DOS ENSAIOS 08 E 14.....	15
APÊNDICE B – ASPECTO SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA	16
APÊNDICE C – MACROGRAFIA DAS AMOSTRAS	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Funcionamento do processo TIG - [CUNHA, 2008].

Figura 2.2 – Interferência da polaridade do eletrodo sobre a penetração: a) Corrente contínua eletrodo negativo; b) Corrente alternada; c) Corrente contínua eletrodo positivo [CIRINO, 2009].

Figura 2.3 – Gráfico corrente em função do tempo [IMC Soldagem, 2015].

Figura 2.4 – Box-Behnken de três fatores [Montgomery, 2013].

Figura 3.1 – Configuração e posicionamento dos equipamentos utilizados no procedimento de soldagem.

Figura 4.1 – Valores de penetração e largura para cada ensaio.

Figura 4.2 – Significância dos parâmetros de soldagem e de suas combinações considerando como critério o valor p igual a 0,05.

Figura 4.3 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros I_p , T_p e T_b sobre a penetração do cordão de solda.

Figura 4.4 – (a) Superfície de resposta 3D da penetração em função de I_p e T_b para $T_p = 10$ ms; (b) Contorno da superfície de resposta (2D) da penetração em função de I_p e T_b para $T_p = 10$ ms.

Figura 4.5 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros I_p , T_p e T_b sobre a largura do cordão de solda.

Figura 4.6 – (a) Superfície de resposta 3D para a largura em função de T_b e I_p para $T_p = 10$ ms; (b) Superfície de contorno 2D para a largura em função de T_b e I_p para $T_p = 10$ ms.

Figura 4.7 – Resultados obtidos para maximizar a largura e a penetração utilizando a função desejabilidade.

Figura A.1 – (a) Oscilograma da tensão do arco elétrico em função do tempo da amostra 08; (b) Oscilograma da corrente de soldagem em função do tempo da amostra 08.

Figura A.2 – (a) Oscilograma da tensão do arco elétrico em função do tempo da amostra 14; (b) Oscilograma da corrente de soldagem em função do tempo da amostra

Figura B.1 – Cordões de solda numerados pelo número da amostra.

Figura C.1 – Macrografia dos cordões de solda atacados com Nital 10% e numerados pelo número da amostra.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço SAE 1020.

Tabela 4.1 – Combinação dos parâmetros de soldagem e valores obtidos de penetração e largura para cada amostra segundo o projeto de experimentos Box-Behnken.

Tabela 4.2 – ANOVA da penetração para os valores I_p , T_p e T_b .

Tabela 4.3 – ANOVA da largura para os valores I_p , T_p e T_b .

Tabela 4.4 – Resultados calculados para a corrente média considerando o T_b como variável e os valores $I_b = 20$ A, $I_p = 165$ A, $T_p = 10$ ms como constantes.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem é um processo de fabricação com grande potencial de pesquisa e desenvolvimento para as mais diversas aplicações industriais. Conforme os avanços tecnológicos aumentam, equipamentos mais sofisticados surgem, possibilitando processos mais precisos e a redução de custos, sempre levando em conta o custo-benefício e a aplicação envolvida. Tratando-se da indústria petrolífera, sistemas de tubulações são muito utilizadas para o transporte de fluidos e demandam alto nível de estudo e pesquisa devido às condições adversas as quais essas tubulações devem resistir. Outro fator importante nessa área é o risco de falhas no projeto ser o menor possível devido ao alto prejuízo que uma falha pode ocasionar. Para interromper ou permitir o fluxo de fluidos nas tubulações, utilizam-se válvulas do tipo esfera, que obstruem ou liberam o fluxo dependendo do ângulo de posicionamento. Essas válvulas devem possuir alta resistência ao desgaste por estarem em contato direto com o fluido.

Uma possibilidade para melhorar a qualidade dessas válvulas é revesti-las por uma camada de material mais resistente. Dessa forma, a superfície da junta passa por um procedimento de aspersão térmica, o qual se caracteriza pela colisão entre partículas aceleradas e uma superfície (substrato). Entretanto, a aderência esperada entre os dois materiais não se atinge somente pelo impacto entre os materiais. Há a necessidade de fundir o substrato a fim de tornar mais forte a ligação mecânica entre os dois materiais. Devido ao procedimento de aspersão resultar em uma camada fina na ordem de décimos de milímetro, os parâmetros de soldagem utilizados no processo para fundir exatamente a área de contato entre o substrato e a camada revestida devem possuir um elevado grau de precisão. O presente trabalho de conclusão de curso visa estudar o efeito dos parâmetros de pulso do processo TIG pulsado autógeno na penetração e na largura do cordão de solda. Esse estudo está relacionado ao problema industrial mencionado anteriormente e visa ajudar a tese de doutorado de um aluno do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Com o objetivo de entender melhor a relevância dos efeitos gerados dos parâmetros (I_p , T_p , T_b) de soldagem no cordão de solda, esse trabalho utiliza projeto de experimentos Box-Behnken e o método da superfície de resposta para proporcionar análises e conclusões confiáveis.

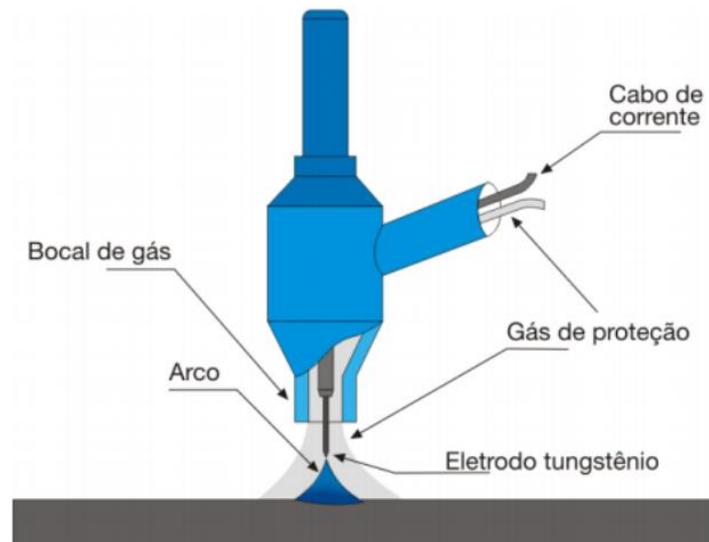
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), como se mostra esquematicamente na Figura 2.1, é um processo de soldagem que produz um arco elétrico entre o eletrodo não-consumível de tungstênio e a poça de fusão. Na soldagem TIG pode-se ou não utilizar metal de adição. O processo é autógeno quando não há adição de material. O eletrodo e a poça de fusão são protegidos por um gás de proteção, os gases utilizados nesse processo são gases inertes, por exemplo, o argônio e o hélio [BRACARENSE, 2000].

O objetivo do gás de proteção é proteger a poça de fusão e impedir que ocorra a oxidação do eletrodo [MACHADO, 1996].

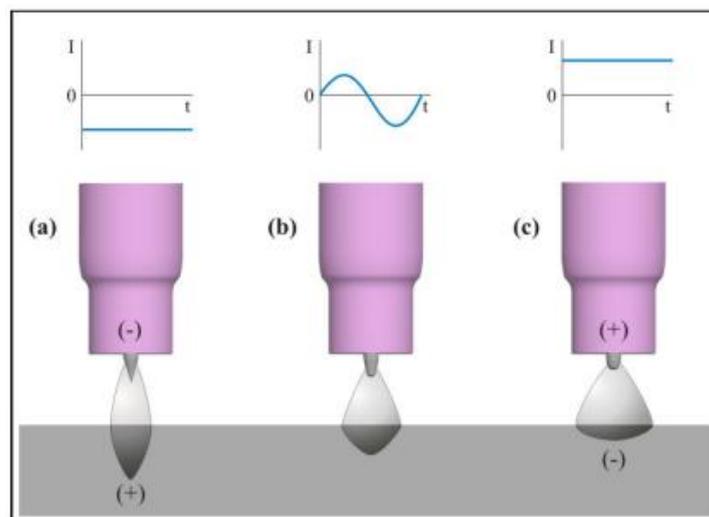
Figura 2.1 - Funcionamento do processo TIG - [CUNHA, 2008].



2.2. Polaridade da Corrente

A polaridade da corrente influencia tanto na penetração do cordão de solda quanto na transferência de calor entre a poça de fusão e o eletrodo não-consumível [MACHADO, 1996].

Figura 2.2 – Interferência da polaridade do eletrodo sobre a penetração: a) Corrente contínua eletrodo negativo; b) Corrente alternada; c) Corrente contínua eletrodo positivo [CIRINO, 2009].



2.2.1. Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Negativa (CCEN)

A polaridade negativa do eletrodo é o caso mais utilizado no processo TIG. Nessa situação, 30% do calor gerado é transferido para o eletrodo, assim, não há aquecimento excessivo, e 70% do calor é absorvido pela poça de fusão. Essa configuração de polaridade resulta em uma poça de fusão profunda e de largura estreita [MACHADO, 1996].

2.2.2. Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Positiva (CCEP)

Na configuração positiva do eletrodo, a distribuição de calor é gerada numa proporção de 30% para a poça e de fusão e 70% para o eletrodo, resultando em uma baixa penetração e poça de fusão larga. A CCEP tem como característica a remoção de óxidos superficiais formados sobre a poça de fusão [MACHADO, 1996].

2.2.3 Corrente Alternada (CA)

O calor é distribuído 50% para a poça de fusão e 50% para o eletrodo. Sendo um caso intermediário entre CCEN e CCEP. Por causa da variação entre valores positivos e negativos, o arco elétrico termina toda vez que se cruza o ponto com corrente nula. Para reestabelecer o arco, deve-se sobrepor uma tensão de alta frequência durante todo o período de soldagem [MACHADO, 1996].

2.3. Soldagem TIG Pulsada

A corrente oscila entre dois níveis bem definidos de energia de acordo com uma determinada frequência de oscilação, fazendo-se necessário o controle de um conjunto de variáveis: corrente de pulso, tempo de pulso, corrente de base, tempo de base e velocidade de soldagem [CUNHA, 2013].

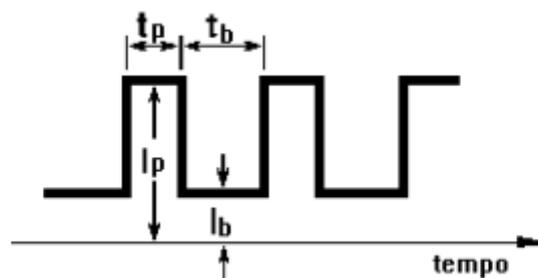
Devido ao fato da corrente ser pulsada, ocorre uma melhora na qualidade do cordão de solda em relação ao processo convencional. O processo utiliza menor quantidade de energia, promove a autolimpeza do eletrodo, reduz a zona afetada pelo calor, reduz a tendência à trinca de solidificação e melhora as propriedades mecânicas da junta por meio do refino do grão [MACHADO, 1996].

2.4. Parâmetros do processo TIG pulsado

2.4.1 Corrente de Pico e de Base

Durante o procedimento de soldagem pulsada, dois níveis de energia são regulados. O primeiro se caracteriza por um nível alto de energia, o qual está relacionado a promoção da poça de fusão, este nível é obtido durante a corrente de pico. O segundo se caracteriza pelo menor nível de energia transferido ao processo, sua existência se relaciona a manutenção do arco elétrico, garantido que sua extinção não ocorra. Esse nível baixo está diretamente associado a corrente de base [CUNHA, 2013]. O tempo de pico é definido pelo intervalo de duração da corrente de pico e o tempo de base é definido pelo intervalo de duração da corrente de base. Esses parâmetros podem ser visualizados na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Gráfico corrente em função do tempo [IMC Soldagem, 2015].



2.4.2. Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem tem grande influência em relação a geometria do cordão de solda. Para altas velocidades, o cordão tende a ser mais estreito com baixa penetração e com bordas irregulares. Para velocidades menores, o cordão de solda tende a aumentar sua largura [CORRÊA, 2006].

Para alta frequência e baixa velocidade, os pontos de solda se sobrepõem e aumentam a energia na junta, já para baixa frequência e alta velocidade, pode ocorrer a não continuidade do cordão de solda [CUNHA, 2013].

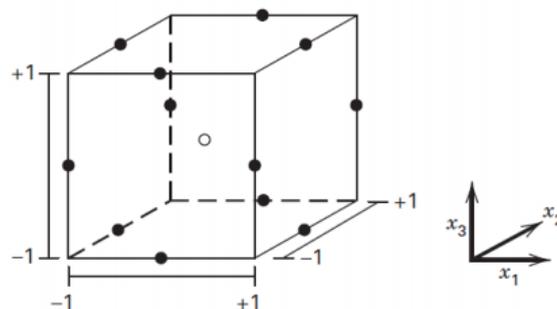
2.5. Projeto de Experimento Box-Behnken

A metodologia de projeto de experimentos é utilizada em diversas áreas do conhecimento e possui como objetivo planejar, executar e analisar o experimento por meio de conceitos estatísticos. Primeiramente, identifica-se o problema e suas características. Posteriormente, define-se as variáveis respostas associadas aos parâmetros de qualidade. Continuando, identifica-se os fatores controláveis do processo que serão estudados, os fatores constantes e os fatores não controláveis, chamados de ruídos. Em relação aos fatores controláveis, define-se um intervalo, que será usado como base para a variação dos valores de um mesmo parâmetro. Por fim, determina-se um modelo estatístico para o experimento. Antes da execução do experimento, cria-se uma matriz experimental, de forma aleatória, composta pela sequência dos ensaios. [Coleman e Montgomery, 1993; Ribeiro e Caten, 2003].

O projeto de Box-Behnken é usado na metodologia de superfície de resposta, MSR. Esse projeto consiste em três níveis fatoriais incompletos, resultantes da combinação de projetos do tipo $2k$ fatorial que abrange todas as combinações de três fatores. Todos os pontos do projeto de Box-Behnken estão a uma mesma distância de um centro com raio igual a $\sqrt{2}$, o que torna o projeto esférico [MONTGOMERY, 2013].

A Figura 2.4 representa os três fatos do experimento X_1 , X_2 e X_3 e seus níveis -1, 0 e +1. Os círculos pretos representam as combinações dos fatores. Não há nenhum círculo nos vértices devido ao experimento não combinar três valores máximos ou mínimos ao mesmo tempo. Para um experimento de três fatores e três níveis, serão realizados 15 experimentos, onde 12 são combinações de valores máximos ou mínimos de dois fatores e 3 são referentes as combinações dos valores médios (ponto central), esse ensaio é realizado 3 vezes para a verificação da repetitividade [BAUMGAERTNER, 2017].

Figura 2.4 - Box-Behnken de três fatores [Montgomery, 2013].



O que torna o experimento de Box-Behnken importante é o fato de produzir resultados satisfatórios e, ao mesmo tempo, não demandar uma quantidade grande de ensaios se comparados com outros experimentos [Liu et al., 2013].

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

3.1. Corpos de prova

Inicialmente, foram cortados 15 corpos de prova em formato retangular com dimensões de 150x50x6,4 mm por meio de uma máquina de corte disponibilizada pelo Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas - LS&TC/UFRGS. O material utilizado nas chapas foi o aço SAE 1020, que apresenta composição mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço SAE 1020.

Composição Química - % em peso					
Metal	Valor	C	Mn	P	S
SAE 1020	Mín.	0,18	0,3	-	-
	Máx.	0,23	0,6	0,03	0,05

Fonte: Catálogo Gerdau (SAE)

3.2. Fonte de potência, gás de proteção, eletrodo e dados.

Parâmetros mantidos constantes durante a realização dos 15 cordões de solda:

- Corrente Contínua Eletrodo Polaridade Negativa (CCEN), configuração utilizada;
- Corrente de base (I_b) constante igual a 20 A;
- A fonte de potência utilizada foi a DigiPLUS A7 da IMC – Soldagem;
- Para o gás de proteção utilizou-se o Argônio;
- Vazão do gás de proteção: 15 L/min;
- Eletrodo EWTh-2;
- Diâmetro do eletrodo: 2,4 mm.
- Ângulo do eletrodo: 57° ;
- Distância entre eletrodo e peça: 2,5 mm;
- Extensão do eletrodo: 23 mm;
- Velocidade de soldagem constante (4,0 mm/s).

3.3. Parâmetros de entrada

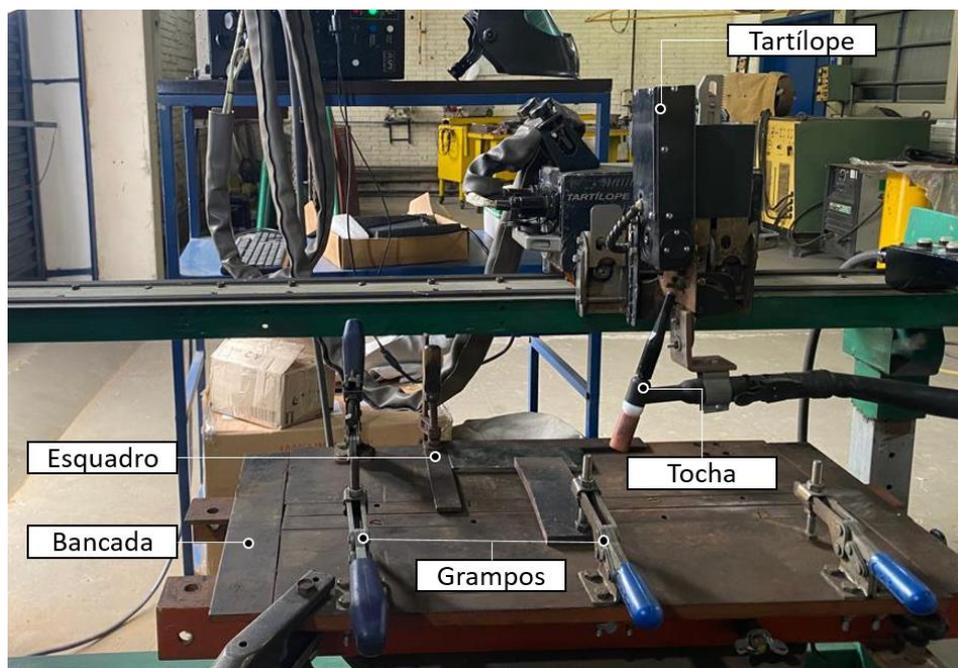
Seguindo a metodologia experimental de Box-Behnken, para a corrente de pulso I_p , escolheu-se os valores de 140 A, 165 A e 190 A. Para o tempo de corrente de pulso T_p , escolheu-se os valores de entrada de 5 ms, 10 ms e 15 ms e para o tempo de corrente de base T_b , os valores selecionados foram 5 ms, 10 ms e 15 ms. Os valores desses intervalos foram combinados e geraram os valores de entrada utilizados na soldagem de cada um dos corpos de prova. A sequência de soldagem das amostras foi aleatorizada.

3.4. Processo de Soldagem

A configuração dos equipamentos para a execução do processo de soldagem é mostrada na Figura 3.1 e se manteve para todos os 15 corpos de prova. Uma bancada de testes metálica serviu como base para apoio das chapas metálicas. Em relação à fixação, utilizou-se grampos de aperto rápido horizontal para fixar componentes responsáveis por restringir o deslocamento e a rotação dos corpos de prova. Observa-se na Figura 3.1 que os grampos fixaram um esquadro metálico e uma chapa de suporte, que serviu para pressionar os corpos de prova contra a bancada de testes, aumento o atrito entre a bancada e os corpos de prova.

Como requisito do experimento, desejou-se que o cordão de solda fosse produzido de forma paralela ao comprimento das chapas e automatizada com velocidade de soldagem constante (4,0 mm/s) ao longo do experimento. Para isso, fixou-se a tocha de soldagem em um sistema automatizado de soldagem (tartilope) conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Configuração e posicionamento dos equipamentos utilizados no procedimento de soldagem.



3.5. Preparação das Amostras

Após o procedimento de soldagem, foram realizados dois cortes transversais ao cordão de solda, assim, gerando uma seção de comprimento de 10 mm aproximadamente. Para a escolha da região de corte, desconsiderou-se os primeiros 50 mm do início da solda, a fim de selecionar uma região em que o processo de soldagem possa ser considerado estabilizado.

Posteriormente, foram embutidos os corpos de provas em moldes de matriz polimérica. Em seguida, os corpos de provas embutidos foram lixados com a utilização de lixas de granulações de 220, 500 e 1200, respectivamente, e atacados com Nital 10%.

3.6. Análise Metalográfica

Finalizadas as etapas anteriores, os 15 cordões de solda gerados no processo de soldagem foram analisados por meio de uma lupa conectada ao computador para obter as imagens, logo foram salvas para posterior análise. Após esse processo, as amostras foram medidas através do software ImageJ, para obter os resultados (penetração e largura) da Tabela 4.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Tabela 4.1 a combinação de tratamentos dos parâmetros de corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b) para cada uma das amostras ensaiadas aleatorizadas, também os resultados obtidos da penetração e da largura do cordão de solda.

Tabela 4.1 – Combinação dos parâmetros de soldagem e valores obtidos de penetração e largura para cada amostra segundo o projeto de experimentos Box-Behnken.

Amostra	Ensaio	I_p (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	Penetração (mm)	Largura (mm)
9	#01	165	5	5	1,72	6,16
11	#02	165	5	15	1,01	3,92
13	#03	165	10	10	1,65	5,88
10	#04	165	15	5	2,22	7,86
1	#05	140	5	10	2,00	7,38
8	#06	190	10	15	1,55	5,84
5	#07	140	10	5	1,54	6,05
3	#08	140	15	10	1,34	4,90
2	#09	190	5	10	1,56	5,51
12	#10	165	15	15	1,62	5,92
14	#11	165	10	10	1,61	5,77
7	#12	140	10	15	1,12	4,27
4	#13	190	15	10	1,03	4,07
15	#14	165	10	10	1,53	5,77
6	#15	190	10	5	2,21	7,65

Observa-se, na Tabela 4.1, as variações dos valores da penetração de 1,01 mm até 2,22 mm, para a faixa de valores variados dos parâmetros controláveis. A segunda resposta independente avaliada é a largura do cordão de solda, a qual apresenta variação desde 3,9 mm até 7,9 mm.

No Apêndice A, são mostrados os gráficos dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem em função do tempo para a amostra 08 (ensaio #06) e para a amostra 14 (ensaio #11). As tensões e correntes apresentam resultados negativos devido ao eletrodo utilizado no processo possuir corrente negativa.

Na Figura B.1 do Apêndice B, mostra-se o aspecto superficial de cada cordão de solda.

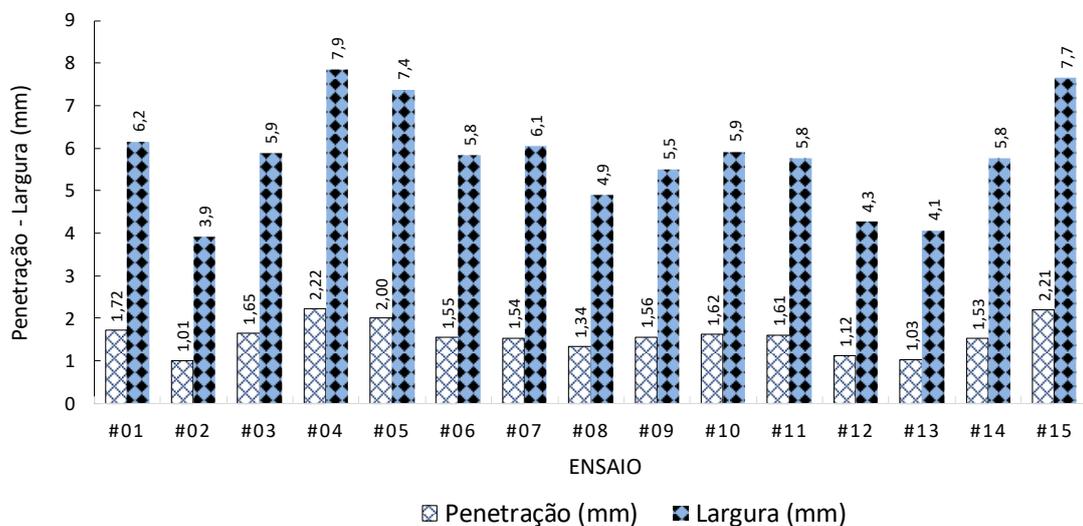
Na Figura C.1 do Apêndice C estão as macrografias dos 15 cordões obtidos das combinações dos parâmetros da matriz de experimentos Box-Behnken.

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, os parâmetros foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

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 (penetração e largura). 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.

A Figura 4.1 mostra o gráfico da penetração combinado com largura do cordão de solda para cada ensaio realizado. Para consulta do número da amostra, pode-se consultar a Tabela 4.1 utilizando o número do ensaio da amostra. Percebe-se uma relação de proporção entre largura e penetração diferente para cada amostra, porém sem grandes amplitudes dessa proporção.

Figura 4.1 – Valores de penetração e largura para cada ensaio.



As seções a seguir apresentarão a tabela de Análise de Variância (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. Penetração do Cordão de Solda

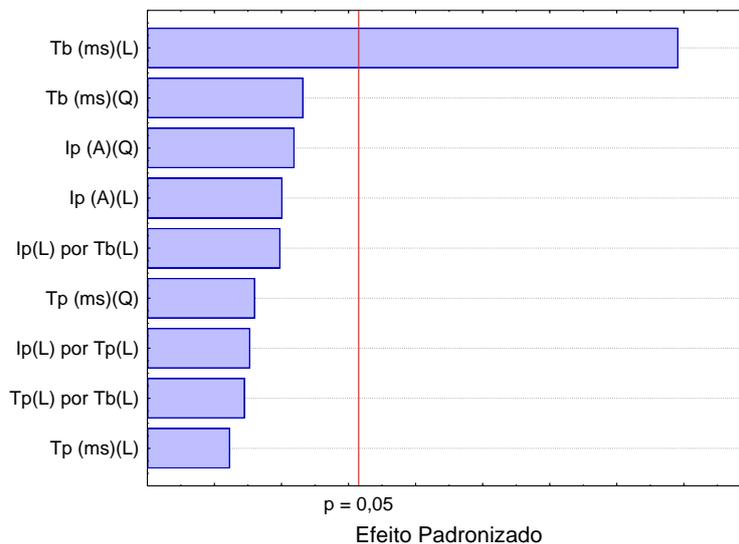
A Tabela 4.2 mostra a tabela ANOVA para a penetração referente aos três parâmetros de pulso (I_p , T_p , T_b) e para as interações. Para determinar se um parâmetro ou a combinação de parâmetros é significativa ou não, o Valor p precisa ser menor que 0,05. De acordo com a Tabela 4.2, o fator mais importante e relevante para a penetração é o tempo de base (T_b), os demais parâmetros e suas interações não são significativos. A Figura 4.2 apresenta o gráfico de Pareto, que é uma representação gráfica da Tabela 4.2 da ANOVA, pode observar-se que o parâmetro T_b é significativo, ultrapassando o valor de $p = 0,05$.

Tabela 4.2 – ANOVA da penetração para os valores Ip, Tp e Tb.

Parâmetro	SQ	GDL	MQ	Valor-F	Valor-p	Significância
Ip (A)	0,036546	2	0,018273	4,89453	0,169649	Não Significativo
Tp (ms)	0,006226	2	0,003113	0,83379	0,545318	Não Significativo
Tb (ms)	0,740169	2	0,370084	99,12976	0,009987	Significativo
Ip por Tp	0,004225	1	0,004225	1,1317	0,398861	Não Significativo
Ip por Tb	0,0144	1	0,0144	3,85714	0,188497	Não Significativo
Tp por Tb	0,003025	1	0,003025	0,81027	0,463042	Não Significativo
Falta de Ajuste	1,095675	3	0,365225	97,82812	0,010136	
Erro Puro	0,007467	2	0,003733			
Total	1,911893	14				

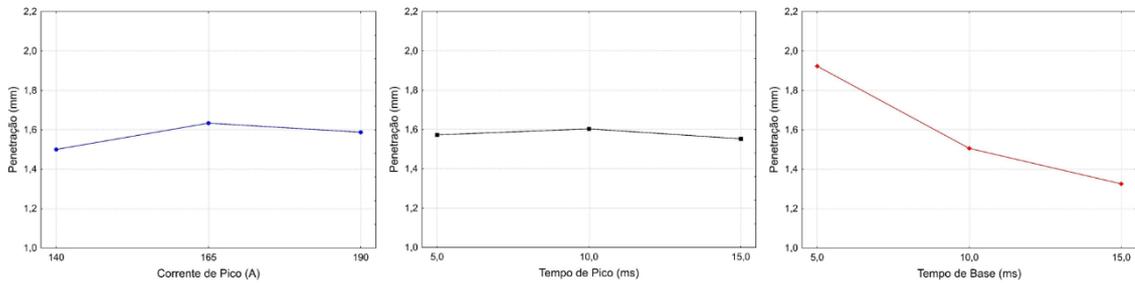
Nota: SQ: Soma dos Quadrados; GDL: Grau de Liberdade; MQ: Média dos Quadrados.

Figura 4.2 – Significância dos parâmetros de soldagem e de suas combinações considerando como critério o *valor-p* igual a 0,05.



A Figura 4.3 mostra os efeitos de Ip, Tp e Tb sobre a penetração do cordão de solda. Observa-se que a penetração sofre um acréscimo de 1,5 mm para 1,63 mm quando a corrente de pico varia de 140 A para 165 A, já quando a corrente de pico passa de 165 A para 190 A, a penetração decai para o valor de, aproximadamente, 1,6 mm. Já quando a penetração é relacionada ao tempo de pico, percebe-se uma certa constância nos valores. Para o tempo de pico de 5 ms, a penetração tem um valor de 1,58 mm, ela passa para 1,6 mm com tempo de pico igual a 10 ms e decai para 1,56 mm com tempo de pico de 15 ms. Para o tempo de base (Tb), observar-se que Tb exerce grande influência nos valores da penetração e sua proporcionalidade inversa entre os dois. Para o menor valor de tempo de base (Tb = 5 ms) foi obtido o maior valor para a penetração, 1,92 mm. Aumentando o Tb para 10 ms, a penetração decai para 1,5 mm e, por fim, variando o Tb para 15 ms, a penetração decai para o valor de 1,37 mm.

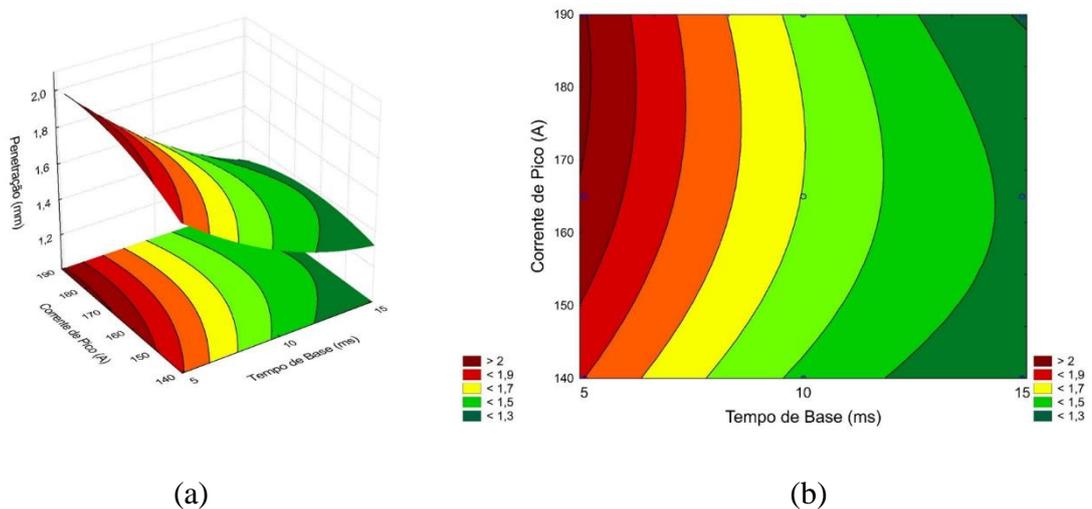
Figura 4.3 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros I_p , T_p e T_b sobre a penetração do cordão de solda.



A Figura 4.4a mostra o gráfico da superfície de resposta 3D do valor esperado para a penetração proveniente da interação entre a corrente de pico (I_p) e o tempo de base (T_b) para o tempo de pico (T_p) mantido constante igual a 10 ms. A Figura 4.4b apresenta o gráfico de contorno da superfície de resposta 2D obtido para a penetração por meio da interação entre I_p e T_b mantendo T_p constante igual a 10 ms.

Avaliando as Figuras 4.4a e 4.4b, percebe-se que é possível alcançar o maior valor de penetração (aprox. 2,0 mm) para valores de $I_p = 190$ A, $T_b = 5$ ms e $T_p = 10$ ms. Os menores valores de penetração podem obter-se quando o T_b for de 15 ms, e quase que independe do valor da corrente de pico (140-190 A), como se observa na Figura 4.4b, isso demonstra que T_b é significativo sobre a penetração.

Figura 4.4 – (a) Superfície de resposta 3D da penetração em função de I_p e T_b para $T_p = 10$ ms; (b) Contorno da superfície de resposta (2D) da penetração em função de I_p e T_b para $T_p = 10$ ms.



4.2. Largura do cordão de solda

A Tabela 4.3 mostra a análise de variância para a largura em função dos parâmetros de pulso e de suas combinações. Considera-se como significante parâmetros que obtiveram valor p menor que 0,05. Para a largura do cordão de solda, observa-se que o parâmetro de maior importância foi o tempo de base (T_b), seguido da interação da corrente de pico (I_p) e o tempo de pico (T_p).

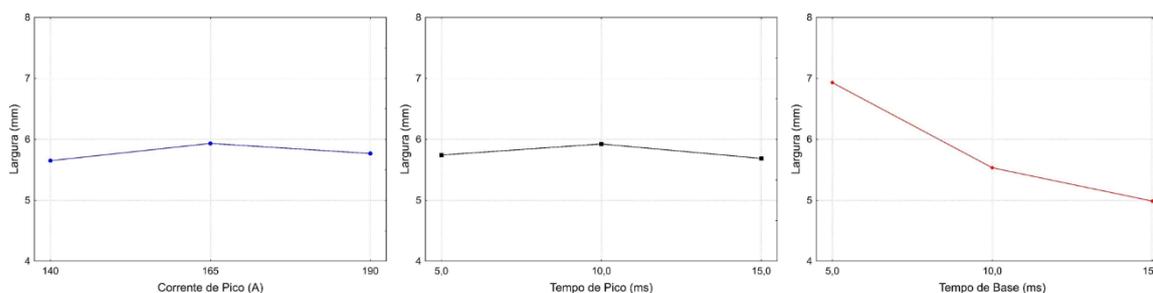
Tabela 4.3 – ANOVA da largura para os parâmetros Ip, Tp e Tb.

Parâmetro	SQ	GDL	MQ	Valor-F	Valor p	Significância
Ip (A)	0,1434	2	0,071699	17,7766	0,053258	Não Significativo
Tp (ms)	0,10607	2	0,053033	13,1487	0,070678	Não Significativo
Tb (ms)	7,93163	2	3,965814	983,2597	0,001016	Significativo
Ip por Tp	0,2704	1	0,2704	67,0413	0,014591	Significativo
Ip por Tb	0,00023	1	0,000225	0,0558	0,835271	Não Significativo
Tp por Tb	0,0225	1	0,0225	5,5785	0,14204	Não Significativo
Falta de Ajuste	11,60868	3	3,869558	959,3946	0,001041	
Erro Puro	0,00807	2	0,004033			
Total	20,14093	14				

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

A Figura 4.5 apresenta o comportamento da largura do cordão de solda em função dos parâmetros Ip, Tp e Tb. Variando a corrente pico de 140 A para 165 A, percebe-se um acréscimo na largura de 5,7 mm para 5,95 mm, já para o valor 190 A, obteve-se o valor de 5,8 mm. Analisando o tempo de pico, variando de 1 ms para 10 ms, a largura aumentou de 5,8 mm para 5,95 mm, já para o valor de 15 ms a largura decaiu para 5,7 mm. Em relação ao tempo de base, esse parâmetro obteve o maior intervalo de variação. Variando o tempo de base de 5 ms para 10 ms, a largura do cordão de solda decaiu de 6,95 mm para 5,55 mm. Por fim, o maior valor de pico de 15 ms, resultou na menor largura observada de 5 mm. Tanto a análise de penetração, quanto a análise de largura foram fortemente influenciadas pelo tempo de base.

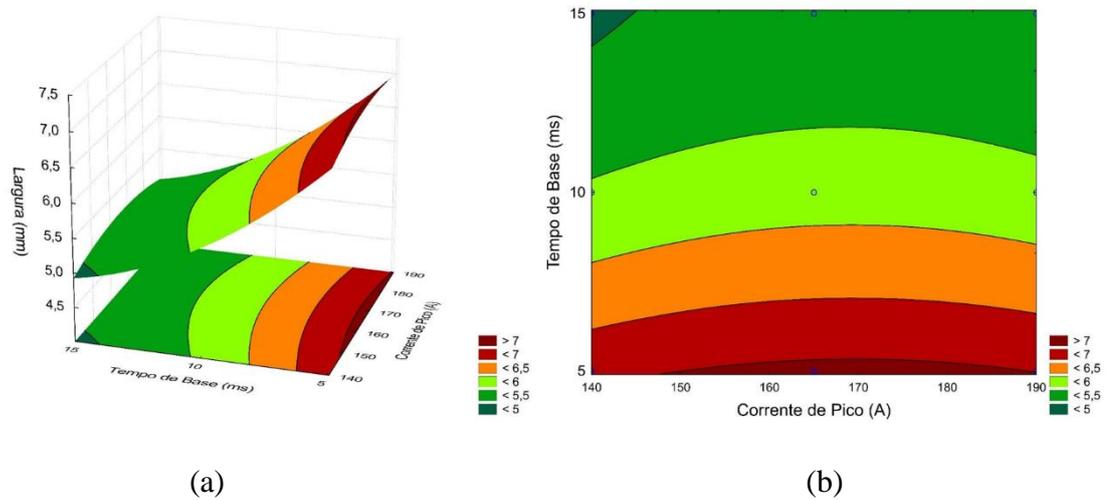
Figura 4.5 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros Ip, Tp e Tb sobre a largura do cordão de solda.



A Figura 4.6a apresenta o gráfico da superfície de resposta 3D da largura em função do tempo de base (Tb) e da corrente de pico (Ip) mantendo o tempo de pico (Tp) igual a 10 ms. A Figura 4.6b mostra a superfície de contorno 2D da largura em função do Tb e da Ip, mantendo Tp constante com valor igual a 10 ms.

Analisando as Figuras 4.5a e 4.5b, percebe-se que é possível alcançar o maior valor de largura do cordão de solda (maior que 7,0 mm) para valores de Ip entre 150 e 190 A, Tb = 5 ms e (constante) Tp = 10 ms. Os menores valores de largura (menor que 5,0 mm) podem obter-se quando o valor de Tb for maior que 11 ms, entretanto, o valor da corrente de pico pode ser ajustado entre 140 e 190 A, como se observa na Figura 4.5b, isso demonstra que Tb é significativo sobre a largura do cordão de solda.

Figura 4.6 – (a) Superfície de resposta 3D para a largura em função de T_b e I_p para $T_p = 10$ ms; (b) Superfície de contorno 2D para a largura em função de T_b e I_p para $T_p = 10$ ms.



Com o objetivo de relacionar o tempo de base (variável resposta mais significativa para a penetração e a largura) com a corrente média (I_m), a qual é definida pela razão entre $(T_b * I_b + T_p * I_p)$ e $(T_b + T_p)$, considerando constante todas as variáveis, exceto o T_b , utiliza-se os valores para $I_b = 20$ A, $I_p = 165$ A, $T_p = 10$ ms e o tempo de base variando entre os valores de 5 ms, 10 ms e 15 ms. Os valores calculados para a corrente média são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados calculados para a corrente média considerando o T_b como variável e os valores $I_b = 20$ A, $I_p = 165$ A, $T_p = 10$ ms como constantes.

T_b (ms)	I_m (A)
5	116,7
10	92,5
15	78,0

Observa-se que quanto menor o tempo de base, maior será a corrente média, que por consequência terá maiores valores para a penetração e para a largura.

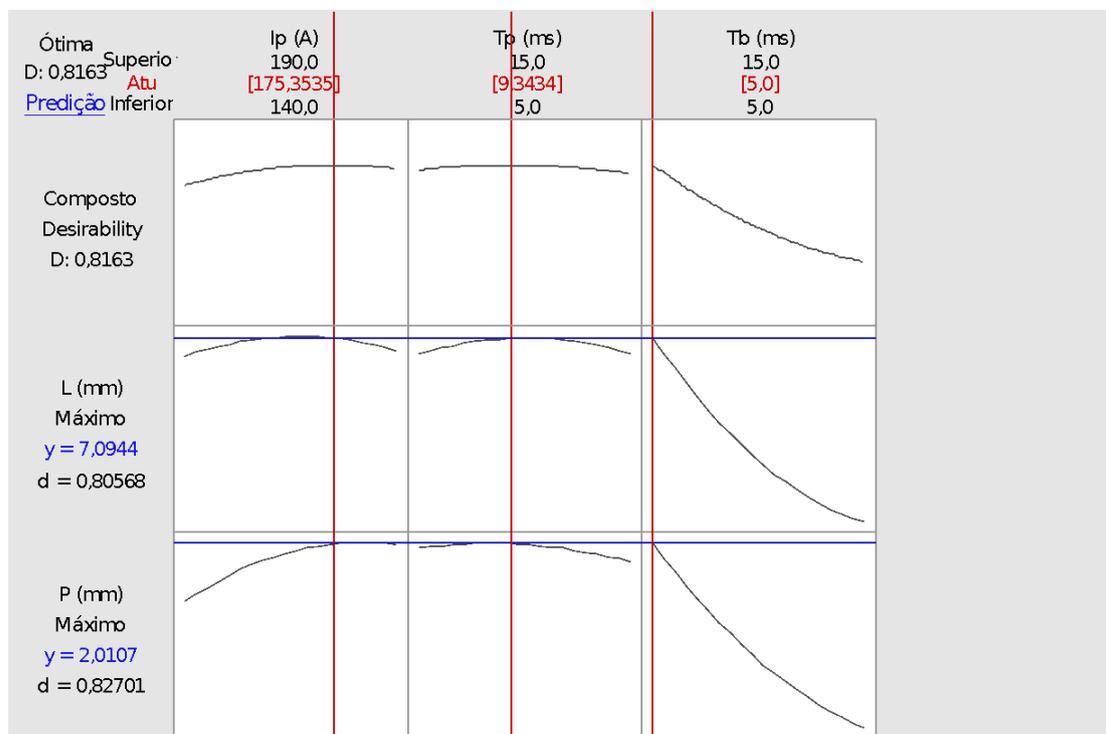
4.3. O Método “Desirability”

Em 1980, Derringer e Suich desenvolveram a função conveniência ou método *desirability*, uma solução para otimizar várias respostas. Amplamente utilizada na indústria, onde os processos produtivos demandam de diversos recursos diferentes e há uma necessidade de gerir da melhor forma esses recursos, seja em relação ao tempo de fabricação do produto, redução de matéria-prima ou, até mesmo, combinando-se os critérios. A ideia geral dessa função se baseia no raciocínio de que todas as respostas devem estar dentro de um intervalo desejável, não sendo aceitável que alguma resposta esteja fora desse intervalo. O objetivo da função *desirability* é encontrar a melhor resposta composta das respostas particulares, respeitando todos os critérios individuais. Ou seja, a função converte diversas respostas em uma apenas.

Inicialmente, converte-se a resposta em desejabilidade individual (d_i), de acordo com o grau de conveniência, obtendo-se valores que variam de 0, menor conveniência, até o valor 1, maior conveniência. As desejabilidades individuais são combinadas através do produto das desejabilidades individuais elevado ao expoente $1/m$, onde m é o número de respostas analisadas. Esse equacionamento resulta na desejabilidade global, expressa por $D = \sqrt[m]{d_1 \cdot d_2 \dots d_m}$, a qual só pode assumir valores dentro do intervalo de 0 a 1 por consequência.

A desejabilidade global para a máxima combinação das respostas de penetração e largura do cordão de solda foram determinadas através do software Minitab®. A Figura 4.7 mostra os gráficos que determinam os maiores valores e os valores dos parâmetros de entrada para obtenção dos maiores valores de penetração e largura. A penetração máxima de 2,01 mm e a largura máxima de 7,09 mm é obtida através dos parâmetros de entrada $I_p = 175$ A, $T_p = 9,3$ ms e $T_b = 5$ ms.

Figura 4.7 – Resultados obtidos para maximizar a largura e a penetração utilizando a função desejabilidade.



Nota: Devido às restrições causadas pela pandemia, não foi possível executar a verificação mediante a soldagem dos dados obtidos pelo método de desejabilidade.

5. CONCLUSÕES

De acordo com todo o estudo realizado nesse trabalho referente a análise do efeito da corrente de pico, tempo de pico e tempo de base sobre a largura e a penetração do cordão de solda e seguindo o método experimental de Box-Behnken para três fatores, conclui-se que o tempo de base foi o parâmetro de pulso que teve a maior influência sobre a penetração e largura do cordão de solda.

Para o intervalo de tempo de base entre 5 ms e 15 ms, os gráficos de superfície de resposta mostraram que a relação entre o tempo de base e a penetração são inversamente proporcionais. Essa proporção inversa também foi vista quanto a largura e o tempo de base. Tanto para a penetração quanto para a largura do cordão de solda, quanto menor for

o tempo de base, maior será a resposta para o intervalo de valores definidos previamente no presente experimento. Isso está associado ao tempo de base ser o período de duração da menor intensidade de corrente elétrica, ou seja, período de menor transferência energética, o que favorece o resfriamento da poça de fusão quando comparado ao período de maior intensidade energética (tempo de pico). Valores menores de T_b resultam em valores maiores para a I_m .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baumgaertner Filho, A. J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. 2017.

Bracarense, A, Q.; **“Processo de soldagem TIG – GTAW”**, UFMG, 2000.

CIRINO, L.M. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, fevereiro de 2009.

Coleman, D. E.; Montgomery, D. C. **A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment**, *Technometrics*, v. 35, n.1, p.1-12, 1993.

Corrêa, F. R. T. **Efeito dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e desempenho da soldagem com arame tubular autoprotetido e corrente pulsada**. 2006.

Cunha, T. V.; **Desenvolvimento de equipamento e de metodologia de parametrização para a soldagem orbital TIG**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Out. 2008.

Cunha, T. V.; **“Proposta de roteiro para a determinação das variáveis de soldagem do processo TIG pulsado aplicado à soldagem de chapas finas”**, *Soldagem & Inspeção*, vol. 18, n° 1, 2013, p.64 – 71.

IMC Soldagem, **“Manual da fonte de soldagem Digiplus A7”**, 8ª edição, Florianópolis, 2015.

Liu, H.; Wang, K.; Schlindwein, W.; Li, M. **Using the Box-Behnken experimental design to optimise operating parameters in pulsed spray fluidized bed granulation**, *International Journal of Pharmaceutics*, v. 488, p.329-388, 2013.

Machado, I, G.; **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre: s.n., 1996.

Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**, John Wiley & Sons, Inc., ed. 8, Arizona State University, 2013.

Ribeiro, J. L. D.; Caten, C. T. **Projeto de experimentos**, Apostila do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

APÊNDICE A – OSCILOGRAMAS DOS AMOSTRAS 08 E 14.

Os oscilogramas comprovam a correta execução dos valores dos parâmetros de pulso com os valores estabelecidos na matriz de experimentos da Tabela 4.1.

A Figura A.1 apresenta os dados do oscilograma para a tensão e a corrente em função do tempo para a amostra 08 (ensaio #06). De acordo com a matriz experimental da Tabela 4.1, da amostra número 08 foi submetido a $I_p = 190$ A, $T_p = 10$ ms e $T_b = 15$ ms.

A Figura A.2 apresenta os dados do oscilograma para a tensão e a corrente em função do tempo para a amostra 14 (ensaio #11). De acordo com a matriz experimental da Tabela 4.1, da amostra número 14 foi submetido a $I_p = 165$ A, $T_p = 10$ ms e $T_b = 10$ ms.

Figura A.1 – (a) Oscilograma da tensão do arco elétrico em função do tempo da amostra 08; (b) Oscilograma da corrente de soldagem em função do tempo da amostra 08.

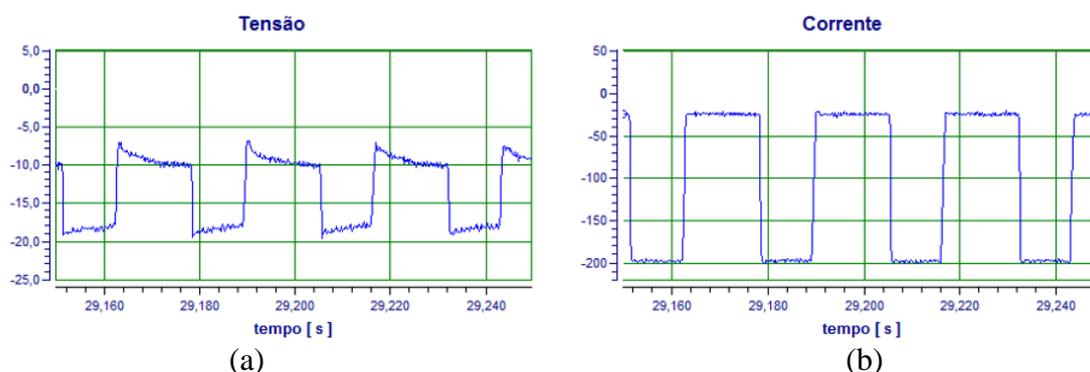
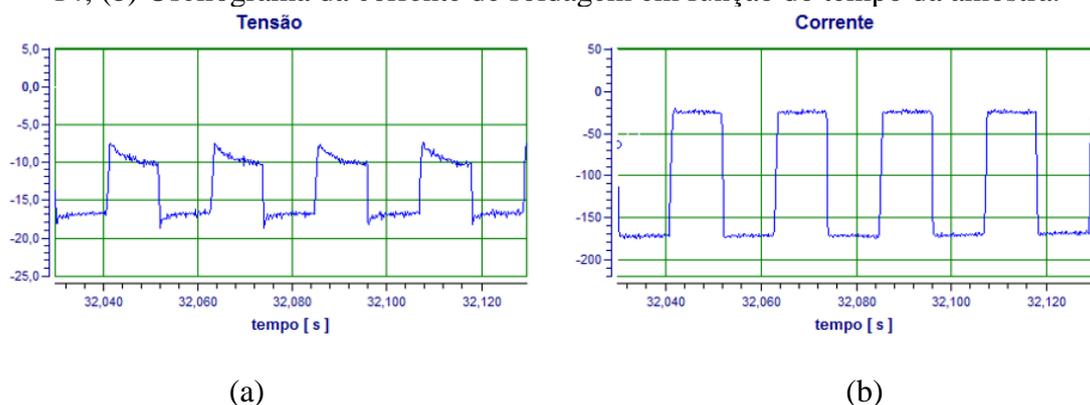
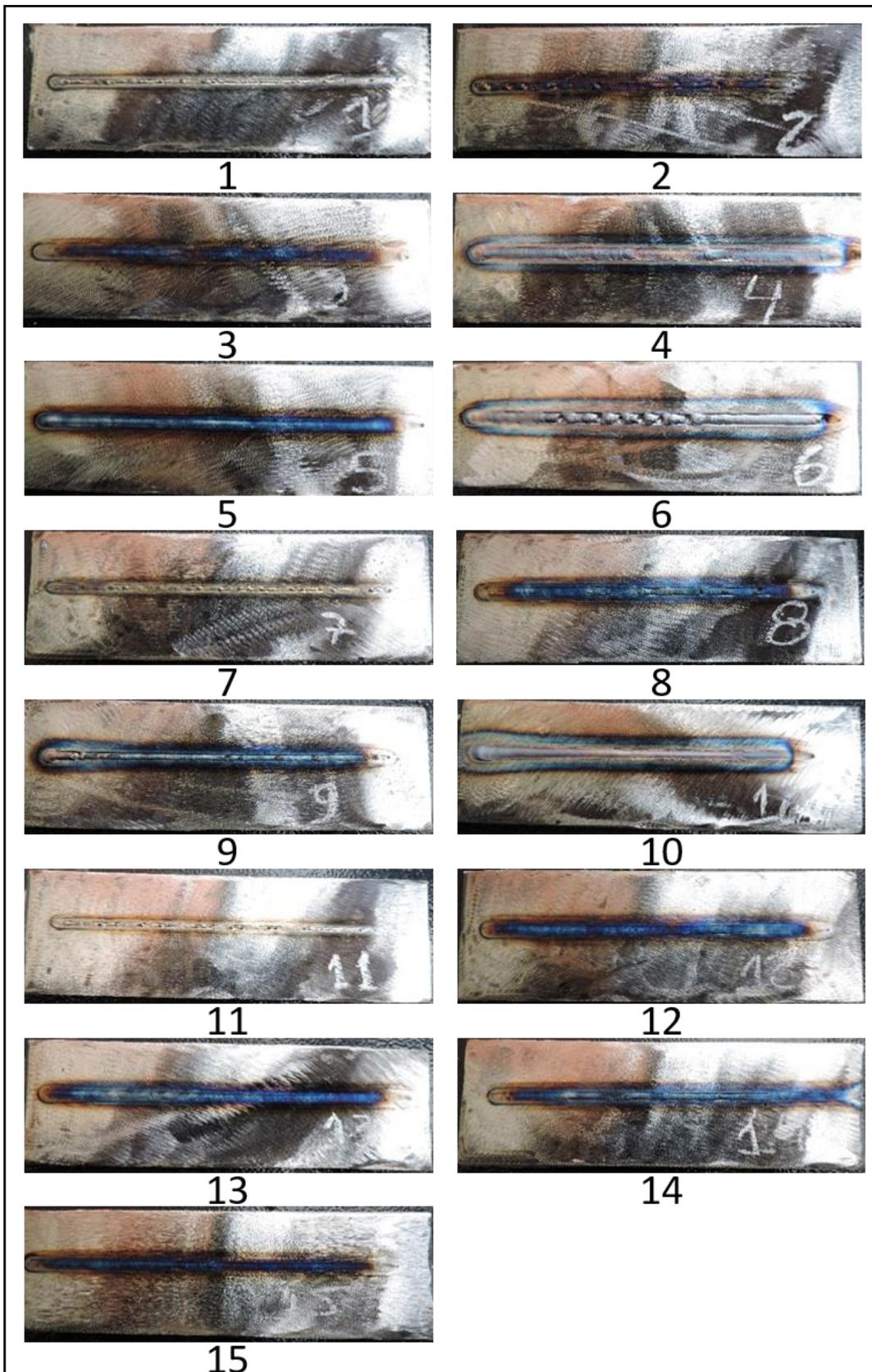


Figura A.2 – (a) Oscilograma da tensão do arco elétrico em função do tempo da amostra 14; (b) Oscilograma da corrente de soldagem em função do tempo da amostra.



APÊNDICE B – ASPECTO SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA.

Figura B.1 – Cordões de solda numerados pelo número da amostra.



APÊNDICE C – MACOGRAFIA DAS AMOSTRAS.

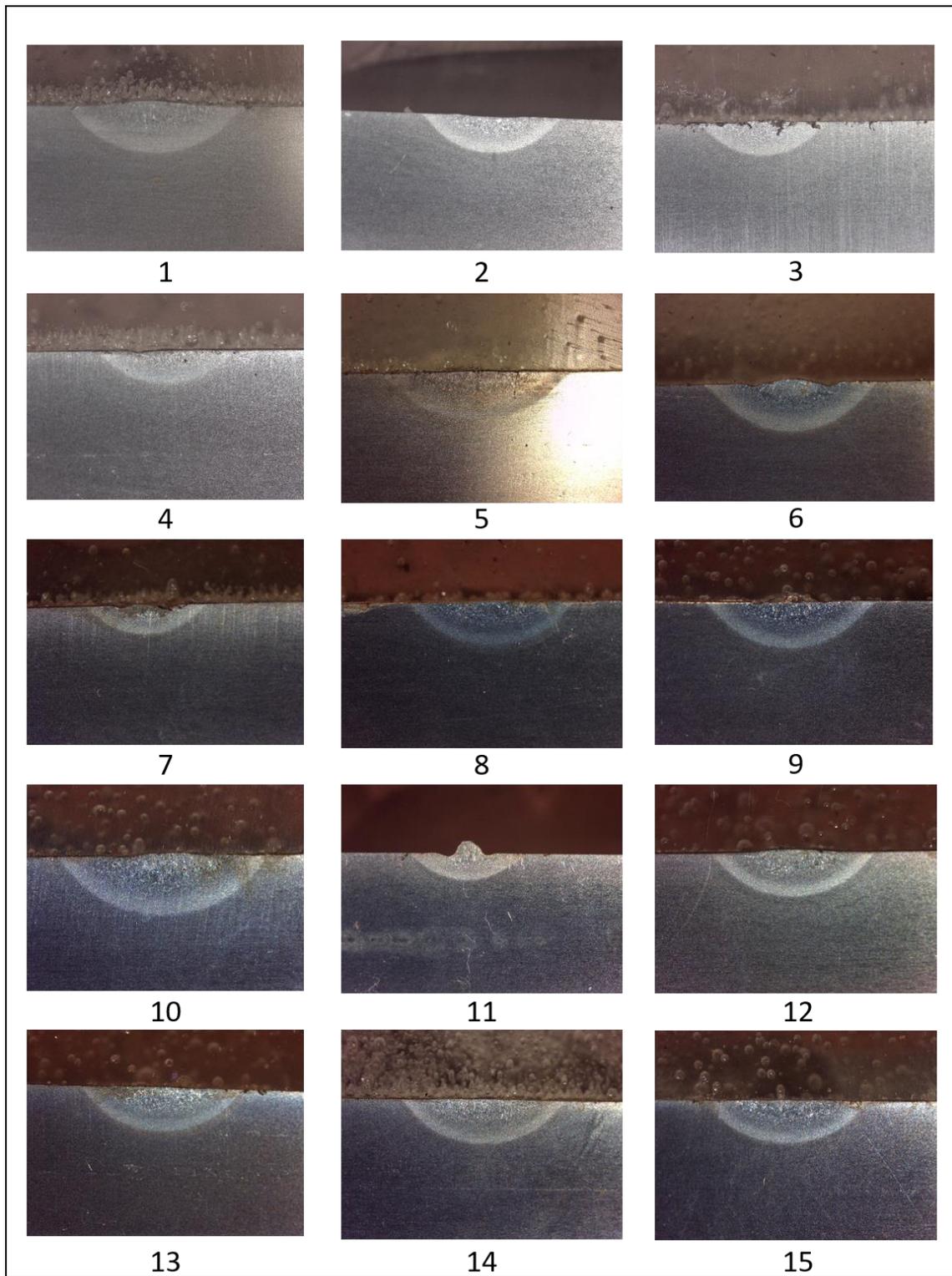


Figura C.1 – Macrografia dos cordões de solda atacados com Nital 10% e numerados pelo número da amostra.