

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA POLARIDADE NEGATIVA NA CURVA DE
CORRENTE DE SOLDAGEM MIG/MAG POLARIDADE VARIÁVEL APLICADOS À
SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO

Por

Alexandre José Baumgaertner Filho

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2017

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DA POLARIDADE NEGATIVA NA CURVA DE
CORRENTE DE SOLDAGEM MIG/MAG POLARIDADE VARIÁVEL APLICADOS À
SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO

por

Alexandre José Baumgaertner Filho
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Aprovada por:

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Patric Daniel Neis, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Marcio Levi Kramer de Macedo, LAMEF/DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 24 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Arnaldo Ruben Gonzalez pelo apoio, dedicação, amizade, paciência, ideias, incentivo e experiências compartilhadas.

Ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) pelos equipamentos, consumíveis e por proporcionar a realização deste trabalho.

À UFRGS e ao PROMEC por garantir as condições necessárias para realização desta dissertação.

À minha namorada Luessa, por todo incentivo, carinho, compreensão e apoio, além de sempre acreditar no melhor de mim.

Aos amigos, aos colegas de disciplinas, em especial ao Ariel Kaplan e William Hackenhaar, pelo companheirismo e amizade durante as disciplinas.

Aos meus pais, Alexandre e Cláudia e minha irmã, Lauren, pelo apoio e estímulo.

RESUMO

Devido à demanda de aumento de produtividade na indústria, a utilização de materiais mais leves, busca por processos de reparos com melhor custo, em conjunto com o avanço das tecnologias, evolução dos processos de soldagem, e esses fatores aliados aos benefícios de uma maior taxa de fusão, melhor controle da penetração, faz com que o processo MIG/MAG com polaridade variável apresente consideráveis avanços tecnológicos nos dias de hoje. Porém, a seleção dos parâmetros da curva típica de corrente do processo (composta por corrente de pico, corrente de base positiva e corrente negativa), é ainda um desafio. Buscando um melhor entendimento da influência da polaridade negativa no processo de soldagem, em especial para aplicações de revestimento, este trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros da polaridade negativa individualmente em relação a geometria do cordão de solda, utilizando aço ao carbono como metal base e aço inoxidável como metal de adição. O planejamento e execução do experimento foi realizado com base na metodologia de projeto de experimentos Box-Behnken, variando três fatores: tempo de corrente negativa, intensidade de corrente negativa e tempo de corrente de base positiva, em três níveis cada um. Primeiramente alcançou-se a minimização da diluição, onde o tempo de corrente negativa apresentou efeito significativo no resultado final, sendo seu nível máximo (15 ms) o responsável pelos menores valores de diluição, aproximadamente 12%, recomendado em soldagem para revestimento. Posteriormente, foi avaliado o efeito dos parâmetros em relação à penetração, altura e largura do cordão de solda, sendo o tempo de corrente negativa em 15 ms e corrente negativa em -150 A os níveis que apresentaram melhores resultados. Após, os parâmetros da polaridade negativa utilizados foram comparados com os termos proporcionais sugeridos pela literatura (%EN). E, por fim, avaliou-se uma forma de curva de corrente sem a corrente de base positiva, onde foi concluído que não há significância das diferentes formas de curva de corrente sobre os resultados na penetração do cordão de solda, assim como a necessidade da corrente de base na estabilidade do arco elétrico do processo.

Palavras-chave: *MIG/MAG Polaridade Variável; %EN. Soldagem de Revestimento; Diluição; Projeto Box-Behnken.*

ABSTRACT

Due to the demand to increase productivity in the industry, use lighter materials, search for repair processes with better cost, in combination with advancement of technologies, evolution of welding processes, connected with the benefits of a higher melting rate and better control of the process penetration, it was possible to verify advances in the MIG / MAG Variable Polarity welding technique. However, the selection of the parameters of the typical process current curve (composed by peak current, positive current and negative current), is still a challenge today. The aim of this work is to analyze the negative polarity parameters individually in relation to the weld bead geometry, using carbon steel as base metal and stainless steel as addition metal. The planning and execution of the experiment was performed based on the Box-Behnken design methodology, varying three factors: negative current time, negative current intensity and positive base current time, at three levels each one. Firstly, dilution minimization was achieved, which showed that the negative current time had a strong influence on the final result, and the maximum level (15 ms) was responsible for the lowest dilution values, nearby 12%, ideal for welding cladding. Then, the parameters were evaluated in relation to penetration, height and width of the weld bead, which for welding cladding, the negative current time 15 ms and negative current -150 A presented better results. Next, the negative polarity parameters were compared with the proportional terms suggested by the literature (%EN). Finally, a form of current curve without positive base current was evaluated, where it can be concluded that the current curve form does not have significance on the penetration results, as well as the necessity of the base current in the arc electric stability.

Key-words: *MIG/MAG Variable Polarity; %EN; Cladding Welding; Dilution; Box-Behnken Design.*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG	3
2.2 Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado	5
2.3 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Generalidades	7
2.4 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Formas de ondas	9
2.5 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: %EN	12
2.6 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Parâmetros da Curva de Corrente	18
2.7 Diluição, Corrente Eficaz e Potência.....	20
2.8 Processo de Soldagem para Revestimento	21
2.9 Projeto de experimentos	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Descrição do Experimento.....	26
3.2 Ensaio Exploratórios	27
3.3 Planejamento do Experimento.....	28
3.4 Variáveis Resposta	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Curva #1: Análise Área A	35
4.2 Curva #1: Análise Área B.....	38
4.3 Curva #1: Análise da Diluição.....	42
4.4 Curva #1: Análise da geometria do cordão de solda	44
4.4.1 Curva #1: Penetração.....	44
4.4.2 Curva #1: Altura	46
4.4.3 Curva #1: Largura.....	49

4.4.4 Curva #1: Análise da relação entre Penetração, Altura e Largura.....	51
4.5 Curva #1: Análise do %EN em relação à Geometria do Cordão de Solda.....	55
4.6 Curva #2: Análise da geometria do cordão de solda	60
4.6.1 Curva #2: Penetração.....	62
4.6.2 Curva #2: Altura	64
4.6.3 Curva #2: Largura.....	67
4.6.4 Curva #2: Análise da relação entre Penetração, Altura e Largura.....	69
4.7 Relação entre Curva #1 e Curva #2	72
5. CONCLUSÕES	74
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A	81
APÊNDICE B	82
APÊNDICE C	83
APÊNDICE D	84
APÊNDICE E	86
APÊNDICE F	87
APÊNDICE G	88
APÊNDICE H	90
APÊNDICE I	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Equipamentos do processo MIG/MAG [Adaptado de Gohr, 2002].	4
Figura 2.2 Vista do detalhe do processo MIG/MAG [Gonzalez, 1997].	4
Figura 2.3 Curva de corrente MIG/MAG pulsado	5
Figura 2.4 Comportamento do arco em CCEP e CCEN [Adaptado de Kim et al., 2007].	8
Figura 2.5 Curva de corrente MIG/MAG polaridade variável.	9
Figura 2.6 Formas de onda estudadas por [Farias et al., 2005].	10
Figura 2.7 Forma de onda tipo D [Nascimento et al., 2008].	11
Figura 2.8 Forma de onda MIG/MAG contínua pulsada (linha sólida) e proposta de MIG/MAG VP (linha pontilhada) [Santos, 2008].	12
Figura 2.9 Forma de onda proposta para controle da penetração [Adaptado de Jaskulski, 2010 apud Kah et al., 2012].	12
Figura 2.10 Penetração versus %EN [Adaptado de Kim et al., 2002].	14
Figura 2.11 Geometria dos cordões versus %EN [Adaptado de Kim et al., 2002].	14
Figura 2.12 Relação entre %EN e penetração [Adaptado de Santos, 2008].	15
Figura 2.13 Gráficos entre %EN e geometria do cordão [Adaptado de Nascimento, 2011].	16
Figura 2.14 Penetração em relação ao %EN (a); Penetração em relação a corrente eficaz (b) [Farias et al., 2005].	17
Figura 2.15 Relação entre %EN e temperatura superficial do metal base (a); %EN versus Deformação na peça (b) [Adaptado de Tong, et al., 2001].	18
Figura 2.16 Esquema do cordão de solda livre sobre a chapa (bead-on-plate) e às áreas usadas na determinação da Diluição.	20
Figura 2.17 Box-Behnken três fatores [Montgomery, 2013].	24
Figura 3.1 Fluxograma das atividades realizadas.	26
Figura 3.2 Tocha de soldagem, Tartílope e metal base (a); Fonte de Soldagem e sistema de aquisição (b); em detalhes o sistema de aquisição (c).	27
Figura 3.3 Curva #1 (a); Curva #2 (b).	29
Figura 3.4 Configuração do cordão de solda do corpo de prova #11 (a) e sua respectiva macrografia (b).	32
Figura 3.5 Esquema do cordão de solda livre sobre a chapa (bead-on-plate) e as variáveis resposta.	32

Figura 4.1 Resultado da Diluição (%) para os ensaios referentes a curva #1.	35
Figura 4.2 Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a área A, curva #1.	36
Figura 4.3 Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a área A, curva #1.	37
Figura 4.4 Gráfico de contorno da área A em relação a I_n e T_n com $T_b = 15$ ms (a); e com $T_b = 10$ ms (b).	37
Figura 4.5 Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a área B, curva #1.	39
Figura 4.6 Gráfico dos efeitos principais para a área B, curva #1.	39
Figura 4.7 Gráfico da interação dos fatores para a área B, curva #1.	40
Figura 4.8 Gráfico de contorno da área B em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e área B em relação a I_n e T_b com $T_n = 15$ ms.	41
Figura 4.9 Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados para a área A (a); para a área B (b).	42
Figura 4.10 Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a penetração, curva #1.	45
Figura 4.11 Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a penetração, curva #1.	46
Figura 4.12 Gráfico de contorno da superfície de resposta da penetração em relação a I_n e T_n com $T_b = 15$ ms (a); e da penetração em relação a I_n e T_b com $T_n = 15$ ms (b).	46
Figura 4.13 Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais para a altura, curva #1.	47
Figura 4.14 Gráfico de Contorno da altura em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e $T_b = 10$ ms (b); e altura em relação a I_n e T_b com $T_n = 10$ ms (c); e $T_n = 15$ ms (d).	48
Figura 4.15 Estimativa da proporção dos efeitos por fator para alargura, curva #1.	49
Figura 4.16 Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais para a largura, curva #1.	50
Figura 4.17 Gráfico da interação dos fatores para a largura, curva #1.	50
Figura 4.18 Gráfico de Contorno da largura em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e da largura em relação a T_n e T_b com $I_n = -150$ A.	51
Figura 4.19 Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados para a Penetração (a); Altura (b); Largura (c).	52
Figura 4.20 Superposição das superfícies de respostas da penetração, altura e largura mostrando a região do ótimo (área não-sombreada). Parâmetro mantido constante $T_b = 10$ ms (a); e $T_b = 15$ ms (b).	55
Figura 4.21 Resultados da penetração em relação as duas formas de cálculo de %EN.	56
Figura 4.22 Gráfico de dispersão entre a penetração e os valores obtidos das Equações 2.4 e 2.5 de %EN.	57
Figura 4.23 Penetração em função de %EN: e variando T_n (a) e variando I_n (b).	58
Figura 4.24 Penetração em relação a corrente eficaz medida.	59

Figura 4.25 Exemplo dos critérios de qualidade, sendo: critério 3 (a); critério 2 (b) e critério 1 (c).	60
Figura 4.26 Resultado da Diluição (%) para os ensaios referentes a curva #2	61
Figura 4.27 Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a penetração, curva #2.	63
Figura 4.28 Gráfico dos efeitos principais para a penetração, curva #2.	63
Figura 4.29 Gráfico de Contorno da superfície de resposta da penetração em relação a I_n e T_n com $I_p = 300$ A (a); e da penetração em relação a I_n e I_p com $T_n = 15$ ms (b).	64
Figura 4.30 Gráfico dos efeitos parâmetros principais sobre a altura, curva #2.	65
Figura 4.31 Gráfico da interação dos fatores para a altura, curva #2.	66
Figura 4.32 Gráfico de Contorno da altura para a curva #2 em relação a I_p e T_n com $I_n = -100$ A (a); em relação a I_n e I_p com $T_n = 15$ ms (b) e com $T_n = 10$ ms (c).	67
Figura 4.33 Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a largura, curva #2.	68
Figura 4.34 Gráfico de contorno da largura para a curva #2 em relação a I_n e I_p com $T_n = 10$ ms (a); e da largura em relação a T_n e I_p com $I_n = -100$ A.	69
Figura 4.35 Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados considerando a curva #2 para a Penetração (a); Altura (b); Largura (c).	70
Figura 4.36 Gráficos de contorno para Penetração, Altura e Largura considerando a curva #2 e valor fixo $I_n = -100$ A.	71
Figura 4.37 Gráfico considerando %EN, Corrente Eficaz e Penetração para ensaios da curva #1 e curva #2.	72
Figura B.1 Curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva #1 no intervalo de 0 a 50 ms.	82
Figura C.1 Curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva #2 no intervalo de 0 a 50 ms.	83
Figura D.1 Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #11 a #25 do projeto Box-Behnken para curva #1.	854
Figura E.1 Curva de corrente e tensão para o ensaio 1, curva #1.	86
Figura G.1 Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #30 a #44 do projeto Box-Behnken para curva #2.	898
Figura H.1 Curva de corrente e tensão para o ensaio 8, curva #2.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Parâmetros do Pulso que cumprem com a condição de UGPP.	7
Tabela 2.2 Revisão bibliografia da utilização da equação do %EN.	13
Tabela 2.3 Parâmetros da Curva utilizados para o experimento.	15
Tabela 2.4 Parâmetros da curva de corrente MIG/MAG PV encontrados na literatura.	20
Tabela 3.1 Parâmetros variáveis do Box-Behnken para a curva #1.	29
Tabela 3.2 Matriz de experimentos Box-Behnken para a curva #1.	30
Tabela 3.3 Parâmetros variáveis do Box-Behnken para a curva #2.	31
Tabela 3.4 Matriz de experimentos Box-Behnken para a curva #2.	31
Tabela 3.5 Variáveis Resposta.	33
Tabela 4.1 Resultados geometria do cordão de solda para curva #1.	34
Tabela 4.2 ANOVA, Área A para curva #1.	35
Tabela 4.3 ANOVA, Área B para curva #1.	38
Tabela 4.4 Níveis necessários para otimização da área A e área B.	42
Tabela 4.5 Coeficientes da equação de regressão para a área A e a área B.	43
Tabela 4.6 Valores dos parâmetros principais I_n , T_n e T_b para minimizar a Diluição.	43
Tabela 4.7 Comparativo dos valores de diluição cálculos e observados.	44
Tabela 4.8 ANOVA, penetração para curva #1.	45
Tabela 4.9 ANOVA, Altura do reforço do cordão de solda, para curva #1.	47
Tabela 4.10 ANOVA, Largura do cordão de solda para curva #1.	49
Tabela 4.11 Níveis necessários para otimização da Penetração, Altura e Largura.	53
Tabela 4.12 Intervalo das variáveis respostas utilizados nos gráficos de contorno.	54
Tabela 4.13 Resultados do critério de qualidade e da geometria do cordão de solda para os parâmetros da curva #2.	61
Tabela 4.14 ANOVA para a Penetração da curva #2.	62
Tabela 4.15 Análise de Variância dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a Altura do reforço do cordão de solda realizado com a curva #2.	65
Tabela 4.16 Análise de Variância dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a Largura do cordão de solda, curva #2.	68
Tabela 4.17 Níveis para otimização da Penetração, Altura e Largura para a curva #2.	70
Tabela 4.18 Intervalo das variáveis respostas utilizados nos gráficos de contorno, curva #2.	71

Tabela 4.19 Comparativo dos valores otimizados das três variáveis de resposta em conjunto para a curva #1 e #2, considerando os gráficos de contorno.	73
Tabela A.1 Parâmetros dos Ensaio Exploratórios para a curva #1.	81
Tabela A.2 Resultados dos Ensaio Exploratórios para a curva #1.	81
Tabela E.1 Dados adquiridos durante o processo de soldagem para a curva #1.	86
Tabela F.1 Coeficientes da equação de regressão para as variáveis resposta: Penetração, Altura e Largura.	87
Tabela H.1 Dados adquiridos durante o processo de soldagem para a curva #2.	90
Tabela I.1 Coeficientes da equação de regressão para as variáveis resposta: Penetração, Altura e Largura, para a curva #2.	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
BOP	<i>Bead on Plate</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
CP	Corpo de Prova
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
EN	Eletrodo Negativo
GDL	Graus de liberdade, tabela ANOVA
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
LS&TC	Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas - UFRGS
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MSR	Metodologia de Superfície Resposta
PV	Polaridade Variável
QM	Quadrado médio, tabela ANOVA
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SQ	Soma dos quadrados, tabela ANOVA
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UGPP	Uma gota por período de pulso

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área fundida do metal base, mm ²
B	Área do metal de adição, mm ²
A+B	Área total da solda, mm ²
b _{ij}	Coefficientes da equação de regressão
d _e	Diâmetro do eletrodo, mm
d _g	Diâmetro da gota, mm
D	Diluição, %
E	Energia de soldagem, J/mm
%EN	Proporção de eletrodo negativo, %
I _b	Corrente de soldagem de base polaridade positiva, A
I _{ef}	Corrente de soldagem eficaz, A
i(t)	Corrente de soldagem instantânea, A
I _m	Corrente média de soldagem, A
I _n	Corrente de soldagem polaridade negativa, A
I _p	Corrente de soldagem de pico polaridade positiva, A
I _{pmax}	Limite superior da corrente de soldagem de pico polaridade positiva, A
H	Altura ou reforço do cordão de solda, mm
i _(t)	Corrente de soldagem em relação ao tempo, A
k	Número de fatores Box-Behnken
L	Largura do cordão de solda, mm
p	Probabilidade de significância, tabela ANOVA
P	Penetração do cordão de solda, mm
p(t)	Potência instantânea, W
P _m	Potência média, W
T	Período da curva de corrente de soldagem, ms
T _b	Tempo da corrente de soldagem de base polaridade positiva, ms
T _n	Tempo da corrente de soldagem polaridade negativa, ms
T _p	Tempo da corrente de soldagem de pico polaridade positiva, ms
U _{ef}	Tensão de soldagem eficaz, V
u(t)	Tensão de soldagem instantânea, V
V _a	Velocidade de alimentação do eletrodo, m/min

V_{a-}	Velocidade de alimentação do eletrodo polaridade negativa, m/min
V_{a+}	Velocidade de alimentação do eletrodo polaridade positiva, m/min
V_s	Velocidade de soldagem, cm/min
X_i	Fatores controláveis
Y	Variável resposta
α	Coefficiente da contribuição do calor do arco para a fusão do eletrodo, m/s.A
β	Coefficiente da contribuição do calor por efeito Joule para a fusão, s ⁻¹ .A ⁻²

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) convencional é largamente utilizado no setor industrial e apresenta uma série de variações para atender às necessidades de soldagem com melhores custos e maiores taxas de produtividade. O processo MIG/MAG com polaridade variável é uma dessas variações, a qual consiste na utilização de curvas de pulsos compostas pelas polaridades positiva e negativa.

A polaridade negativa contínua e constante pode ser utilizada no processo MIG/MAG, apresentando menores taxas de fusão e menor aporte térmico, porém gera instabilidade no arco elétrico, por essa razão a polaridade negativa é utilizada através de pulsos retangulares de correntes, combinando a polaridade negativa e a positiva, para assim conseguir atingir a estabilidade do arco elétrico. O MIG/MAG com polaridade variável apresenta como principais benefícios em relação ao processo convencional, alta taxa de fusão, aliada ao baixo aporte térmico, menores deformações e um melhor controle da penetração e diluição.

Conforme apresentado por [Farias et al., 2005; Puhl, 2011], o processo MIG/MAG com polaridade variável pode ser utilizado na soldagem para revestimento, pois apresenta menor aporte térmico, controle da penetração e altas velocidades de soldagem. Para atingir ótimas soldas de revestimento, deve-se minimizar a diluição, para assim minimizar a influência do metal base sobre a camada superficial final da junta soldada, a qual apresenta características anticorrosivas, provenientes do metal de adição [Gomes, 2010].

Os parâmetros da curva de corrente típica do processo MIG/MAG com polaridade variável são: corrente de pico positiva (tempo e intensidade), corrente de base positiva (tempo e intensidade) e corrente negativa (tempo e intensidade). A seleção desses seis parâmetros distintos, adicionais aos parâmetros da soldagem convencional, torna o entendimento do processo complexo. Muitos autores utilizam termos proporcionais (%EN) compostos por esses seis parâmetros para assim buscar o entendimento da polaridade negativa no processo.

Considerando a complexidade da seleção dos parâmetros, neste trabalho é analisada a influência dos parâmetros da polaridade negativa da curva de corrente típica no processo de soldagem MIG/MAG polaridade variável, utilizando a metodologia de projeto de experimentos Box-Behnken, aliada à metodologia da superfície de resposta.

O objetivo deste trabalho é analisar os parâmetros da polaridade negativa da curva de corrente típica do processo, na aplicação de soldagem para revestimento sobre o metal base em aço ao carbono (SAE 1020), com metal de adição de aço inoxidável (ER308LSi), assim

buscando minimizar a diluição no processo. Este trabalho também visa o entendimento dos parâmetros da polaridade negativa (tempo e intensidade) sobre a geometria do cordão de solda (penetração, largura e altura), assim como, uma busca da relação entre os parâmetros da polaridade negativa e as proporções da polaridade negativa (%EN), encontradas na literatura. E, por fim, é analisada uma das variações da forma da curva de corrente, que consiste da não utilização da corrente de base, apenas a corrente de pico positiva e a corrente negativa, assim, comparando essa curva mencionada com a curva de corrente típica (com corrente de base positiva).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

Atualmente, o processo MIG/MAG é uma das técnicas de soldagem mais utilizadas porque apresenta alta produtividade aliada a fácil e simples utilização podendo ser aplicada em juntas de simples geometrias, desde cordões de solda sobre uma chapa até em geometrias complexas com grande responsabilidade estrutural como soldas submersas e chassis de motocicletas e bicicletas. Conforme apontado por [Miranda e Ferraresi, 2003], esse processo é vastamente utilizado, principalmente por apresentar elevadas taxas de produtividade, boa qualidade do cordão de solda e custos considerados admissíveis.

Esse processo vem sendo utilizado há décadas e graças às qualidades apresentadas fazem com que o processo MIG/MAG seja um processo muito competitivo nos dias atuais. Segundo [Nascimento e Vilarinho, 2006], o processo MIG/MAG foi patenteado em 1930 por Hobart e Devers, contudo foi em 1948 que esse processo foi utilizado em âmbito comercial, pois desde essa data começou a ser utilizado com gás de proteção inerte. Lembrando que a nomenclatura MIG/MAG é um acrônimo do inglês de *Metal Inert Gas* (MIG) e de *Metal Active Gas* (MAG), como apresentado por [Machado, 1996], o processo MIG/MAG consiste do arco elétrico entre a peça e um eletrodo, sendo este totalmente consumível, e a proteção da poça de fusão é dada através de um gás podendo ser inerte ou ativo. Argônio e hélio são exemplos de gases inertes, assim como o CO₂ é um exemplo de gás ativo, os quais possuem como principal função proteger a poça de fusão dos gases atmosféricos.

O processo de soldagem ocorre através do sistema de alimentação do arame, o qual é energizado pela da fonte de energia, que pode ser do tipo tensão constante ou corrente constante. Usualmente utilizado em processos automáticos e semiautomáticos, a fonte de soldagem de tensão constante possui pequenas variações da tensão final para grandes variações na corrente de soldagem. Em processos manuais é aconselhado a utilização de fonte de energia do tipo corrente constante, onde a qual para pequenas variações de correntes ocorrem altas alterações na tensão de soldagem, segundo exposto por [Gonzalez, 1997].

Para a alimentação do arame-eletrodo, assim como a sua energização através da corrente elétrica, este sistema de soldagem é composto de uma fonte de soldagem, bobina do arame, sistema de alimentação do arame. Para a proteção contra oxidação (em altas temperaturas) necessita-se da adição do gás de proteção ao sistema e todos estes conectados à tocha de soldagem, conforme se mostra na Figura 2.1 [Gohr, 2002].

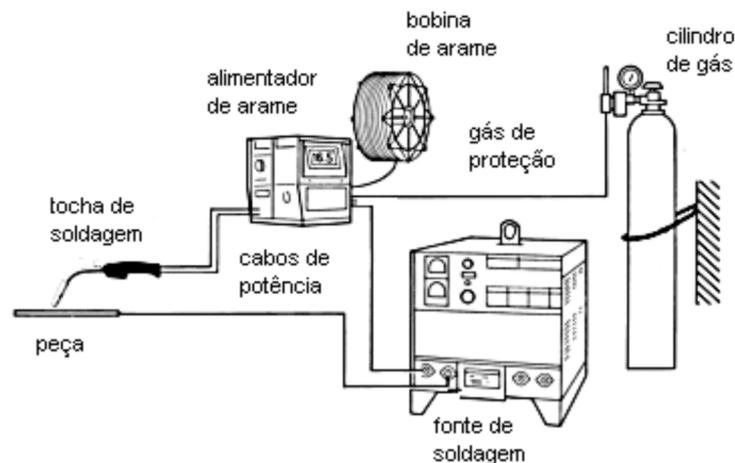


Figura 2.1 – Equipamentos do processo MIG/MAG [Adaptado de Gohr, 2002].

O arame-eletrodo energizado a partir da fonte de soldagem acaba fundindo, através da energia do arco elétrico que é transformada em calor, em gotas metálicas que são transferidas à poça de fusão e por consequência a constituição do cordão de solda [Cirino, 2009]. O detalhe do processo de soldagem MIG/MAG é ilustrado na Figura 2.2.

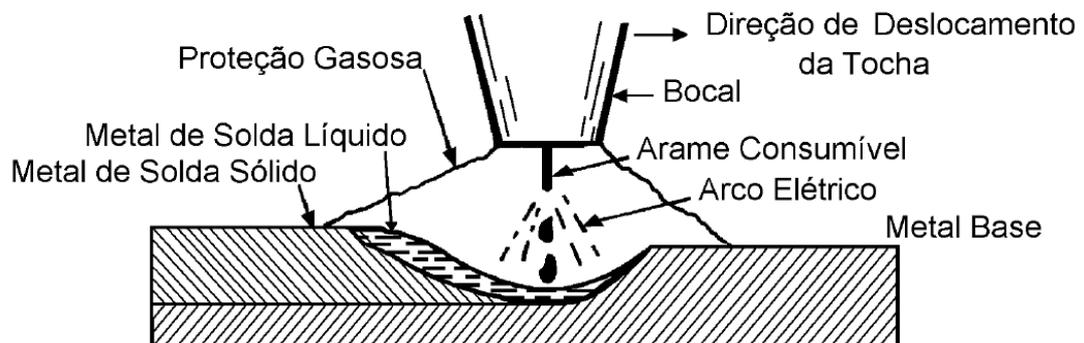


Figura 2.2 – Vista do detalhe do processo MIG/MAG [Gonzalez, 1997].

A transferência metálica no processo MIG/MAG, segundo [AWS, 1991], pode ser dividida em três formatos diferentes as quais são:

- a) Transferência por curto-circuito;
- b) Transferência globular;
- c) Transferência por aerossol.

O modo de transferência metálica por curto-circuito ocorre em baixa corrente e tensão de arco elétrico. Neste modo, ocorre o contato entre a gota e a poça de fusão antes do destacamento [Scotti e Ponomarev, 2008]. Por sua vez, o modo de transferência globular acontece para valores maiores de correntes e tensões, onde a transferência do metal da ponta do arame se produz por gotas, com diâmetro superior ao do arame. Entretanto, o modo de transferência por aerossol ocorre através de um processo de vaporização da ponta do eletrodo

devido a que alcança temperaturas mais elevadas que os outros modos. O modo aerossol apresenta maiores taxas de deposição e penetração, conforme apresentado por [Machado, 1996].

Segundo [AWS, 1991], os modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG estão relacionados aos cinco parâmetros do processo, os quais são descritos:

- a) Tipo de corrente e intensidade de corrente de soldagem;
- b) Diâmetro do eletrodo;
- c) Composição química do eletrodo;
- d) Extensão do eletrodo;
- e) Gás de proteção.

O tipo de corrente de soldagem, normalmente utilizado no processo de MIG/MAG, é a corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP). Porém existem variações deste tipo de corrente atualmente, podendo variar entre contínua ou alternada, e entre constante ou pulsada.

2.2 Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado

O processo de soldagem MIG/MAG com corrente pulsada contínua visa destacar uma gota por período de pulso de corrente. Esta transferência de uma gota por pulso apresenta diversas vantagens como: baixo aporte térmico comparada com a corrente contínua (CCEP), melhor controle do material depositado, geometria do cordão uniforme, redução da produção de salpicos, possibilidade de cordões de solda em chapas de espessuras menores, possibilidade de utilização para soldagem em todas as posições [Andrade, 2012; Gohr, 2012; Machado, 1996].

Os parâmetros da curva da corrente pulsada são: I_p (corrente de pico), T_p (tempo de pico), I_b (corrente de base), T_b (tempo de base), conforme apresentado na Figura 2.3.

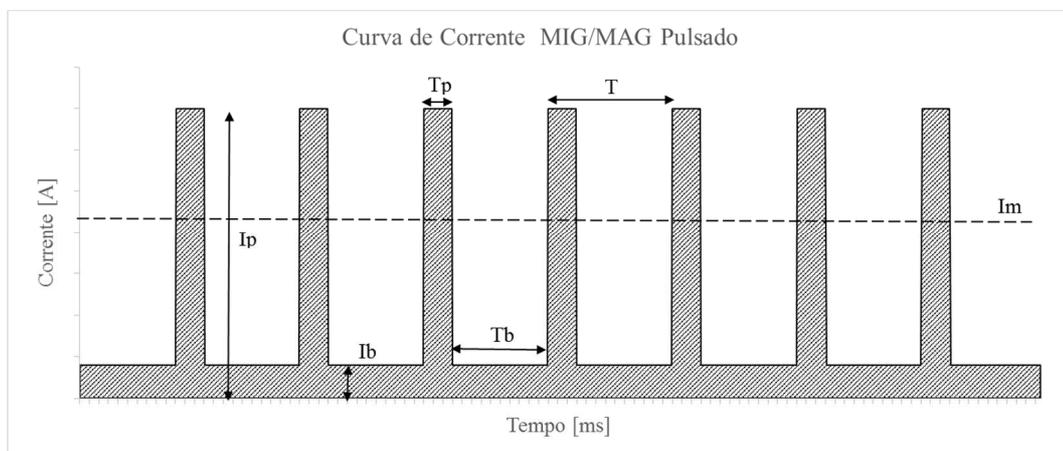


Figura 2.3 – Curva de corrente MIG/MAG pulsado

Como apresentado na Figura 2.3, o período (T) é o parâmetro onde pode-se verificar a repetição da onda, sendo a soma do tempo de base (T_b) e o tempo de pico (T_p). A corrente média (I_m) é determinada pela Equação 2.1, a qual é sugerida por [Andrade, 2012] que permanece constante para que a taxa de fusão e a velocidade de alimentação do arame permanecem em equilíbrio.

$$I_m = \frac{I_p T_p + I_b T_b}{T_p + T_b} \quad (2.1)$$

Segundo [Gonzalez, 1997], o limite superior do valor da corrente de pico (I_{pmax}), está vinculado a relação apresentada pela Equação 2.2, assim como o limite inferior da corrente de pico, está limitado pela igualdade $I_p = I_b = I_m$.

$$I_{pmax} = \frac{T}{T_p} \times I_m \quad (2.2)$$

Esta relação é importante para entender os principais parâmetros do pulso que afetam o destacamento da gota, visando a transferência metálica de uma gota por período de pulso. O período (T), apresentado na Equação 2.2, é a soma do tempo de pico (T_p) e do tempo de base (T_b) e está diretamente relacionado com o diâmetro da gota (d_g), assumindo que é uma esfera, conforme demonstrado na Equação 2.3 [Vilarinho et al., 2000].

$$d_g = \sqrt[3]{1,5 \cdot (T_p + T_b) d_e^2 \cdot V_a} \quad (2.3)$$

Sendo, V_a velocidade de alimentação do arame [mm/s], d_e diâmetro do eletrodo [mm], d_g diâmetro da gota [mm].

Geralmente, para obter a relação de uma gota por período de pulso (UGPP) é necessário realizar a variação dos parâmetros da curva de corrente (corrente e tempo de pico e corrente e tempo de base). Como apresentado por [Miranda e Ferraresi, 2003], é difícil constatar a obtenção de uma gota por período de pulso, no processo MIG/MAG pulsado. Eles utilizaram sensor óptico para verificar o destacamento da gota em relação ao pulso de corrente, os quais chegaram a valores de corrente de pico de 240 A com tempo de pico de 4,8 ms e uma segunda combinação de parâmetros de corrente de pico de 330 A e tempo de pico de 3,0 ms, com a utilização de arame de aço inoxidável de 1,2 mm de diâmetro (ER 308LSi), gás de proteção de Ar + 3% CO₂ + 2% de N₂, assim como corrente de base de 40 A e tempo de base de 10 ms.

Como realizado por [Praveen et al., 2009], através da utilização de uma câmera de captura em alta velocidade, com experimentos de juntas soldadas compostas por ligas de alumínio 6061, e arame eletrodo também de alumínio 4047 com 1,2 mm de diâmetro, foi empregado o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado com gás de proteção de puro argônio, tendo como objetivo a obtenção da condição de UGPP. Nesse experimento foram variados os parâmetros de pulso, para a condição de uma gota por período de pulso, e obtiveram os seguintes valores: 220 A para a corrente de pico, 6 ms para o tempo de pico, 40 A para a corrente de base e 10 ms para o tempo de base.

Igualmente utilizando eletrodo de alumínio 4047 com 1,2 mm de diâmetro, [Subramaniam et al., 1998] buscou cumprir com a condição de uma gota por período de pulso, UGPP, variando os parâmetros da curva de corrente, como a corrente de pico e o período (tempo de pico e tempo de base). Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade, conclui que existe uma relação independente entre os parâmetros para conseguir a condição de UGPP, sendo o tempo de pico é um dos fatores mais críticos. Na Tabela 2.1, pode-se verificar os valores encontrados pelos autores [Subramaniam et al., 1998].

Tabela 2.1- Parâmetros do Pulso que cumprem com a condição de UGPP.

Ensaio	Corrente de pico (A)	Corrente de base (A)	Tempo de pico (ms)	Tempo de base (ms)
#18	320	55	1,3	5,3
#19	400	70	0,6	1,9
#15	250	100	1	1,5
#16	250	150	1,1	3,3
#2	400	150	1	1,5

Fonte: adaptada de Subramaniam et al., 1998

2.3 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Generalidades

O processo de soldagem MIG/MAG é um dos processos mais utilizados atualmente para a produção de cordões de solda em grandes extensões, como na fabricação de carros, motocicletas entre outros. Porém alguns problemas normalmente são encontrados, principalmente na soldagem com alumínio, como por exemplo, excesso de fusão, não fechamento de aberturas em juntas 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.

Mas primeiramente é necessário o entendimento da nomenclatura desta ramificação do processo de MIG/MAG, sendo largamente encontrado na literatura com duas nomenclaturas

distintas: corrente alternada pulsada (CA) ou polaridade variável (PV). Segundo exposto por [Nascimento e Vilarinho, 2006], as duas formas de nomenclatura estão relacionadas com a utilização da polaridade negativa no processo de soldagem. Entretanto, entende-se que 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. Como demonstrado por [Kim et al., 2007] na Figura 2.4, 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.

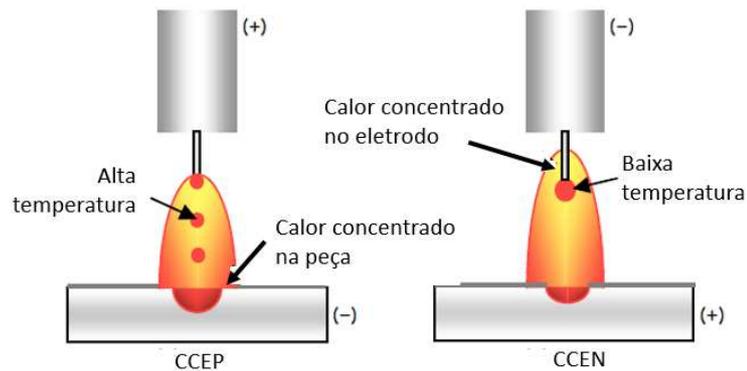


Figura 2.4 – Comportamento do arco em CCEP e CCEN [Adaptado de Kim et al., 2007].

[Tong et al., 2001] constataram que a utilização do eletrodo negativo (EN) comparado com o MIG/MAG convencional apresenta menores valores de temperatura na peça. Em 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. Pode-se realizar uma analogia com o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), quando em CCEN, cerca de 70% do calor proveniente do processo de soldagem é destinado ao metal base, esta proporção se inverte quando em CCEP, onde cerca de 70% do calor permanece no eletrodo, e para corrente alternada ocorre um balanço da distribuição da temperatura [AWS, 1991]. Lembrando que os efeitos de polaridade entre os processos de

soldagem TIG e MIG/MAG se invertem devido ao fluxo dos elétrons (da emissão termiônica), sendo CCEP para MIG/MAG igual a CCEN para TIG, onde a maior parte do calor é destinada ao metal base.

Mas esta alta taxa de fusão, aliada à baixa temperatura no metal base gera 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. Como exposto por [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.

A combinação das polaridades é realizada através da utilização de pulsos positivos, corrente de base positiva e corrente de pulso negativa, por esta razão da nomenclatura polaridade variável (PV), pois não há uma proporção homogênea entre as polaridades.

2.4 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Formas de ondas

A curva de corrente mais utilizada no processo de MIG/MAG com polaridade variável é muito semelhante à curva utilizada para MIG/MAG pulsado corrente contínua (CC), com adição da parte negativa, assim apresentando três partes: pulso positivo, base positiva e pulso negativo, conforme Figura 2.5.

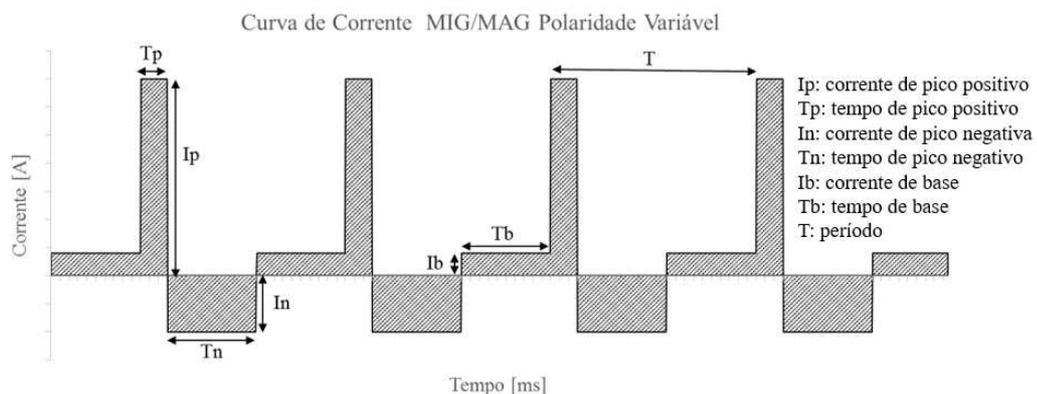


Figura 2.5 – Curva de corrente MIG/MAG polaridade variável.

Segundo [Gohr, 2002], a corrente de base (anterior a corrente de pico positiva) possui função de equilibrar a energia entre as duas polaridades e deve ser mantida constante. Este benefício também é apresentado por [Nascimento et al., 2008], concluindo que a corrente de base é fundamental para as mudanças severas de polaridade, e evita salpicos no processo de soldagem.

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 2.6.

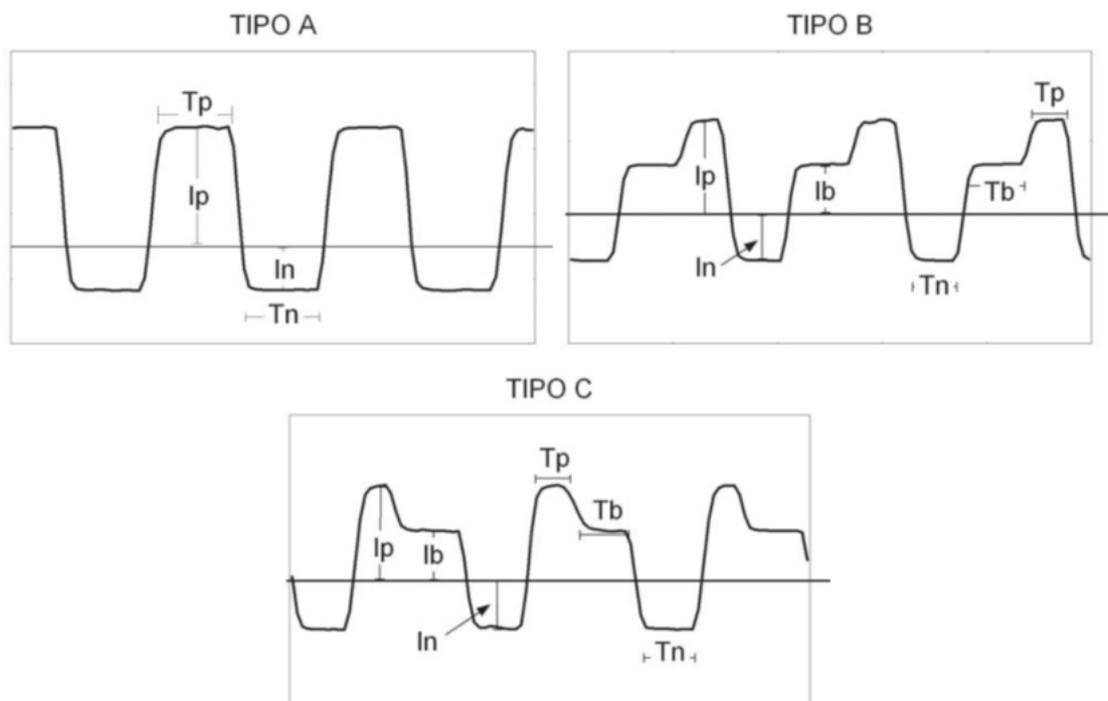


Figura 2.6 – Formas de onda estudadas por [Farias et al., 2005].

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 a proporção da polaridade negativa (%EN), que será discutido posteriormente.

As formas de onda da Figura 2.6, também foram estudadas pelos autores [Nascimento et al., 2008; Vilarinho et al., 2009]. Ao estudo foi adicionado o tipo de curva D a qual possui tempos de base anterior e posterior ao pico de corrente positivo, conforme a Figura 2.7. Este experimento foi realizado com eletrodo AWS ER70S-6, gás de proteção Ar + 2% O₂ e auxílio de filmagem em alta velocidade.

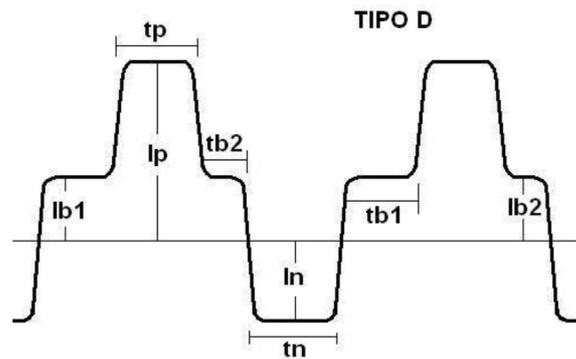


Figura 2.7 – Forma de onda tipo D [Nascimento et al., 2008].

Em relação à curva A, sem a corrente de base, a condição de uma gota por período de pulso não foi atingida, onde ocorreu instabilidade no arco elétrico e salpicos. Para os demais tipos de onda, a condição de UGPP foi atingida. A forma de onda D, apresentou maiores valores de penetração, assim como a curva tipo A apresentou menores valores de penetração. Esta mesma relação foi alcançada no reforço do cordão de solda, sendo a onda D responsável pelos maiores valores de reforço, e a onda A com os resultados opostos. Como conclusão, as curvas B e C apresentam melhor estabilidade e atingiram a condição de UGPP, assim evidenciando a importância da corrente de base no processo [Nascimento et al., 2008; Vilarinho et al., 2009].

A forma de onda tipo D apresentada na Figura 2.7, também foi estudada por [Tong et al., 2001], onde os autores aconselham a utilização de uma corrente de base positiva após o pico positivo de aproximadamente 1,5 ms para prevenir formação de salpicos devido a forças repulsivas. Experimentos foram realizados com eletrodos de alumínio [Wang, 1997 apud Santos, 2008], o qual apresenta que o fenômeno das forças repulsivas não ocorre na soldagem de eletrodos de aço, dessa forma não é necessário a utilização da corrente de base após o pulso positivo.

Em relação a soldagem MIG/MAG PV em aço, experimentos foram realizados com arame ER 70S6 e gás de proteção Argônio com 8% CO_2 , utilizando onda do tipo A da Figura 2.6, a qual foi tomada por base a curva de corrente de MIG/MAG contínua pulsada, conforme a Figura 2.8, ou seja, foi deslocado a corrente de base para a polaridade negativa. [Santos, 2008] concluiu que pode ser utilizado o processo MIG/MAG com corrente alternada em aço sem utilizar corrente de base positiva, pois não compromete a soldagem.

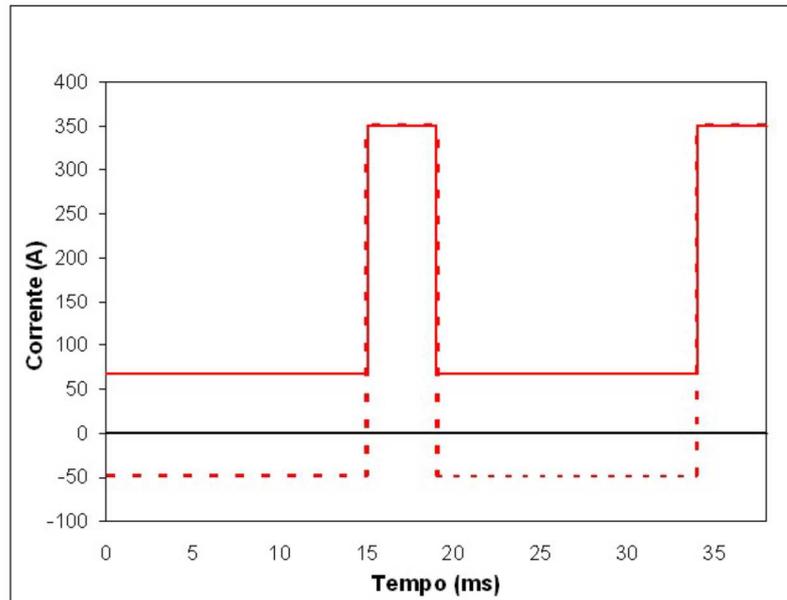


Figura 2.8 – Forma de onda MIG/MAG contínuo pulsado (linha sólida) e proposta de MIG/MAG VP (linha pontilhada) [Santos, 2008].

[Jaskulski, 2010 apud Kah et al., 2012] apresentaram uma forma diferenciada para controle da quantidade de polaridade na curva de corrente. Conforme a Figura 2.9, a curva (a) representa a curva com corrente de pico positivo, seguida pela corrente de base positiva e a corrente de pico negativa. Porém na curva (b), o autor sugeriu o controle da polaridade através da substituição de parte da corrente de base positiva por corrente de base negativa, com o objetivo de controlar a penetração do cordão de solda. Os resultados obtidos mostraram baixos valores de penetração e menor risco de excesso de fusão.

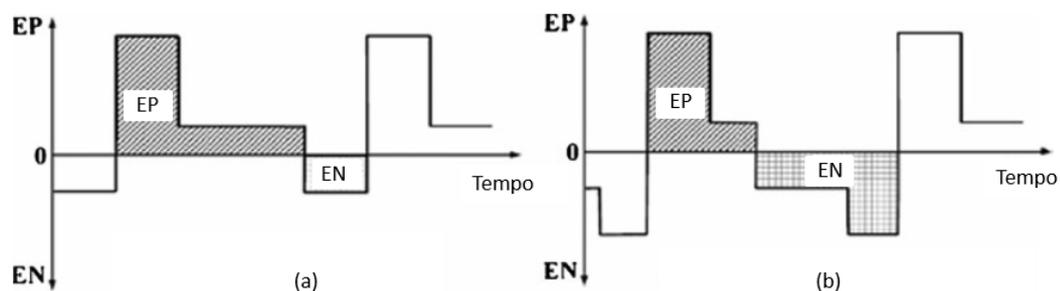


Figura 2.9 – Forma de onda proposta para controle da penetração [Adaptado de Jaskulski, 2010 apud Kah et al., 2012].

2.5 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: %EN

A forma de onda convencional, apresentada na Figura 2.5, 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), fazendo que

o entendimento da variação desses parâmetros seja um procedimento muito complexo. Por essa razão, muitos autores utilizam um fator que representa o percentual da polaridade negativa em relação ao total da curva de corrente, chamado de percentual de eletrodo negativo (%EN), o qual é utilizado para entender a variação da polaridade negativa em relação as variáveis do processo de soldagem, como por exemplo a penetração, temperatura, entre outros. A proporção %EN é encontrada da literatura em duas formas diferentes de cálculo conforme as Equações 2.4 e 2.5.

$$\%EN = \frac{I_n \times T_n}{(I_n \times T_n) + (I_p \times T_p) + (I_b \times T_b)} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\%EN' = \frac{T_n}{T_n + T_p + T_b} \times 100 \quad (2.5)$$

Basicamente o que difere as formas de cálculo de %EN e %EN' é a consideração dos respectivos valores de corrente na equação. Para um mesmo conjunto de parâmetros pode-se obter valores diferentes de %EN dependendo de qual equação é utilizada, porém o essencial é o entendimento de que independente do cálculo utilizado, quando se aumenta o %EN aumenta-se a participação da polaridade negativa no processo. Na Tabela 2.2 foi realizada uma classificação dos trabalhos estudados quanto ao critério utilizado para o cálculo do %EN.

Tabela 2.2- Revisão bibliografia da utilização da equação do %EN.

Forma de Cálculo	Referências
Equação 2.4	[Kim et al., 2002]; [Farias et al., 2005]; [Kim et al., 2007]; [Park et al., 2009]; [So et al., 2010]; [Kah et al., 2012]
Equação 2.5	[Nascimento et al., 2008]; [Santos, 2008]; [Cirino, 2009]; [Vilarinho et al., 2009]; [Nascimento, 2011]; [Monteiro e Scotti, 2013]; [Dutra et al., 2015]
Não mencionado	[Talkington, 1998]; [Tong et al., 2001]; [Harwig et al., 2002]; [Joseph, 2003]; [Kumar et al., 2009];

Em geral, o aumento da polaridade negativa na curva de corrente gera uma redução da penetração na geometria do cordão de solda. Esta condição é representada por [Kim et al., 2002] na Figura 2.10, onde é ilustrado o aumento da polaridade negativa, considerado pelo valor de %EN entre zero e 50%, e por sua vez os efeitos na penetração e característica do cordão de solda.

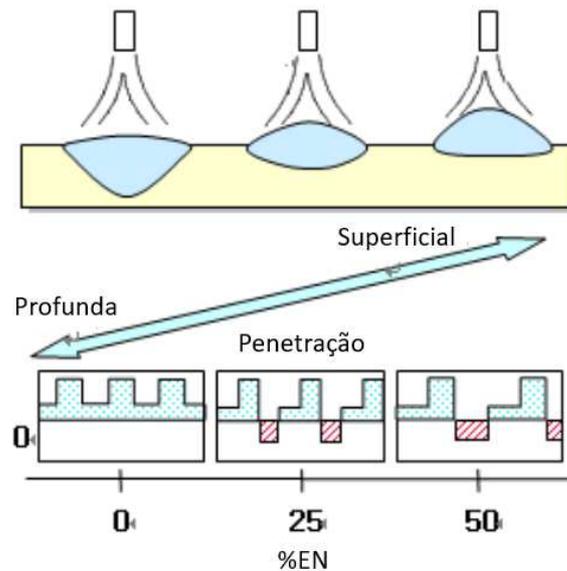


Figura 2.10 – Penetração versus %EN [Adaptado de Kim et al., 2002].

[Kim et al., 2002] realizaram experimentos com eletrodos de alumínio e gás de proteção argônio puro, chapas de alumínio finas de 1 a 2 mm de espessura, variando o %EN entre 5% até 40%, com objetivo de controlar a penetração no processo de soldagem. Na Figura 2.11 estão ilustrados os resultados encontrados dos cortes transversais, os quais mostram claramente uma redução da penetração e largura com o aumento do %EN, assim como o aumento da altura do cordão de solda.

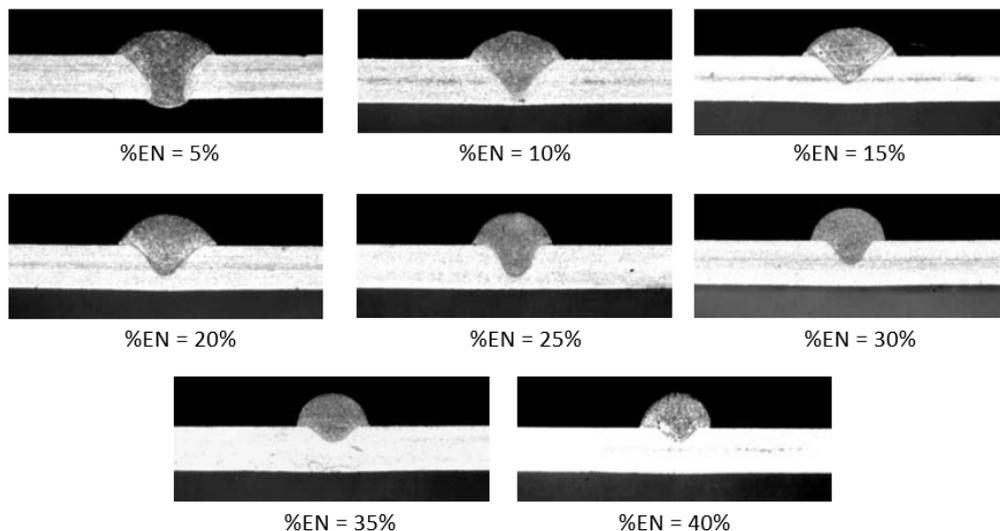


Figura 2.11 – Geometria dos cordões versus %EN [Adaptado de Kim et al., 2002].

Ensaios foram realizados por [Santos, 2008] utilizando MIG/MAG PV em aço ao carbono com eletrodo ER70S-6 e gás de proteção Ar + 8% CO₂, variando o tempo de base em quatro níveis (20, 13, 8, 3 ms), corrente de base (78, 80, 84, 101 A), assim como o tempo de

corrente negativa em quatro níveis (0, 7, 12, 17 ms), dessa forma obteve quatro diferentes percentuais de %EN (0, 30, 50 e 70). Os demais valores da curva de corrente de PV, como corrente de pico, tempo de pico, corrente negativa foram mantidos constantes, conforme a Tabela 2.3. Velocidade de alimentação do arame (V_a) foi mantida constante em 2,7 m/min, assim como a velocidade de soldagem (V_s) em 54 cm/min. Os resultados dos cordões de solda obtidos por [Santos, 2008] encontram-se na Figura 2.12, a qual apresenta uma redução da penetração entre 30% e 50% de %EN. Entretanto, esperava-se a redução de penetração por subsequência em 70%, mas houve um aumento de penetração nesta situação, explicada pelo autor, como possível relação com os efeitos de repulsão da gota e a provável variação do diâmetro da gota.

Tabela 2.3- Parâmetros da Curva utilizados para o experimento.

Experimento	%EN	I_p (A)	T_p (ms)	I_n (A)	T_n (ms)	I_b (A)	T_b (ms)
AC0033	0	300	4	0	0	78	20
AC3033	30	300	4	60	7	80	13
AC5033	50	300	4	60	12	84	8
AC7033	70	300	4	60	17	101	3

Fonte: adaptada de Santos, 2008

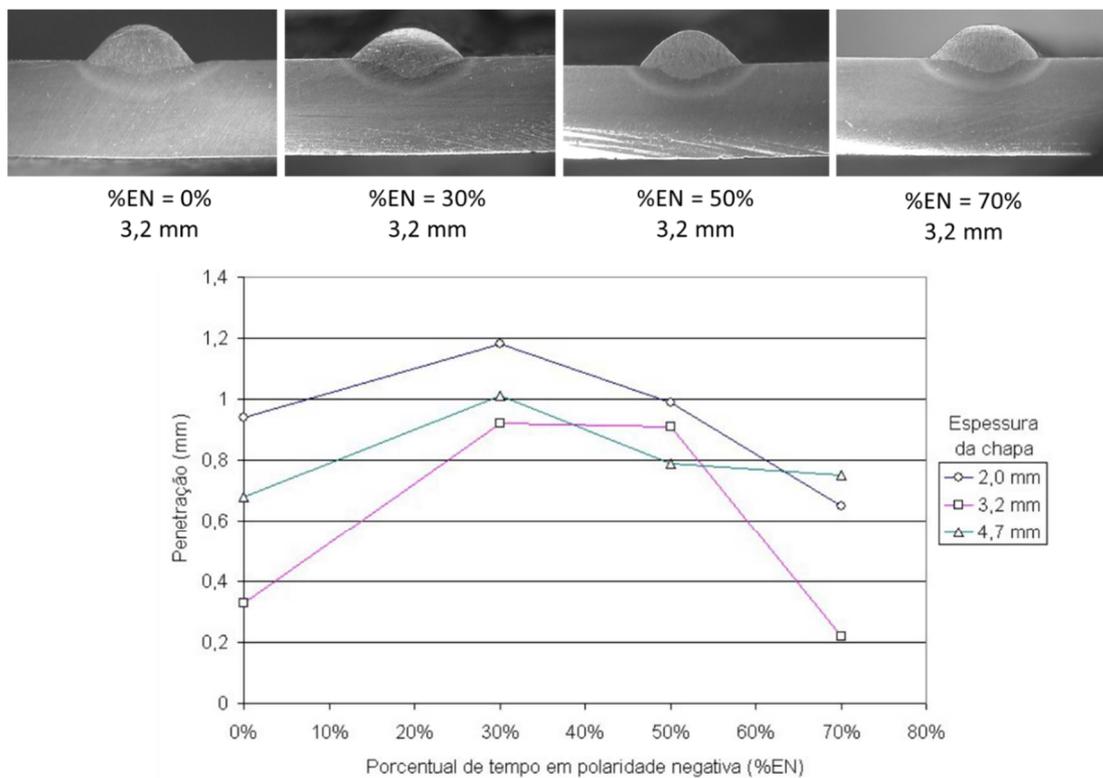


Figura 2.12 – Relação entre %EN e penetração [Adaptado de Santos, 2008].

Como apresentado anteriormente, [Nascimento et al., 2008; Vilarinho et al., 2009; Nascimento, 2011] realizaram estudos referentes às variações da forma de onda para MIG/MAG polaridade variável, nas Figuras 2.6 e 2.7, do tipo A ao D. Além disto, nesse estudo foram consideradas as relações de %EN, formas de onda em relação à geometria do cordão de solda. Independente de qual a forma de onda, os parâmetros da geometria do cordão, como penetração, largura e reforço variam em relação ao %EN adotado, em suma, com o aumento da proporção da polaridade negativa ocorreram reduções nos valores de penetração e largura do cordão, e causou aumento nos valores de altura (reforço do cordão de solda). Estes resultados são apresentados na Figura 2.13.

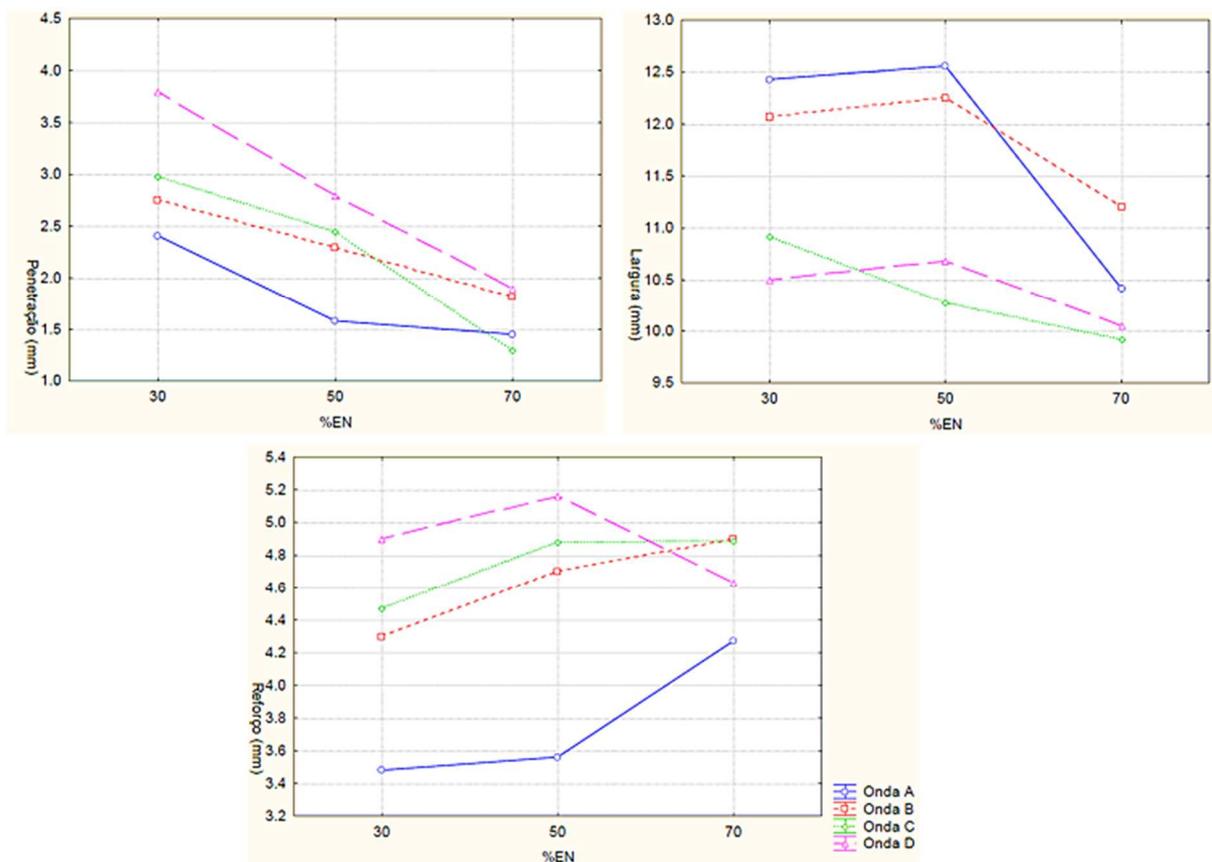


Figura 2.13 – Gráficos entre %EN e geometria do cordão [Adaptado de Nascimento, 2011].

[Farias et al. 2005] realizaram estudos referentes ao %EN (cálculo através da Equação 2.4) em relação à penetração, onde obtiveram resultados da correspondência inversa entre %EN e penetração, maiores valores da proporção da polaridade negativa resultaram em menores penetrações, como apresentado na Figura 2.14 (a). [Farias et al., 2005], no mesmo experimento, mostraram a relação proporcional entre a corrente eficaz e a penetração no cordão de solda realizado com MIG/MAG PV, conforme mostrado na Figura 2.14 (b), onde

com a utilização de um maior valor de corrente eficaz, obtiveram resultados de maior penetração nos ensaios.

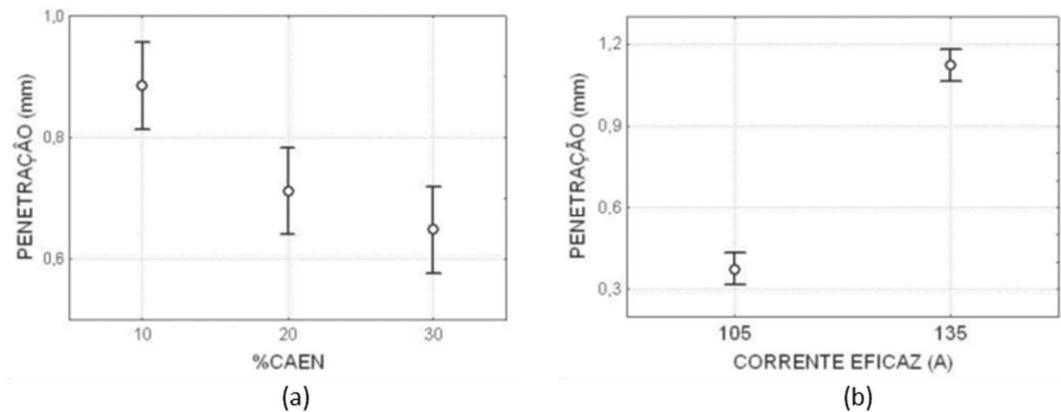


Figura 2.14 – Penetração em relação ao %EN (a); Penetração em relação a corrente eficaz (b) [Farias et al., 2005].

Além dos trabalhos mencionados anteriormente, outras fontes também concluíram através de experimentos que com o aumento da polaridade negativa na curva de corrente, ocorre uma relação inversamente proporcional ao resultado da penetração no cordão de solda, onde aumentando o valor de %EN causa uma redução da penetração [Talkington, 1998; Tong et al., 2001; Farias et al., 2005; Kumar et al., 2009; So et al., 2010; Monteiro e Scotti, 2013].

Existem interações importantes entre o %EN e os outros parâmetros de controle e a(s) resposta(s) do processo. [Tong et al., 2001] trabalharam em apresentar a relação entre a proporção de polaridade negativa e a temperatura no metal base, e a deformação que a peça sofre após a realização do processo de soldagem. Utilizando eletrodo de alumínio A5356 e metal base também de alumínio A5052, os autores demonstraram a relação entre o aumento da participação da polaridade negativa (0 a 40%) e a redução das temperaturas na superfície do metal de base, conforme a Figura 2.15 (a). Por consequência da redução da temperatura na peça, também foi constatada a redução da deformação final, conforme mostra a Figura 2.15 (b).

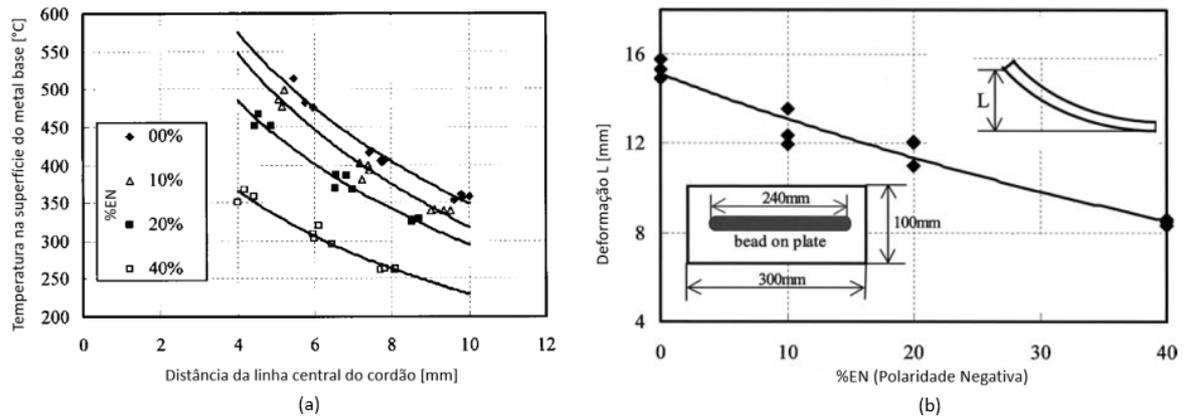


Figura 2.15 – Relação entre %EN e temperatura superficial do metal base (a); %EN versus Deformação na peça (b) [Adaptado de Tong, et al., 2001].

A redução do aporte térmico no metal base também é concluída por outros autores da literatura, ou seja, a contribuição térmica é contrariamente proporcional ao aumento da participação da polaridade negativa [Kim, et al., 2002; Nascimento et al., 2008; Park et al., 2009; Vilarinho et al., 2009; So et al., 2010; Monteiro e Scotti, 2013; Dutra et al., 2015]. Acrescentando a esta afirmação, [Harwig et al., 2002] mostraram que a curva de corrente se considerada com a parte da polaridade negativa comparada com MIG/MAG pulsado, a qual pode reduzir em até 25% o calor transferido para a peça soldada.

2.6 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável: Parâmetros da Curva de Corrente

A utilização do processo MIG/MAG polaridade variável ainda é um desafio, como mencionado anteriormente, existem seis parâmetros (I_p , T_p , I_n , T_n , I_b , T_b) apenas considerando a curva de corrente que precisam ser determinados, sem computar os parâmetros inerentes do processo de soldagem como o tipo e vazão do gás de proteção, DBCP, velocidade de soldagem entre outros.

Alguns autores utilizam a corrente média (I_m) para assim variar os parâmetros da curva e alcançar os níveis de proporção da polaridade negativo para realização do estudo, como avaliado por [Kim et al., 2002; Tong et al., 2003; Park et al., 2009; So et al., 2010]. Algumas fontes de soldagem apresentam parâmetros pré-determinados para a soldagem com polaridade variável, controlando automaticamente a velocidade de alimentação e a relação do eletrodo positivo e negativo, como utilizado por [Joseph et al., 2003].

[Santos, 2008] desenvolveu um sistema de monitoramento do processo, usando sensores óticos e controle da tensão e corrente do arco elétrico. Em suma, determinou relações

entre a corrente média (I_m) e a velocidade de alimentação do arame (V_a), para assim calcular os valores dos demais parâmetros da curva de corrente.

A metodologia proposta por [Nascimento, et al., 2008; Vilarinho, et al., 2009], considera a equação da taxa de fusão do processo (equação do consumo), a qual é uma relação da velocidade de alimentação do arame com a corrente média e a corrente eficaz. Para essa igualdade se satisfazer, existem coeficientes relacionados a contribuição do calor para a fusão do eletrodo (α , β). A Equação 2.6 apresenta a relação entre V_a (m/s) em relação a I_m (A) e I_{ef} (A).

$$V_a = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot L \cdot I_{ef}^2 \quad (2.6)$$

Sendo, L o comprimento do eletrodo (m), e os coeficientes de regressão não lineares, α (m/s.A) e β (s⁻¹A⁻²). Importante ressaltar que estes valores de α e β apresentam diferentes valores para polaridade positiva e negativa. A grande premissa nessa metodologia, também utilizada por [Scotti e Monteiro, 2012; Dutra et al., 2015], é igualar a equação do consumo para as duas polaridades, conforme a Equação 2.7. Isto se deve por causa da grande diferença da taxa de fusão entre as duas polaridades, para assim garantir a estabilidade do arco elétrico.

$$V_{a-} = V_{a+} \quad (2.7)$$

[Nascimento, et al., 2008], relacionam quais são os passos necessários para determinação dos parâmetros: primeiramente deve-se obter os parâmetros do pulso positivo (I_p e T_p) que satisfaçam a condição de UGPP, muitas vezes considerados iguais ao MIG/MAG pulsado corrente contínua (CC). Em seguida, utiliza-se a corrente de base maior que 20 A, para assim garantir que o arco elétrico não se extinga, e garantir sua estabilidade. Após, define-se os tempos de base e de polaridade negativa para que satisfaçam o percentual de eletrodo negativo, %EN, que desejasse analisar (Equação 2.5). E por fim utilizando a Equação 2.7, calcula-se a corrente negativa. Etapas semelhantes foram aplicadas por [Savi, 2014; Dutra, et al., 2015] na determinação dos parâmetros para a curva de corrente no processo MIG/MAG PV.

Porém, estas metodologias necessitam de um grande número de experimentos, e os coeficientes de fusão são específicos para cada aplicação e material de soldagem, assim tornando a aplicação do método complexa e muito exclusiva para um caso específico.

Na Tabela 2.4, encontra-se os intervalos dos parâmetros da curva de corrente utilizados pelos autores estudados para o processo MIG/MAG PV, assim como os materiais aplicados nos experimentos.

Tabela 2.4- Parâmetros da curva de corrente MIG/MAG PV encontrados na literatura.

Referência	Metal Base	Eletrodo AWS [mm]	I_p [A]	T_p [ms]	I_n [A]	T_n [ms]	I_b [A]	T_b [ms]
[Nascimento, et al., 2008]; [Vilarinho, et al., 2009]	Aço	ER 70S6 (1,0)	300	4	-198	2,6 – 14	40	2
[Farias, et al., 2005]	Aço	ER 70S6 (1,2)	93 – 200	0,5 – 20	-22 – -100	1,0 – 3,0	93 – 200	0,6 – 1,5
[Santos, 2008]	Aço	ER 70S6 (1,2)	300	4	-60	7 – 17	78 – 101	3 – 20
[Savi, 2014]; [Dutra, et al., 2015]	Al (5087)	ER 4043 (1,0)	350; 430	0,8 – 1,2	-23 – -47	2,4 – 8,0	24 – 40	3,2 – 10
[Scotti e Monteiro, 2012]; Monteiro e Scotti, 2013]	Aço	ER 70S6 (1,2)	250	4,9 – 7,4	-63 – -166	5,9 – 30,7	40	0 – 22,3

2.7 Diluição, Corrente Eficaz e Potência

A diluição (D) é a razão entre a área do metal base (A) em relação ao total da área fundida, que seria a soma da área metal base (A) mais a área do metal de adição (B), conforme Figura 2.16, assim resultando na Equação 2.8 [AWS, 1987]:

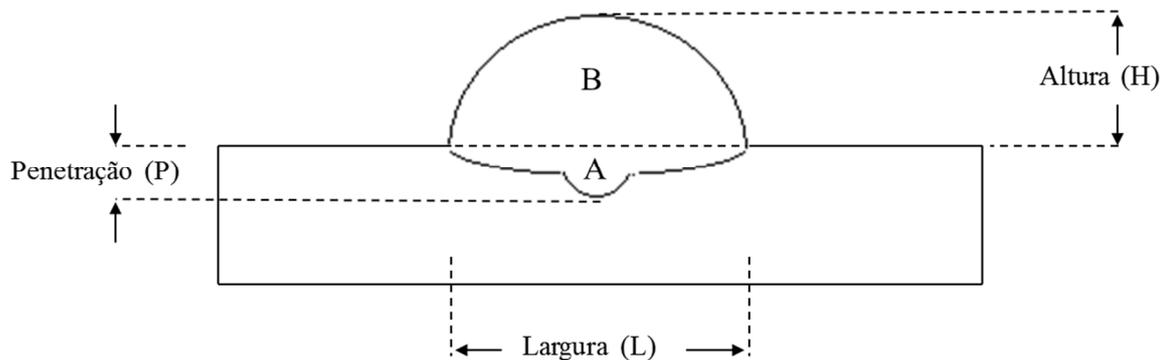


Figura 2.16 – Esquema do cordão de solda livre sobre a chapa (bead-on-plate) e às áreas usadas na determinação da Diluição.

$$D = \frac{A}{A + B} \times 100 \quad (2.8)$$

O valor eficaz, ou do termo inglês RMS (*Root Mean Square*), é o valor da corrente contínua (CC) capaz de dissipar a mesma potência média (P_m) em uma resistência de 1Ω .

Nas Equações 2.9 e 2.10 estão relacionados os valores de corrente eficaz (I_{ef}) e tensão eficaz (U_{ef}), conforme apresentado por [Gonzalez, 1997], onde T representa o período, $i_{(t)}$ a corrente e $u_{(t)}$ a tensão, ambas em relação ao tempo (t).

$$\sqrt{I_{ef}^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{(t)}^2 \cdot dt} \quad (\text{A}) \quad (2.9)$$

$$\sqrt{U_{ef}^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)}^2 \cdot dt} \quad (\text{V}) \quad (2.10)$$

A potência instantânea ($p_{(t)}$) é resultado do produto dos valores da tensão instantânea ($u_{(t)}$) em Volts e corrente instantânea ($i_{(t)}$) em Amperes, conforme apresentado na Equação 2.11. A potência média (P_m) é representada pela Equação 2.12, a qual considera a potência instantânea integrada em um período T. Em complemento, a energia de soldagem (E) é a divisão entre a potência média e a velocidade de soldagem (V_s) em milímetros por segundo, conforme a Equação 2.13.

$$p_{(t)} = u_{(t)} \cdot i_{(t)} \quad (\text{W}) \quad (2.11)$$

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T p_{(t)} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)} \cdot i_{(t)} \cdot dt \quad (\text{W}) \quad (2.12)$$

$$E = \frac{P_m}{V_s} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{mm}}\right) \quad (2.13)$$

2.8 Processo de Soldagem para Revestimento

A soldagem para revestimento vem adquirindo espaço no ramo industrial, apresentando um modo de obter superfícies com propriedades anticorrosivas e antidesgaste através do revestimento de materiais de baixo custo com materiais mais nobres. Este processo apresenta resultados satisfatórios de produtividade e altos níveis de qualidade [Gomes, 2010]. Como principais objetivos da soldagem para revestimento estão: concepção de superfícies com propriedades específicas, exemplo de produção de superfícies anticorrosivas, recuperação de sistemas/componentes contaminados pela corrosão e/ou desgaste.

Conforme apresentado por [Farias et al., 2005], a soldagem MIG/MAG com polaridade variável pode ser uma boa alternativa para aplicações de revestimento. Segundo [Puhl, 2011], o processo de soldagem MIG/MAG PV pode ser empregado na recuperação de peças e dutos que sofreram algum tipo de desgaste, como por exemplo, o efeito da corrosão. Para estes casos utiliza-se a técnica de soldagem para revestimentos, principalmente pelo fato

da necessidade de realizar a solda em operação, além de benefícios como altas velocidades com menor aporte térmico e por consequência menores distorções. Um exemplo prático para aplicação de soldas para revestimento é a recuperação de linhas de duto viárias de petróleo e gás que se deterioram devido a ação de agentes corrosivos.

Alta confiabilidade, baixos custos de operação, altas velocidades gerando altas taxas de produtividade e estes aliados à fácil operação com a possibilidade de soldagem em todas as posições, fazem com que o processo MIG/MAG seja um dos principais processos utilizados para soldas de revestimento e preenchimento, como apresentado por [Murugan e Parmar, 1994]. Os autores também enfatizam que para obter ótimos resultados de soldas para revestimentos e preenchimentos com o processo MIG/MAG é necessário a otimização dos parâmetros do processo de soldagem objetivando uma minimização da diluição do cordão de solda.

Conforme apresentado por [Gomes, 2010], um dos principais parâmetros para atingir excelentes soldas para revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é a diluição, e para isto deve-se ter um controle rigoroso da diluição, sempre buscando a minimização da diluição no processo de soldagem de materiais dissimilares, para assim minimizar a participação do metal base no metal de solda para não afetar as propriedades de resistência à corrosão da superfície final revestida.

[Murugan e Parmar, 1997] aconselharam que, para obter uma solda de revestimento com qualidade, maximizar a propriedade anticorrosiva da junta soldada, melhor distribuição para os próximos passes e considerando o aspecto econômico do processo, deve-se alcançar uma diluição entre 10 a 15%. Este controle da diluição é fundamental quando relacionado à soldagem de revestimento usando eletrodos de aço inoxidável com metal base de aço carbono, para assim minimizar a mistura entre os materiais dissimilares, e não afetar as características anticorrosivas do componente final. Além da minimização da diluição, como exposto por [Gomes, 2010], deve-se também: maximizar a altura e largura do cordão de solda, assim como minimizar a penetração para garantir as vantagens do processo de soldagem no revestimento e preenchimento. Gerenciar os parâmetros do processo de forma a obter a geometria do cordão desejável é um dos desafios da soldagem de revestimento.

O processo MIG/MAG com duplo arame foi analisado por [Junior et al., 2011], para realização de soldas para revestimento de eletrodos de aço inoxidável (AWS ER308LSi) em chapas de aço carbono (ABNT 1020), gás de proteção Ar + 2%O₂ e com vazão de 14 l/min em uma junta de BOP (*bead-on-plate*). O experimento apresentou resultados entre 16 a 20% de diluição para a situação descrita. [Murugan e Parmar, 1994], alcançaram resultados de

diluição entre 17 a 20% na utilização do processo MIG/MAG convencional, na soldagem de aço inoxidável, AISI 316L, em chapas de aço estrutural, IS 2062, utilizando argônio puro como gás de proteção. Além disso, concluíram que a relação entre a tensão do arco elétrico e a diluição é linear, e a velocidade de alimentação do arame e diluição apresentam uma interação não linear, a DBCP (distância de contato bico peça) é inversamente proporcional a diluição, e por fim, a diluição apresenta um comportamento constante com o aumento da velocidade de soldagem no processo. Valores de diluição entre 9,7 e 23% foram encontrados por [Sreeraj, et al., 2013] utilizando MIG/MAG convencional e variações na velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem, visando a otimização dos parâmetros para soldas de revestimento, em juntas com arame AWS ER-308L sobre chapas de aço IS 2062 e gás de proteção Ar + 2% O₂. As alterações na corrente de soldagem foram mais significativas para a diluição do que as variações da velocidade de alimentação do arame.

2.9 Projeto de experimentos

A metodologia de projeto de experimentos é largamente utilizada em todas as áreas do conhecimento, e possui como objetivo: planejar, executar e analisar o experimento, de uma forma estruturada amparada por conceitos estatísticos. Esta metodologia é utilizada para otimizar um sistema/processo, e é composta por etapas, iniciando por identificar o problema e quais são as características importantes desse processo. Em seguida, definir as variáveis respostas desejáveis associadas as características de qualidade de interesse, identificar os fatores do processo, sendo eles controláveis (a serem estudados), constantes (mantidos fixos) e não controláveis (ruídos). Para os parâmetros controláveis define-se intervalos de variação e valores fixos aos fatores constantes. Estas etapas de planejamento são essenciais para o sucesso do experimento. Posteriormente, elege-se qual será o modelo estatístico do experimento. O planejamento do experimento é realizado através da criação da matriz experimental, a qual é composta pela sequência de ensaios (aleatoriedade), para assim executar o experimento coletando todos os dados necessários. Com a realização dos experimentos e os dados consolidados, inicia a etapa de análise, onde existe uma correlação forte com a estatística. Por fim, realiza-se a otimização das variáveis respostas em relação aos parâmetros do processo que foram variados nos experimentos [Coleman e Montgomery, 1993; Ribeiro e Caten, 2003].

Uma das ferramentas utilizadas para suportar a análise do experimento é a metodologia de superfície de resposta (MSR), a qual é baseada na modelagem das variáveis respostas em relação aos parâmetros controláveis, gerando através de equações multivariadas,

formas gráficas que possibilitam o entendimento de quais são os parâmetros do processo ótimos para uma desejada resposta.

O projeto Box-Behnken é um dos tipos de MSR, o qual consiste em um projeto com três níveis fatoriais incompletos, que é obtido pela combinação de projetos 2^k fatoriais blocados que contém todas as combinações dos três fatores. Box-Behnken é um projeto esférico, onde todos os pontos estão contidos em uma esfera com raio igual $\sqrt{2}$ [Montgomery, 2013]. A Figura 2.17 representa graficamente os três fatores (X_1 , X_2 e X_3) e seus três níveis (-1, 0 e 1), onde os círculos pretos representam as combinações de parâmetros de cada ensaio. Este tipo de projeto não realiza nenhum ensaio considerando a combinação dos três valores em níveis máximos ou mínimos ao mesmo tempo, por esta razão não há círculos pretos nos vértices do cubo. Considerando um experimento com três fatores e três níveis, são realizados 15 experimentos, sendo 12 relacionados as combinações de valores máximos ou mínimos de dois fatores, mais um fator em seu nível médio e três ensaios considerando a combinação dos valores médios para os três fatores (ponto central). O ensaio do ponto central é realizado três vezes para verificar a repetitividade do experimento.

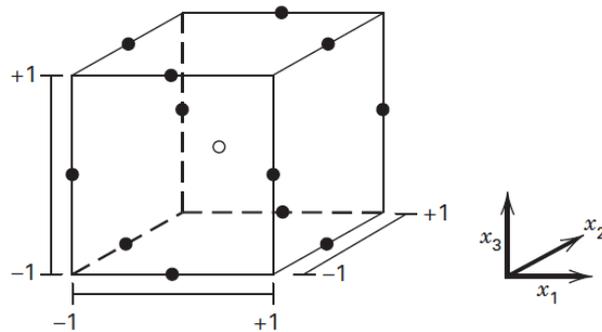


Figura 2.17 – Box-Behnken três fatores [Montgomery, 2013].

Um dos grandes benefícios do projeto Box-Behnken é seu custo efetivo se comparado com outros métodos, o qual requer um número reduzido de experimentos para se obter resultados satisfatórios de otimização [Liu et al., 2013]. Além da otimização, o projeto Box-Behnken pode ser utilizado para analisar os efeitos principais, interações entre os fatores e o efeito quadrático entre os parâmetros do processo e a variável resposta. Esta relação é gerada através de um modelo equacional não linear quadrático, conforme a Equação 2.14, onde Y é a variável resposta, X_1 , X_2 e X_3 os fatores controláveis, b_0 a interceptação e b_1 a b_{33} os coeficientes de regressão.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (2.14)$$

O emprego do projeto Box-Behnken na área de soldagem MIG/MAG pode ser consultada no trabalho de dissertação de [Hackenhaar, 2016]. A metodologia de superfície de resposta aplicada em um experimento 3^2 fatorial para soldagem por fricção encontra-se na tese de [Plaine, 2016].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O presente trabalho seguiu o fluxograma de atividades da Figura 3.1, planejando e executando as etapas para alcançar os objetivos apresentados no capítulo 1.

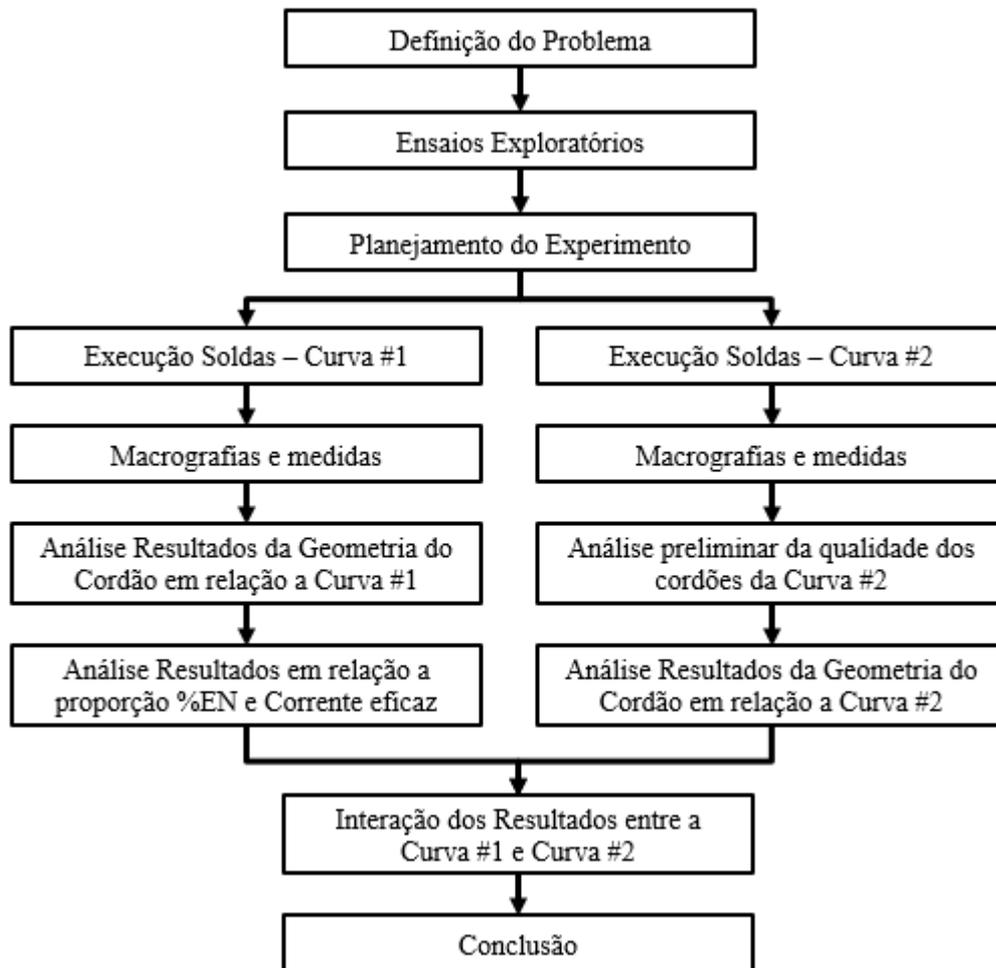


Figura 3.1 – Fluxograma das atividades realizadas.

3.1 Descrição do Experimento

Este trabalho apresenta como objetivo, a avaliação dos efeitos dos parâmetros e a forma da curva de corrente para assim otimizar os resultados da geometria do cordão de solda necessárias para soldagem de revestimentos. Por esta razão, decidiu-se utilizar a tecnologia do processo MIG/MAG com polaridade variável para buscar minimizar a penetração no processo, e alcançar os objetivos quanto à soldagem para revestimentos. As soldas foram

realizadas na condição de chapa livre, ou assim chamado do inglês *bead-on-plate* (item 2 Figura 3.2), utilizando chapas de aço SAE 1020 de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ "') de espessura, com 200 mm de comprimento e 50 mm de largura, como metal base, e metal de adição arame (eletrodo) de aço inoxidável ER308LSi de 1,2 mm de diâmetro. Gás de proteção empregado foi a mistura Ar + 2%O₂, com uma vazão de 15 l/min.

Os equipamentos utilizados foram uma fonte de soldagem Multiprocessos DIGIPlus A7 450 (item 4, Figura 3.2) e um Tartílope V4 (item 3, Figura 3.2), o qual foi adotado para a movimentação da tocha (item 1, Figura 3.2). O sistema de aquisição empregado foi o portátil SAP 4.01 da IMC Soldagem (item 5, Figura 3.2), para assim coletar informações elétricas de tensão, corrente e potência instantânea durante a soldagem nos experimentos (taxa de aquisição de 5000 pontos por segundos, dividido em três canais de aquisição). A Figura 3.2 ilustra os equipamentos utilizados no experimento.

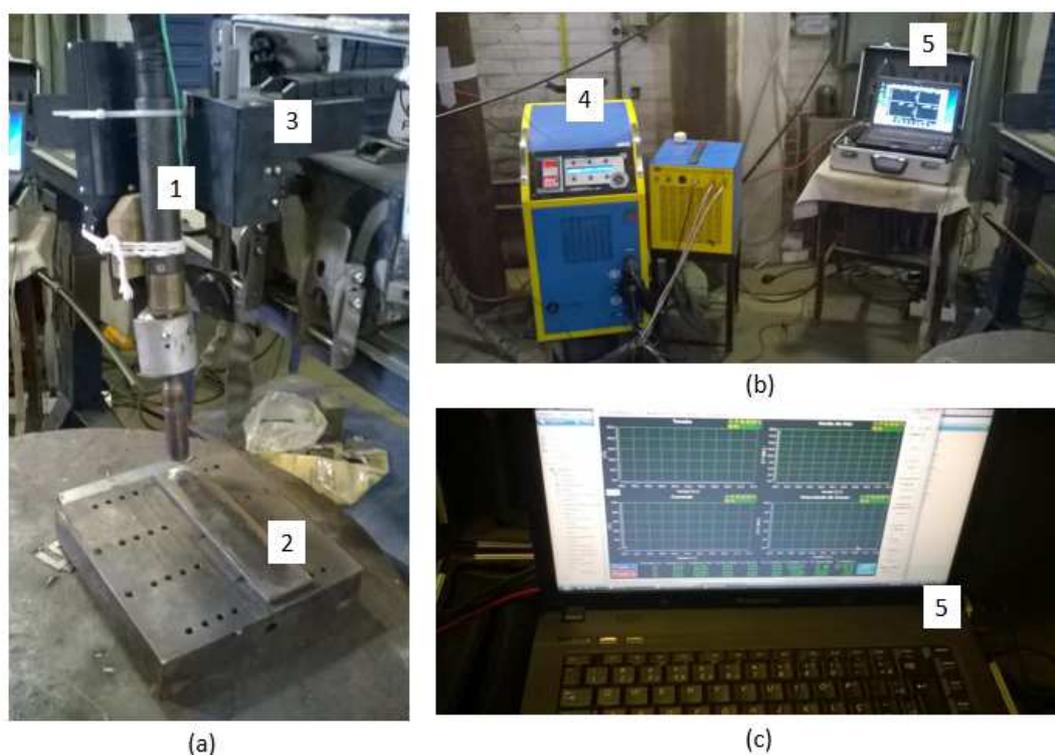


Figura 3.2 – Tocha de soldagem, Tartílope e metal base (a); Fonte de Soldagem e sistema de aquisição (b); em detalhes o sistema de aquisição (c).

3.2 Ensaios Exploratórios

Inicialmente foram realizados ensaios exploratórios com objetivo de entender o processo MIG/MAG com polaridade variável, utilizando o metal base de aço ao carbono e o

arame de aço inoxidável. Os parâmetros foram previamente selecionados com base na pesquisa bibliográfica apresentada no capítulo 2, onde esses ensaios tiveram como objetivo a verificação dos principais parâmetros do processo de soldagem. Primeiramente, foram realizados ensaios considerando a curva de polaridade variável da sua forma completa, com corrente positiva de pico, corrente de base positiva e corrente negativa (curva #1), onde pode-se variar os parâmetros de corrente e tempo, velocidade de alimentação do arame, ângulo da tocha e velocidade de soldagem. Nesses primeiros ensaios com a curva #1, todas as combinações apresentaram resultados satisfatório quanto a aspecto e qualidade do cordão de solda. Os parâmetros testados, assim como os resultados obtidos da geometria do cordão podem ser encontrados no (APÊNDICE A).

Ensaio exploratório para a curva de corrente, considerando a corrente de pico positiva e a corrente negativa, sem a corrente de base positiva (curva #2), foram realizados, com o mesmo objetivo dos ensaios realizados para a curva #1. Porém, diferente do primeiro caso, esses resultados apresentaram cordões irregulares e com elevado nível de salpicos, contudo os ensaios tiveram grande valia para entender os intervalos possíveis de realizar os cordões de solda. Para esses corpos de prova não foram realizadas as macrografias dos cordões de solda.

3.3 Planejamento do Experimento

Para analisar a influência dos parâmetros do processo em relação a uma dada resposta, é utilizada a metodologia de projeto de experimentos, vinculando a modelos estatísticos para assim entender os efeitos individuais, interações e significâncias das variações dos fatores em relação as variáveis dependentes (respostas). Mas anterior à análise dos resultados, realizou-se o planejamento do experimento, onde foi apontado quais são os fatores mantidos constantes no processo e os fatores que serão variados, assim como quais e quantos níveis de variações foram utilizados.

O presente trabalho é dividido em dois projetos de experimentos, o primeiro específico para a curva #1 e o segundo para a curva #2. Em cada uma das curvas #1 e #2 foi aplicado o projeto de experimentos Box-Behnken de três fatores com três níveis de variação. Na Figura 3.3, estão apresentados esquemas das curvas #1 e #2.

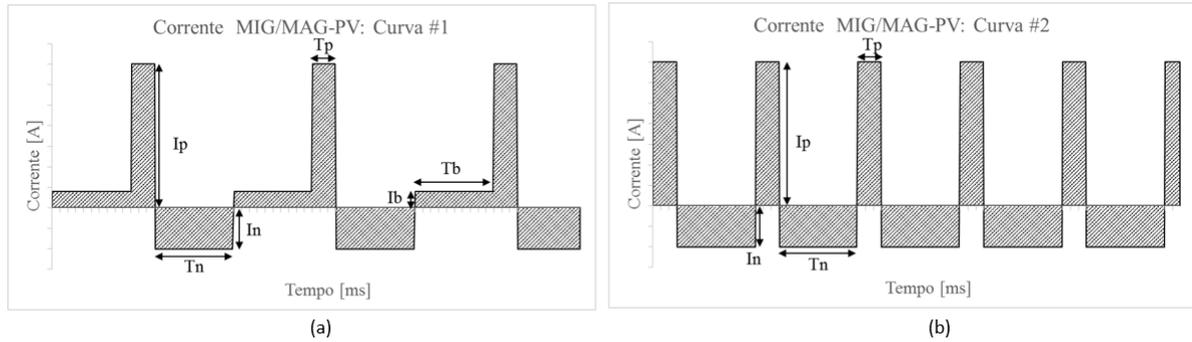


Figura 3.3 – Curva #1 (a); Curva #2 (b).

Foi analisada a influência de cada um dos parâmetros da curva #1 de corrente e não apenas da variação da polaridade negativa em relação à polaridade positiva, para isso foram considerados os seis parâmetros independentes da onda de corrente e não apenas a variação da proporção da polaridade negativa, %EN. Posteriormente no trabalho realizou-se a análise do %EN para a curva #1 em relação aos aspectos da geometria do cordão de solda.

Com objetivo de entender o efeito de cada parâmetro da polaridade negativa, I_n e T_n foram considerados esses fatores como variáveis independentes no processo de soldagem. A corrente de base, I_b , foi mantida constante pois conforme apresentado por [Nascimento et al., 2008] a mesma deve ser maior que 20 A, segundo critérios de estabilidade do arco, e segundo [Cirino, 2009; Monteiro e Scotti, 2013] a corrente de base deve permanecer em torno de 40 A, visando a estabilidade do arco elétrico. [Miranda e Ferraresi, 2003] realizaram experimento com MIG/MAG pulsado (corrente contínua – CC) utilizando eletrodos de aço inoxidável ER308LSi e corrente de base de 40 A, e valores de I_p de 240 e 330 A, com T_p igual a 4,8 e 3,0 ms, respectivamente, para assim obter a condição de uma gota por período de pulso (UGPP).

Em suma, oriundos da revisão bibliográfica (Tabela 2.4) e dos ensaios exploratórios e conforme citação anterior, para a curva #1, foram mantidos constantes três fatores: corrente de pico positiva (I_p) em 350 A, tempo de pico positivo (T_p) em 3 ms e corrente de base (I_b) em 40 A. Em adição, os fatores a serem estudados foram definidos como a corrente negativa (I_n), tempo de corrente negativa (T_n) e tempo de base positiva (T_b), e os níveis de variação podem ser encontrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Parâmetros variáveis do Box-Behnken para a curva #1.

Parâmetros	Níveis de variação		
	-1	0	+1
I_n [A]: X_1	-150	-100	-50
T_n [ms]: X_2	5	10	15
T_b [ms]: X_3	5	10	15

Os demais parâmetros do processo de soldagem foram mantidos constantes, conforme os ensaios exploratórios e a literatura estudada, sendo eles: velocidade de soldagem (V_s) de 25 cm/min, distância bico de contato peça (DBCP) de 18 mm, ângulo da tocha -10° (empurrando), o gás de proteção Ar + 2%O₂ com uma vazão de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame (V_a) foi ajustada entre os experimentos com objetivo de manter a tensão de soldagem aproximadamente a 22 V.

Através do software de estatística Minitab foi gerada a matriz de experimentos, considerando as combinações dos parâmetros, além da sequência de execução dos ensaios para assim preservar a aleatoriedade do experimento. Na Tabela 3.2, encontra-se a matriz para o projeto de experimentos Box-Behnken para a curva #1, e também a numeração dos corpos de prova (CP). As curvas de corrente para cada um dos ensaios podem ser encontradas no (APÊNDICE B).

Tabela 3.2- Matriz de experimentos Box-Behnken para a curva #1.

Sequência dos Ensaios	Corpo de Prova	I_n [A]	T_n [ms]	T_b [ms]
1 (ponto central)	#11	-100	10	10
2	#12	-100	15	15
3	#13	-100	5	15
4	#14	-150	10	15
5	#15	-150	15	10
6	#16	-50	10	15
7	#17	-50	5	10
8	#18	-50	10	5
9	#19	-100	15	5
10	#20	-100	5	5
11 (ponto central)	#21	-100	10	10
12	#22	-150	10	5
13 (ponto central)	#23	-100	10	10
14	#24	-150	5	10
15	#25	-50	15	10

Para os experimentos referentes a curva #2, visto que esta não apresenta corrente de base ($I_b = 0$ A) e tempo de base ($T_b = 0$ ms), fundamentalmente manteve-se a estratégia de analisar o impacto da polaridade negativa, mantendo I_n e T_n como parâmetros variáveis. Devido à instabilidade na transferência do metal e a qualidade de soldagem apresentada nos ensaios exploratórios foi necessário reduzir os valores máximos e mínimos de I_n e T_n , conforme a Tabela 3.3. Utilizou-se a corrente de pico positiva como fator para estudo, buscando o melhor entendimento do efeito da corrente de pico sobre o processo e buscando a

estabilidade do arco elétrico e transferência metálica da ponta do arame à poça de fusão com baixo nível de salpico. Os níveis dos fatores estudados encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Parâmetros variáveis do Box-Behnken para a curva #2.

Parâmetros	Níveis de variação		
	-1	0	+1
I_n [A]: X_1	-100	-75	-50
T_n [ms]: X_2	10	12,5	15
I_p [A]: X_3	300	325	350

Os demais parâmetros do processo também foram mantidos constantes, nos mesmos valores empregados na curva #1, tempo de pico (T_p) de 3 ms, velocidade de soldagem de 25 cm/min, DBCP de 18 mm, ângulo da tocha -10° , gás de proteção Ar + 2% O_2 com vazão de 15 l/min.

A matriz de experimentos Box-Behnken para a curva #2 também foi realizada através do software de estatística Minitab visando conservar a aleatoriedade do processo, conforme a Tabela 3.4. as curvas de corrente dos 15 ensaios estão ilustradas no (APÊNDICE C).

Tabela 3.4- Matriz de experimentos Box-Behnken para a curva #2.

Sequência dos Ensaios	Corpo de Prova	I_p [A]	I_n [A]	T_n [ms]
1	#30	325	-50	10
2	#31	325	-50	15
3	#32	300	-75	10
4	#33	300	-100	12,5
5	#34	300	-50	12,5
6	#35	350	-75	10
7	#36	350	-50	12,5
8 (ponto central)	#37	325	-75	12,5
9	#38	325	-100	15
10	#39	350	-75	15
11 (ponto central)	#40	325	-75	12,5
12	#41	325	-100	10
13	#42	300	-75	15
14 (ponto central)	#43	325	-75	12,5
15	#44	350	-100	12,5

3.4 Variáveis Resposta

Posterior à realização dos cordões de soldagem, foram retiradas amostras da seção transversal dos 30 ensaios localizados ao centro longitudinal dos cordões, estas foram lixadas com 4 níveis de granulações de lixas, sendo a lixa 600 a última utilizada. Após com reagente

químico Nital 2% atacou-se os corpos de prova para revelação das macrografias, para assim analisar os resultados da geometria do cordão de solda. Na Figura 3.4, como exemplo pode-se verificar o cordão de solda e a macrografia do corpo de prova #11.

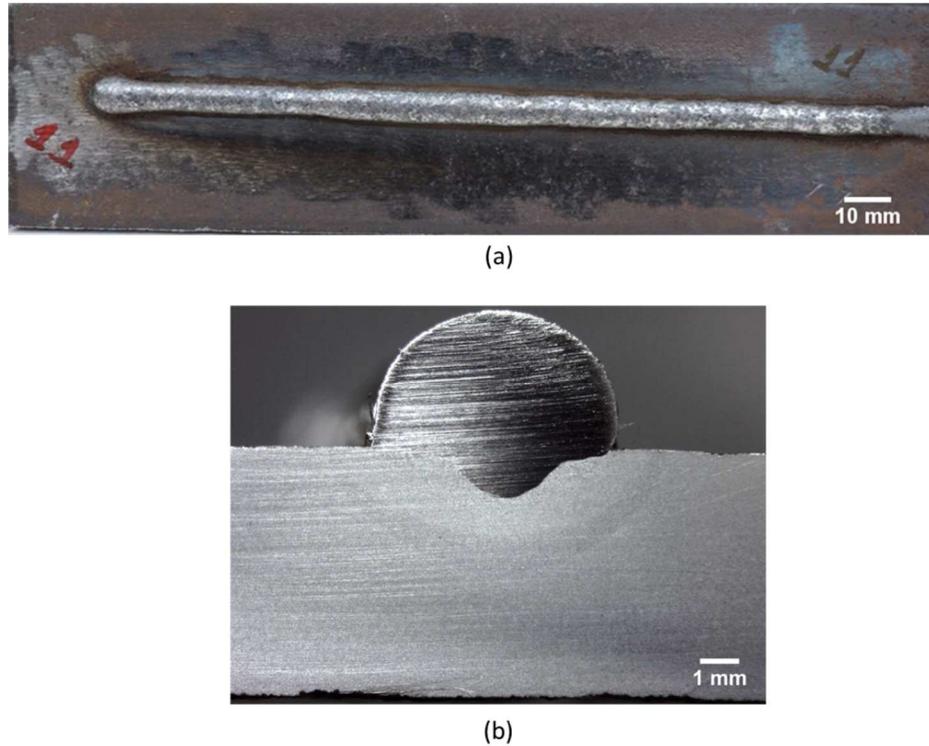


Figura 3.4 – Configuração do cordão de solda do corpo de prova #11 (a) e sua respectiva macrografia (b).

Buscando-se otimizar os parâmetros para atingir melhores resultados em soldas aplicadas a revestimento de aço inoxidável sobre aço ao carbono, as variáveis respostas definidas foram: penetração (P), área do metal de adição (B), área fundida do metal base (A), largura do cordão de solda (L) e altura ou reforço (H), conforme a Figura 3.5. Na Tabela 3.5 encontra-se os critérios objetivos necessários para a otimização da característica desejada, por exemplo, baixo valor de diluição.

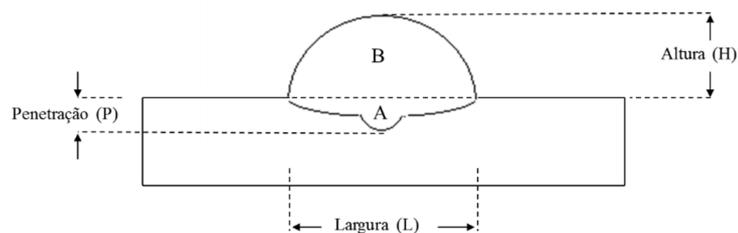


Figura 3.5 – Esquema do cordão de solda livre sobre a chapa (bead-on-plate) e as variáveis resposta.

Tabela 3.5- Variáveis Resposta.

Variável Resposta	Objetivo / alvo
A: Área A [mm ²]	Minimizar
B: Área B [mm ²]	Maximizar
P: Penetração [mm]	Minimizar
L: Largura [mm]	Maximizar
H: Altura [mm]	Maximizar

A diluição (D) de acordo com a Equação 2.8 deve ser analisada considerando simultaneamente as duas variáveis resposta Área A e Área B. Por esta razão o objetivo da Área A é minimizar e o critério da Área B é maximizar, para dessa forma minimizar os valores de diluição, com objetivo de atingir o recomendado por [Murugan e Parmar, 1997], valores entre 10 a 15%.

As medidas da geometria do cordão de solda, Área A, Área B, P, L e H foram realizadas pelo auxílio do programa computacional de processamento de imagens, ImageJ.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cordões de solda foram realizados na sequência apresentada na Tabela 3.2 da matriz do projeto de experimentos Box-Behnken para a curva #1. O nível de qualidade observado nos cordões de solda na avaliação visual foi considerado aceitável. O aspecto final dos cordões de solda assim como as macrografias para a curva #1 podem ser encontrados no (APÊNDICE D). Como exemplo, o oscilograma de tensão do arco elétrico e da corrente de soldagem do ponto central para a curva #1 pode ser encontrado no (APÊNDICE E).

Na Tabela 4.1 encontram-se as medidas realizadas através do auxílio do software ImageJ sobre as macrografias dos ensaios para a curva #1. Posteriormente neste trabalho será realizada a análise de cada uma das variáveis respostas.

Tabela 4.1- Resultados geometria do cordão de solda para curva #1.

Ensaio	Parâmetros			Variáveis Respostas				
	I _n [A]	T _n [ms]	T _b [ms]	Área A [mm ²]	Área B [mm ²]	Penetração [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]
1	-100	10	10	3,24	18,29	1,35	6,10	3,51
2	-100	15	15	2,65	15,87	0,90	5,81	3,25
3	-100	5	15	3,87	14,64	1,26	6,79	2,88
4	-150	10	15	3,43	19,68	1,37	7,15	3,36
5	-150	15	10	3,38	25,12	1,05	7,89	3,77
6	-50	10	15	2,12	12,58	0,86	5,34	2,95
7	-50	5	10	3,57	15,13	1,38	6,92	2,90
8	-50	10	5	2,84	14,33	1,25	6,29	2,83
9	-100	15	5	3,32	18,63	1,30	6,31	3,50
10	-100	5	5	4,82	20,18	1,76	8,12	3,44
11	-100	10	10	3,29	17,71	1,26	6,61	3,33
12	-150	10	5	4,77	25,38	1,58	8,42	3,77
13	-100	10	10	2,96	17,39	1,16	6,29	3,37
14	-150	5	10	4,24	20,82	1,39	7,77	3,45
15	-50	15	10	1,90	13,30	0,90	5,24	3,11

Em seguida, utilizando a equação da diluição (Equação 2.8), onde divide-se a área A pelo somatório da área A mais a área B, obteve-se os resultados da diluição para cada um dos ensaios para a curva #1. Os resultados da diluição encontram-se na Figura 4.1, junto com os limites propostos por [Murugan e Parmar, 1997], entre 10 a 15% de diluição para obter soldas de revestimento com qualidade e maximizar as características anticorrosivas do metal de solda do componente final. Os resultados obtidos apresentaram 7 dos 15 ensaios entre os limites propostos e o restante dos 8 ensaios acima de 15%. O maior valor obtido de diluição

de 20,9% foi encontrado no ensaio 3. Nenhum ensaio apresentou valores de diluição inferiores a 10%.

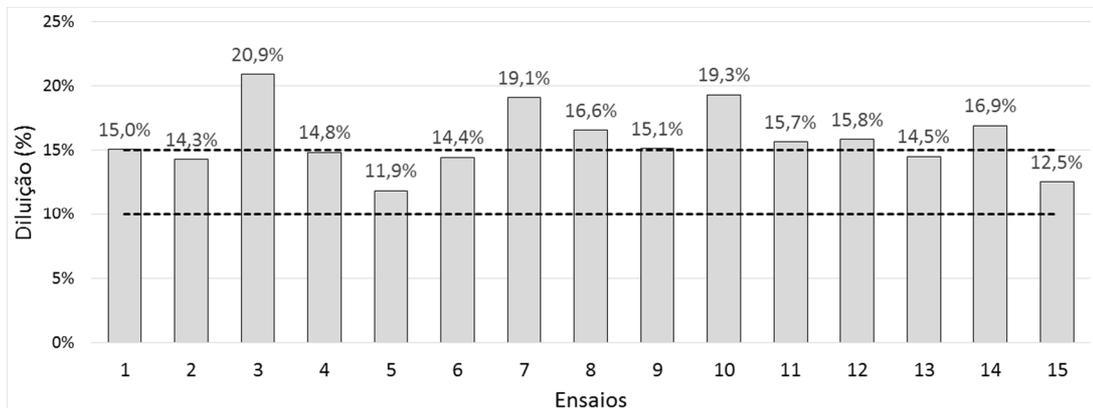


Figura 4.1 – Resultado da Diluição (%) para os ensaios referentes a curva #1.

4.1 Curva #1: Análise Área A

Foi avaliada a área A, área transversal fundida no metal base, a fim de entender estatisticamente as influências dos parâmetros estudados (I_n , T_n , T_b) em relação à variável resposta área A. Primeiramente realizou-se uma análise de variância (ANOVA), a qual avalia a significância dos parâmetros, considerando os efeitos lineares (L) e quadráticas (Q) da equação de regressão (Equação 2.14), e suas interações (apenas lineares). Por meio dos termos: graus de liberdade (GDL), e a soma dos quadrados (SQ), realiza-se o cálculo do quadrado médio (QM), o qual é a divisão de SQ sobre GDL para cada um dos termos. Calcula-se o termo F, o qual é a divisão entre os quadrados médios do termo e os quadrados médios do resíduo, o erro experimental. Na Tabela 4.2 apresenta-se a tabela ANOVA para a área A.

Tabela 4.2- ANOVA, Área A para curva #1.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	3,624778	1	3,624778	110,9909	0,008890	Significativo
I_n [A] (Q)	0,063323	1	0,063323	1,9390	0,298393	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	3,438753	1	3,438753	105,2948	0,009364	Significativo
T_n [ms] (Q)	0,217205	1	0,217205	6,6508	0,123183	Não-Signif.
T_b [ms] (L)	1,705705	1	1,705705	52,2288	0,018614	Significativo
T_b [ms] (Q)	0,253052	1	0,253052	7,7485	0,108462	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,162006	1	0,162006	4,9606	0,155802	Não-Signif.
I_n (L) por T_b (L)	0,097344	1	0,097344	2,9807	0,226406	Não-Signif.
T_n (L) por T_b (L)	0,019881	1	0,019881	0,6088	0,516935	Não-Signif.
Falta de ajuste	0,177551	3	0,059184	1,8122	0,374928	
Erro Puro	0,065317	2	0,032658			
Total	9,832204	14				

O termo valor-p representa o ponto da distribuição F que o termo se encontra estatisticamente, em outras palavras, relaciona a diferença significativa deste fator estudado concluindo se ele é significativo ou não para a variável resposta. Este termo também conhecido por probabilidade de significância, caso apresente valores inferior a 0,05 (5%) pode-se rejeitar a hipótese nula (fator não é significativo) com 95% de confiança. Conforme destacado na Tabela 4.2, os três fatores são significativos para a área A. Porém nenhuma interação entre esses fatores é significativa. Na Figura 4.2 está representada a proporção que cada fator representa em relação ao total dos efeitos, mostrando assim uma grande parcela da influência dos efeitos para os fatores individuais da corrente negativa (I_n) e do tempo de corrente negativa (T_n).

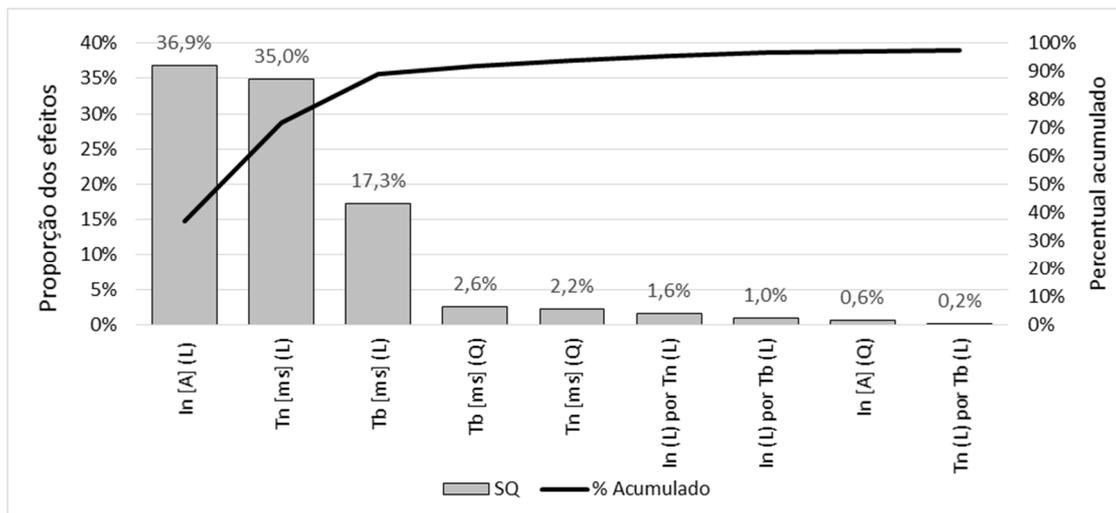


Figura 4.2 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a área A, curva #1.

Para entender o comportamento dos efeitos principais dos fatores individualmente, o gráfico da Figura 4.3, apresenta os efeitos principais em relação à resposta área A. Nesse gráfico pode ser concluído a grande parcela do efeito da corrente negativa sobre a área A, assim como o aumento da intensidade da corrente negativa (I_n), alterando de -50 A para -150 A, resulta em um grande aumento do valor da área A, porém para o tempo de corrente negativa e o tempo de base, para maiores valores de tempo, apresenta assim um valor inferior da área A. Nesse gráfico também observa-se a maior influência do tempo negativo (T_n) em relação ao tempo de base (T_b). Outro ponto importante de ressaltar no gráfico da Figura 4.3, é a maior variação do ponto médio em relação ao valor +1 (nível superior) para a corrente negativa, do que para os tempos negativos e de base, onde há uma maior variação entre o valor médio e o valor de -1 (nível inferior).

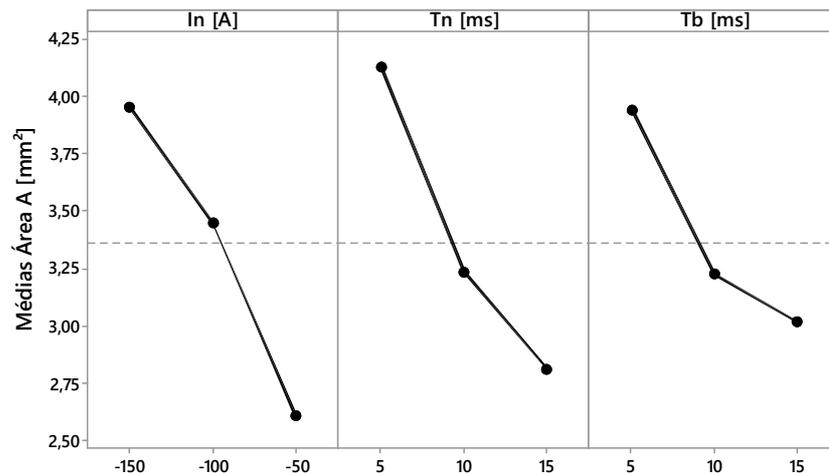


Figura 4.3 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a área A, curva #1.

Em uma primeira análise para minimizar os valores de área A, considerando os efeitos individuais, deve-se manter o valor de corrente negativa em -50 A, e os tempos de corrente negativa e de base em 15 ms.

Buscou-se a otimização dos parâmetros por meio da metodologia de superfície de resposta (MSR), modelos matemáticos de segunda ordem, os quais modelam o comportamento dos fatores e pode-se analisar a relação dos mesmos com a variável resposta. Na Figura 4.4, encontra-se a MSR para os fatores I_n e T_n mantendo constante o T_b em 10 e 15 ms, os quais apresentaram menores valores da área A, considerando o gráfico dos efeitos individuais.

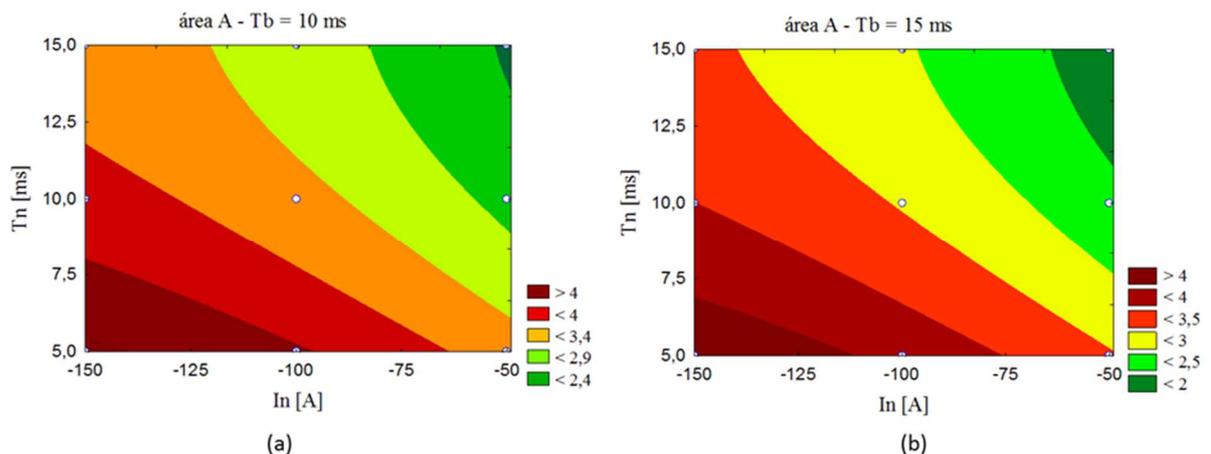


Figura 4.4 – Gráfico de contorno da área A em relação a I_n e T_n com $T_b = 15$ ms (a); e com $T_b = 10$ ms (b).

A superfície de resposta apresenta os valores mínimos da área A para I_n igual a -50 A e T_n igual a 15 ms, e valores levemente menores considerando T_b igual a 15 ms e não 10 ms.

Isso pode ser explicado considerando a energia de soldagem envolvida entre as duas combinações de parâmetros, onde verifica-se que a combinação de $I_n = -50$ A, $T_n = 15$ ms e $T_b = 15$ ms resulta em um valor teórico de energia de soldagem aproximado de 600 J/mm. Entretanto, para $I_n = -50$ A, $T_n = 15$ ms e alterando-se para $T_b = 10$ ms o valor teórico de energia de soldagem aumenta para aproximados 650 J/mm, maior energia de soldagem para um menor tempo de período de base, onde a peça por sua vez recebe maior energia, em consequência causa um aumento na área fundida do metal base.

4.2 Curva #1: Análise Área B

Para um melhor entendimento sobre a diluição no processo, necessita-se além da análise da área A, o estudo da área B, seção transversal da área do metal de adição. Foram seguidas praticamente as mesmas etapas de análise para a variável resposta área B. Inicialmente, realizou-se a análise de variância, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- ANOVA, Área B para curva #1.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	159,0704	1	159,0704	762,1439	0,001310	Significativo
I_n [A] (Q)	1,9531	1	1,9531	9,3576	0,092307	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	0,5800	1	0,5800	2,7787	0,237451	Não-Signif.
T_n [ms] (Q)	0,0163	1	0,0163	0,0783	0,805863	Não-Signif.
T_b [ms] (L)	30,9881	1	30,9881	148,4715	0,006668	Significativo
T_b [ms] (Q)	1,0596	1	1,0596	5,0769	0,153010	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	9,4004	1	9,4004	45,0393	0,021490	Significativo
I_n (L) por T_b (L)	3,9105	1	3,9105	18,7362	0,049447	Significativo
T_n (L) por T_b (L)	1,9321	1	1,9321	9,2572	0,093173	Não-Signif.
Falta de ajuste	1,1074	3	0,3691	1,7687	0,381086	
Erro Puro	0,4174	2	0,2087			
Total	210,67	14				

Os parâmetros da corrente negativa (I_n) e tempo de base (T_b) são significativos para a área B, porém diferente da área A, o parâmetro do tempo de corrente negativo (T_n) não é significativo sobre a área B. Como mostrado na Figura 4.5, a grande parcela dos efeitos está relacionada com a corrente negativa (I_n - A), apresentando valores de 75,5% em relação a todos os demais fatores e suas interações. O efeito não significativo do fator de tempo de corrente negativa, pode ser verificada com a participação de apenas 0,3% sobre a resposta área B, assim como no gráfico de efeitos principais da Figura 4.6, onde para as variações de T_n , o valor médio da área B não se altera consideravelmente.

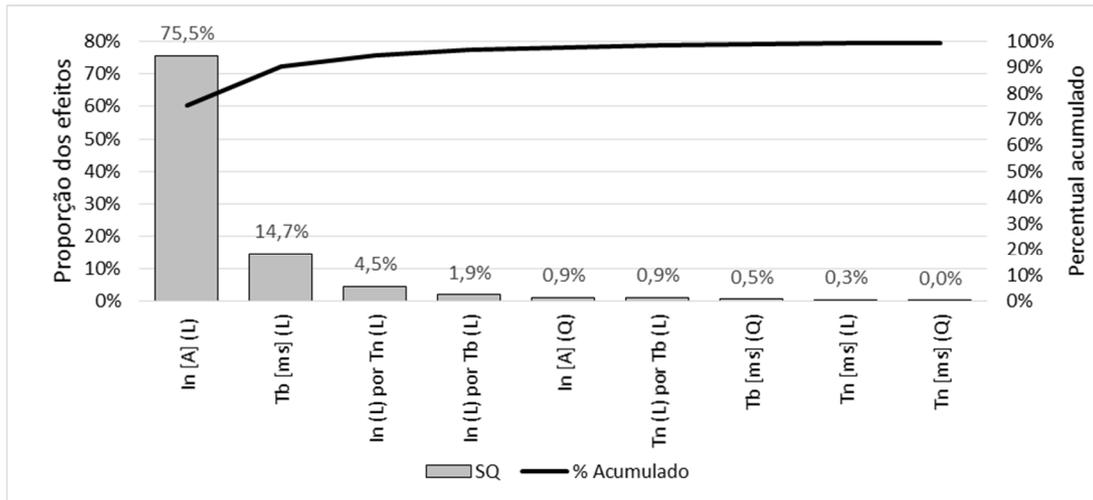


Figura 4.5 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a área B, curva #1.

No gráfico da Figura 4.6 se mostra os efeitos dos parâmetros individuais avaliados, e assim pode-se comprovar a grande parcela da corrente negativa ($I_n - A$) sobre a variável resposta, quando a corrente negativa é ajustada no valor de -150 A a área B obtida é maior.

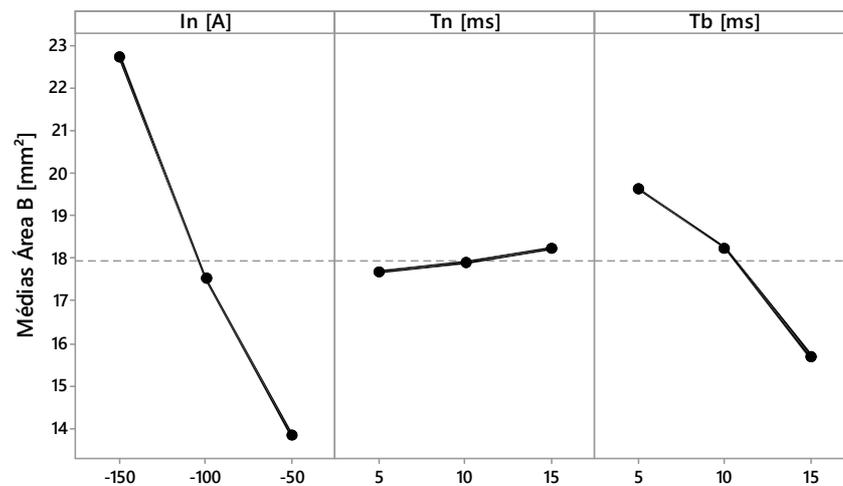


Figura 4.6 – Gráfico dos efeitos principais para a área B, curva #1.

Na Tabela 4.3 da ANOVA para a área B da curva #1 e na Figura 4.5 pode-se observar que duas interações são significativas, a interação entre a corrente negativa e o tempo de base (I_n por T_b), assim como a interação entre a corrente negativa e o tempo de corrente negativa (I_n por T_n). Também pode-se observar que o efeito individual do tempo de corrente negativa (T_n) não é significativo. A significância das interações é comprovada mediante o gráfico de interação dos fatores, onde quando o mesmo apresenta cruzamentos entre as linhas gráficas dos diferentes níveis do outro fator, isto comprova a interação existente entre os dois fatores, como é o caso apresentado na Figura 4.7 (a), no gráfico entre I_n x T_n . Quando o valor de

$I_n = -150$ A e $T_n = 15$ ms é possível obter a maior área B ≈ 25 mm², mantendo I_n (-150 A) nesse valor e reduzindo T_n causa diminuição na área B, por exemplo, $T_n = 10$ ms a área B ≈ 23 mm² e ao ajustar T_n (= 5 ms) ao valor mínimo a área B (≈ 21 mm²) obtida é mínima. A corrente negativa no nível intermediário ($I_n = -100$ A) observa-se que a área B (≈ 18 mm²) é independente do valor de T_n , isto é, pode ser ajustado no valor de 5, 10 ou 15 ms. Entretanto, usando $I_n = -50$ A e $T_n = 15$ ms ou 10 ms, a área B ≈ 13 mm². A área B ≈ 15 mm² para a $I_n = -50$ A e $T_n = 5$ ms.

A interação da corrente negativa e tempo de base (I_n e T_b) pode ser observada na Figura 4.7 (b). Quando o valor de $I_n = -150$ A e $T_b = 5$ ms é possível obter a maior área B ≈ 25 mm², se o tempo de base for incrementado (10 e 15 ms) pode-se observar que há uma redução na resposta, isto é, a área B ≈ 23 mm² diminui para área B ≈ 19 mm². Para valores de corrente negativa de -100 e -50 A, independente do T_b , se obtém valores de área B menores que 20 mm².

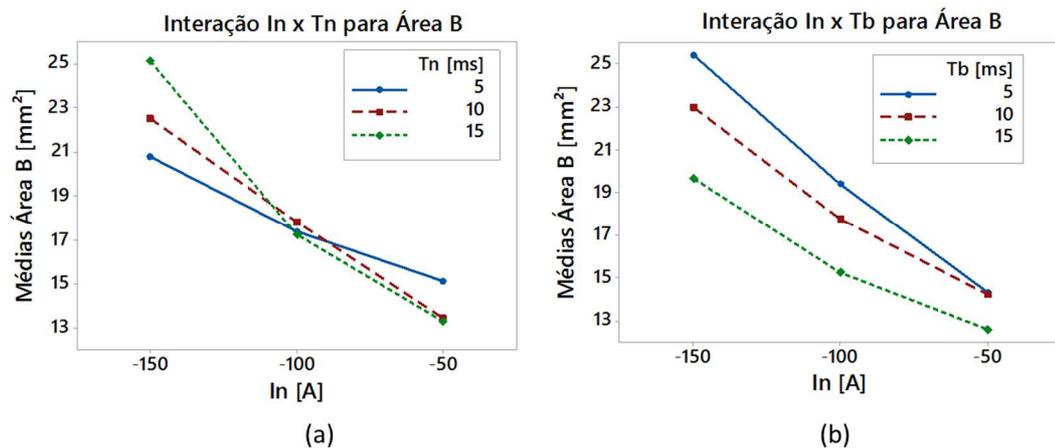


Figura 4.7 – Gráfico da interação dos fatores para a área B, curva #1.

Visando valores entre 10% a 15% de diluição, os parâmetros de controle (I_n , T_n e T_b) devem ser ajustados para maximizar os valores de área B pois estão no denominador da equação da diluição. Verificando o gráfico dos efeitos dos parâmetros principais (Figura 4.6), assim como o gráfico da interação de dois fatores (Figura 4.7), os valores para maximização a área de metal de adição seriam, corrente negativa a ($I_n =$) -150 A, tempo de base ($T_b =$) 5 ms. Para um melhor entendimento dos níveis do tempo de corrente negativa, assim como sua interação com a corrente negativa, foi realizado um gráfico de contorno da superfície de resposta, conforme Figura 4.8 (a), onde é representado a combinação desses parâmetros, mantendo-se constante o tempo de base em 5 ms, conforme exposto anteriormente. Estes

valores de tempo de base 5 ms podem ser comprovados como inferiores na segunda superfície de resposta da Figura 4.8 (b), onde mostra que para valores inferiores de tempo de base, os valores são superiores de área B.

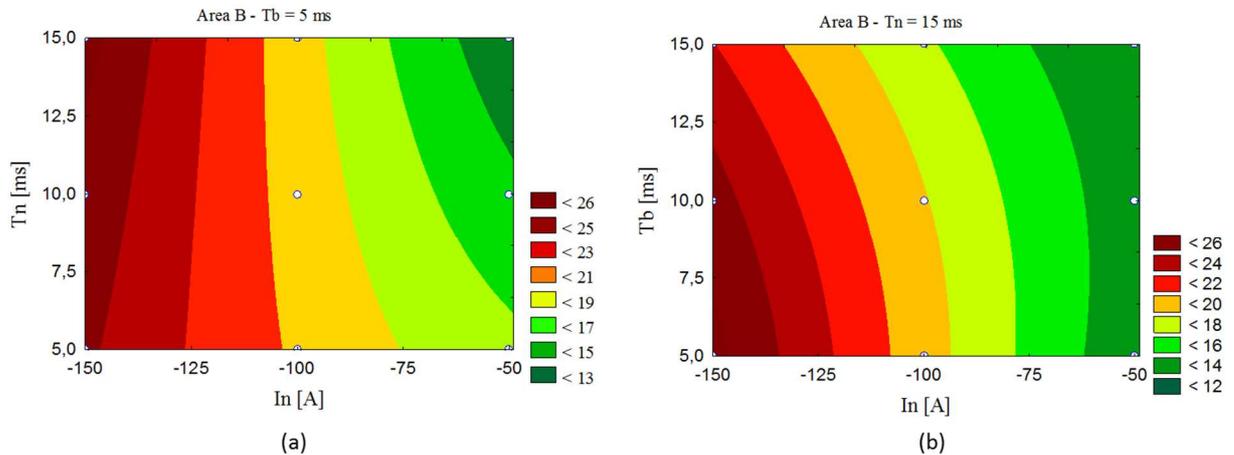


Figura 4.8 – Gráfico de contorno da área B em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e área B em relação a I_n e T_b com $T_n = 15$ ms.

Com o auxílio da MSR, verifica-se uma leve influência do T_n , porém confirmando valores superiores da área B, para valores de 15 ms ao invés de 5 ms. Embora a energia teórica de soldagem, considerando $T_n = 5$ ms, $T_b = 5$ ms e $I_n = -150$ A, esteja em torno de 1025 J/mm, é maior que considerando $T_n = 15$ ms, em torno de 930 J/mm. Isto pode ser explicado pelo efeito da corrente negativa no processo, devido a sua maior taxa de fusão e seu menor aporte térmico, conforme apresentado por [Monteiro e Scotti, 2013], gera maior área de metal de adição.

As curvas de superfícies são validas por meio dos gráficos de valores observados em relação a valores estimados pelas equações de regressão, conforme mostra a Figura 4.9. Quanto mais os pontos se aproximam da reta de referência, melhor é o ajuste do modelo (valores estimados) aos dados (valores observados).

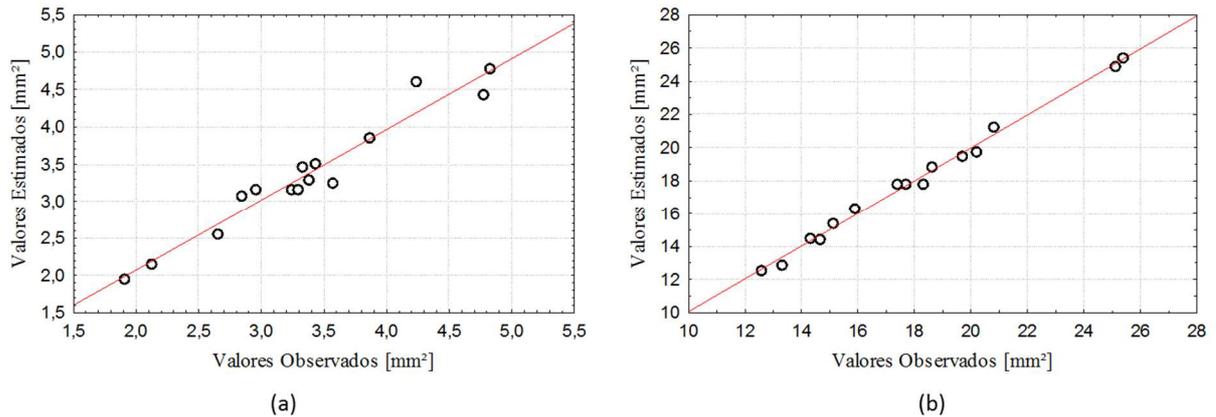


Figura 4.9 – Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados para a área A (a); para a área B (b).

Em resumo, os parâmetros necessários para minimizar a área fundida no metal base (área A) e maximizar a área do metal de adição (área B), são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Níveis necessários para otimização da área A e área B.

Variável Resposta: Critério	Fatores		
	I_n [A]	T_n [ms]	T_b [ms]
A: Área A [mm ²]: Minimizar	-50	15	15
B: Área B [mm ²]: Maximizar	-150	15	5

4.3 Curva #1: Análise da Diluição

Como o objetivo é obter as duas respostas (áreas A e B) simultaneamente, há necessidade de determinar a combinação de parâmetros que aplicado no processo de soldagem para revestimento, forneça o valor-alvo desejado, diluição entre 10 e 15 %, conforme apresentado por [Murugan e Parmar, 1997].

Verificando a Tabela 4.4, não há uma mesma combinação de parâmetros que, simultaneamente, possa minimizar a área A e maximizar a área B, podendo assim chegar ao objetivo de otimização, minimizar a diluição. A utilização de gráficos de contorno da superfície de resposta entre as duas variáveis resposta não foram possíveis devido a dois dos três fatores (I_n e T_b), apresentarem níveis distintos na sua otimização da variável resposta individual. Por exemplo na minimização da área A o tempo de base deve ser de 15 ms (nível +1), entretanto, para maximizar a área B, este fator (T_n) deve ser ajustado no valor de 5 ms (nível -1). Para minimizar o valor da diluição buscou-se a otimização da equação objetivo (Equação 2.8), utilizando as equações de regressão para área A e área B no formato da

Equação 2.14. Na Tabela 4.5, encontram-se os coeficientes de regressão para as variáveis respostas.

Tabela 4.5- Coeficientes da equação de regressão para a área A e a área B.

Coeficiente de Regressão	Área A	Área B
b_0	6,00666	18,26767
b_1	-0,022129	-0,00923
b_2	-0,433858	-0,89058
b_3	-0,267583	0,00266
b_{12}	-0,000805	-0,00613
b_{13}	0,000624	0,00395
b_{23}	0,002820	0,02780
b_{11}	-0,000052	0,00029
b_{22}	0,009702	0,00266
b_{33}	0,010472	0,15244

A equação objetivo (Equação 2.8), a qual foi composta das equações de regressão da área A e da área B, foi resolvida através de rotinas de pesquisa operacional buscando sua minimização, conforme procedimento apresentado por [Hillier e Lieberman, 2006]. Os valores resultantes encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Valores dos parâmetros principais I_n , T_n e T_b para minimizar a Diluição.

Variável Resposta: Critério	Fatores		
	I_n [A]	T_n [ms]	T_b [ms]
D: Diluição [%]: Minimizar	-50	15	11,50

Para os valores de corrente negativa $I_n = -50$ A, tempo de corrente negativa de $T_n = 15$ ms e tempo de base de 11,50 ms, pela equação de regressão pode-se chegar a valores de área A igual a 1,69 mm² e área B igual a 12,73 mm², assim resultando em um valor de diluição em torno de 11,7%. Considerando que I_n e T_n estão entre nos níveis estudados ($I_n = -50$ A) e ($T_n = 15$ ms), respectivamente, e no entanto, o valor de tempo de base não ($T_b = 11,50$ ms), realizou-se uma simulação na equação com o valor T_b mais próximo estudado, 10 ms, assim apresentando valores de diluição de 11,9% (área A = 1,74 mm² e área B = 12,87 mm²). Realizando uma análise de sensibilidade, verificou-se uma pequena variação no valor da diluição de 0,4%, caso seja alterado o valor da corrente negativa de -50 A para -150 A. Essa mudança é interessante pois apresenta um valor mínimo de variação da diluição,

porém o valor da área A passa de 1,69 para 3,49 mm², assim como o valor da área B de 12,73 para 24,84 mm², e os valores das áreas transversais do cordão de solda praticamente dobram. Estes dois conjuntos de parâmetros estão vinculados aos ensaios 15 (CP #25) e 5 (CP#15) respectivamente, onde os dois apresentam tempo de corrente negativa de 15 ms e tempo de base de 10 ms. Os resultados calculados e medidos podem ser comparados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Comparativo dos valores de diluição cálculos e observados.

Ensaio	Valor Medido (%)	Valor Equação (%)	Diferença
Ensaio 5 I _n = -150 A	11,86	12,32	-0,46
Ensaio 15 I _n = -50 A	12,52	11,91	+0,61

Em resumo, os valores de diluição considerando a corrente -50 A ou -150 A apresentam valores muito próximos entre si, o mais importante é a necessidade da não influência do metal base nas características da peça final, sendo de suma importância a minimização da área fundida no metal base do que a maximização da área do metal de adição, a qual pode ser obtida em mais passes na construção do componente final.

4.4 Curva #1: Análise da geometria do cordão de solda

4.4.1 Curva #1: Penetração

Em sequência, a penetração do cordão de solda foi estudada buscando entender a influência dos parâmetros da curva de corrente sobre ela. A penetração foi medida considerando a distância máxima para a linha central do metal base. A análise dessa variável resposta é de suma importância para o processo MIG/MAG PV, porque segundo a literatura a maior presença da polaridade negativa no processo resulta em uma menor penetração no cordão de solda, conforme apresentado por [Kim et al., 2002], ou seja, a polaridade negativa pode ser utilizada para o controle da penetração e da taxa de fusão do processo de soldagem.

Na Tabela 4.8 encontra-se a análise de variância para a penetração do experimento. Os valores de tempo negativo (T_n) e tempo de base (T_b) são os únicos fatores significativos sobre a penetração, e por consequência sendo os principais responsáveis pelos efeitos na penetração, totalizando em torno de 70% do total. As interações entre os fatores não são significantes para a penetração.

Tabela 4.8- ANOVA, penetração para curva #1.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	0,125751	1	0,125751	14,08135	0,064248	Não-Signif.
I_n [A] (Q)	0,012762	1	0,012762	1,42910	0,354434	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	0,331705	1	0,331705	37,14364	0,025882	Significativo
T_n [ms] (Q)	0,001674	1	0,001674	0,18743	0,707277	Não-Signif.
T_b [ms] (L)	0,280500	1	0,280500	31,40986	0,030393	Significativo
T_b [ms] (Q)	0,015821	1	0,015821	1,77158	0,314640	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,004970	1	0,004970	0,55656	0,533419	Não-Signif.
I_n (L) por T_b (L)	0,007921	1	0,007921	0,88698	0,445713	Não-Signif.
T_n (L) por T_b (L)	0,002209	1	0,002209	0,24736	0,668237	Não-Signif.
Falta de ajuste	0,071675	3	0,023892	2,67533	0,283763	
Erro Puro	0,017861	2	0,008930			
Total	0,875314	14				

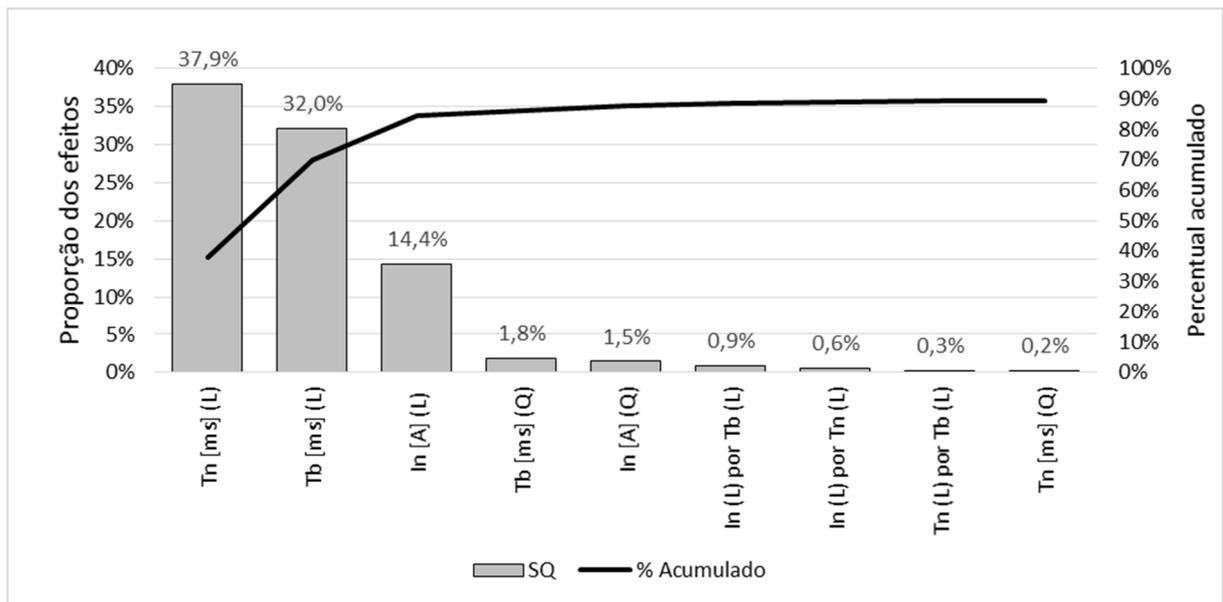


Figura 4.10 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a penetração, curva #1.

Os efeitos principais apresentados na Figura 4.11, apresentam a tendência muito próxima dos encontrados para a área A na Figura 4.3, com proporção para maiores valores de tempo de corrente negativa, menores valores da área A, como da penetração. A corrente negativa também apresenta a mesma tendência do que na área A, com valores menores absolutos de corrente, -50 A, menores valores de penetração. Porém a corrente negativa, diferente do que na área A, apresenta uma contribuição no resultado da variável dependente muito inferior.

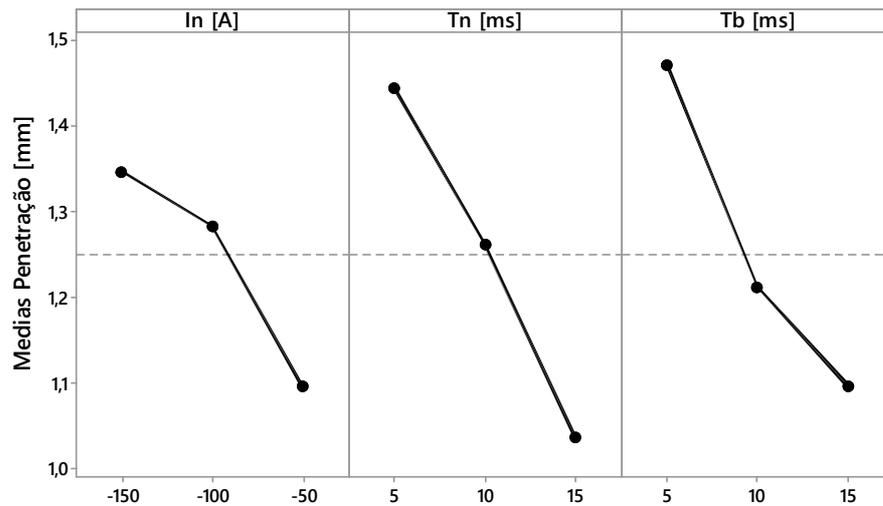


Figura 4.11 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a penetração, curva #1.

Buscando a minimização da penetração, utilizou-se a metodologia da superfície de resposta (MSR), considerando como valores constantes no primeiro gráfico de contorno o tempo de base de 15 ms, e no segundo gráfico o tempo de corrente negativa de 15 ms, considerando as respostas das médias dos fatores individualmente, Figura 4.11. Na Figura 4.12 as superfícies de contorno para a penetração, onde para atingir a minimização da penetração ($< 0,8$ mm) deve-se utilizar os parâmetros: $I_n = -50$ A, $T_n = 15$ ms e $T_b = 15$ ms.

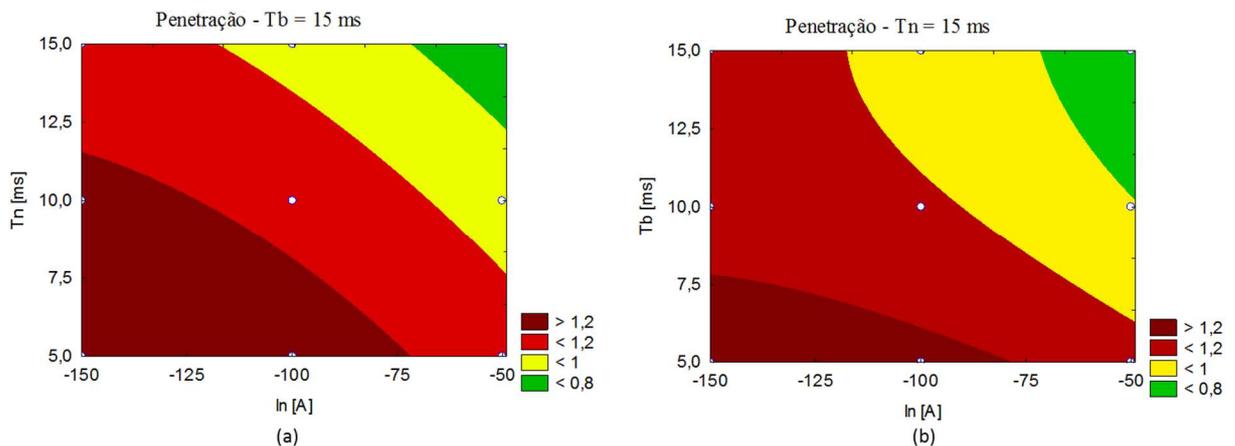


Figura 4.12 – Gráfico de contorno da superfície de resposta da penetração em relação a I_n e T_n com $T_b = 15$ ms (a); e da penetração em relação a I_n e T_b com $T_n = 15$ ms (b).

4.4.2 Curva #1: Altura

A análise da altura do reforço do cordão de solda foi realizada seguindo as mesmas etapas da variável penetração. A altura foi medida considerando a distância máxima para a linha central do metal base. Na Tabela 4.9, encontra-se a tabela ANOVA para a altura considerando os parâmetros para a curva #1. Apenas a corrente negativa apresenta

significância em relação à altura, não apresentando nenhuma significância os tempos de corrente negativa e nem se base, nem as interações. A proporção dos efeitos, a corrente negativa é responsável em torno de 63% dos efeitos totais para a altura do cordão de solda. O tempo de base representa 12% e o tempo de corrente negativa em torno de 9%.

Tabela 4.9- ANOVA, Altura do reforço do cordão de solda, para curva #1.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	0,809628	1	0,809628	88,12759	0,011158	Significativo
I _n [A] (Q)	0,016948	1	0,016948	1,84477	0,307315	Não-Signif.
T _n [ms] (L)	0,115921	1	0,115921	12,61795	0,070924	Não-Signif.
T _n [ms] (Q)	0,002947	1	0,002947	0,32075	0,628236	Não-Signif.
T _b [ms] (L)	0,151800	1	0,151800	16,52340	0,055527	Não-Signif.
T _b [ms] (Q)	0,043067	1	0,043067	4,68783	0,162773	Não-Signif.
I _n (L) por T _n (L)	0,003136	1	0,003136	0,34135	0,618172	Não-Signif.
I _n (L) por T _b (L)	0,072092	1	0,072092	7,84720	0,107309	Não-Signif.
T _n (L) por T _b (L)	0,022350	1	0,022350	2,43281	0,259177	Não-Signif.
Falta de ajuste	0,037565	3	0,012522	1,36299	0,449694	
Erro Puro	0,018374	2	0,009187			
Total	1,287978	14				

A Figura 4.13 relaciona os efeitos principais para a altura, sendo visivelmente mostrado a grande relação da corrente negativa sobre a altura. Importante considerar que os tempos possuem uma relação oposta em relação à altura, sendo o tempo de corrente negativa proporcional à altura, quando varia de 5 para 15 ms ocorre também uma variação da média da altura de 3,16 para 3,40 mm². Esta relação é oposta para o tempo de base.

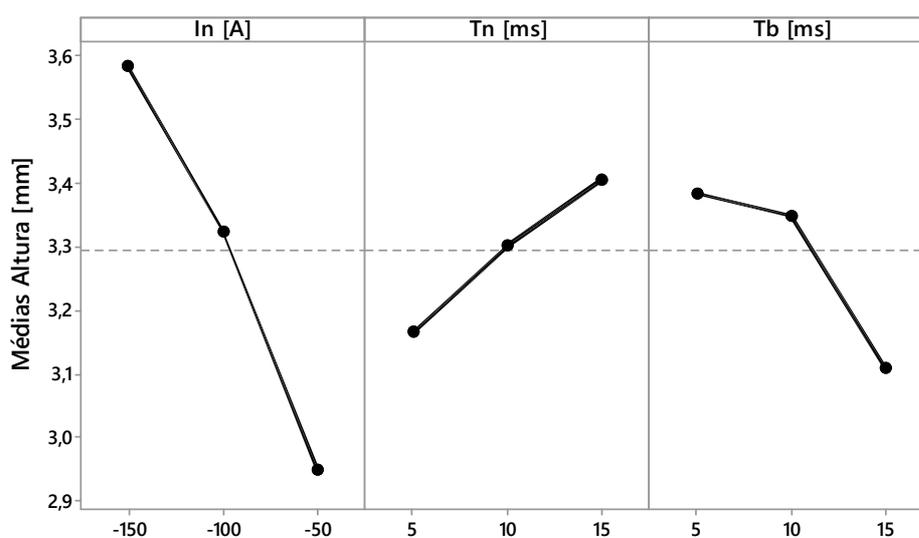


Figura 4.13 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais para a altura, curva #1.

Como apresentado por [Gomes, 2010], além da minimização da diluição, na soldagem de revestimento busca-se a maximização da altura e largura do cordão de solda, para assim obter melhores resultados de preenchimento e características desejáveis do revestimento. Visando maximizar a altura do cordão de solda, foi utilizada a MSR para comprovar os níveis os parâmetros para esta otimização. Considerando o gráfico dos efeitos dos parâmetros principais e a proximidade entre as respostas do tempo da corrente negativa entre 10 e 15 ms e tempo de base entre 5 e 10 ms, realizou-se quatro superfícies de resposta como apresentado na Figura 4.14.

Conforme analisado nos gráficos da superfície resposta de contorno da Figura 4.14, para maximizar a altura, neste experimento maior que 3,8 mm, deve-se manter os parâmetros em: corrente negativa $I_n = -150$ A, tempo de corrente negativa $T_n = 15$ ms e tempo de base $T_b = 5$ ms.

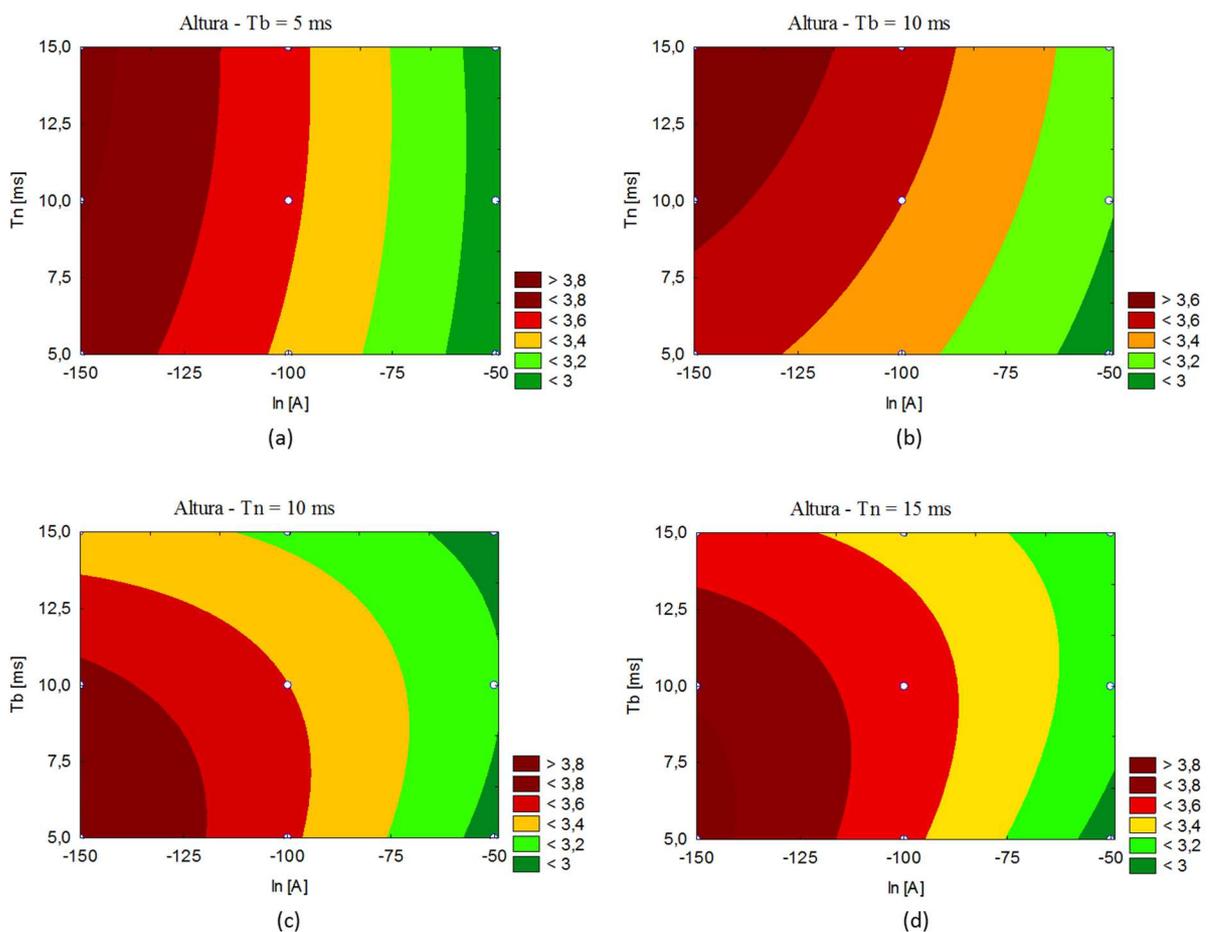


Figura 4.14 – Gráfico de Contorno da altura em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e $T_b = 10$ ms (b); e altura em relação a I_n e T_b com $T_n = 10$ ms (c); e $T_n = 15$ ms (d).

4.4.3 Curva #1: Largura

Por fim, realizou-se a análise da largura do cordão de solda, seguindo os mesmos passos que para a altura e penetração. A análise de variância é apresentada na Tabela 4.10, onde é verificado a significância dos parâmetros principais avaliados (I_n , T_n , T_b). Não há significância da interação entre os fatores.

Tabela 4.10- ANOVA, Largura do cordão de solda para curva #1.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	6,90619	1	6,906186	105,0914	0,009382	Significativo
I_n [A] (Q)	0,41036	1	0,410359	6,2444	0,129706	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	2,38384	1	2,383836	36,2748	0,026477	Significativo
T_n [ms] (Q)	0,30705	1	0,307053	4,6724	0,163185	Não-Signif.
T_b [ms] (L)	2,04829	1	2,048288	31,1688	0,030618	Significativo
T_b [ms] (Q)	0,06892	1	0,068922	1,0488	0,413484	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,81451	1	0,814506	12,3943	0,072069	Não-Signif.
I_n (L) por T_b (L)	0,02592	1	0,025921	0,3944	0,594129	Não-Signif.
T_n (L) por T_b (L)	0,17140	1	0,171396	2,6081	0,247680	Não-Signif.
Falta de ajuste	0,23585	3	0,078616	1,1963	0,485419	
Erro Puro	0,13143	2	0,065716			
Total	13,41591	14				

O gráfico da proporção dos efeitos dos parâmetros principais e interações dos fatores, apresentado na Figura 4.15, quantifica a relação dos efeitos por fator em relação ao total, sendo mais de 50% relacionado à corrente negativa, seguido pelo tempo de corrente negativo de 17,8% e tempo de base em 15,3%. Na Figura 4.16, os efeitos principais para a largura, mostrando uma configuração muito próxima a área A, onde a qual também apresentou a significância para os três fatores.

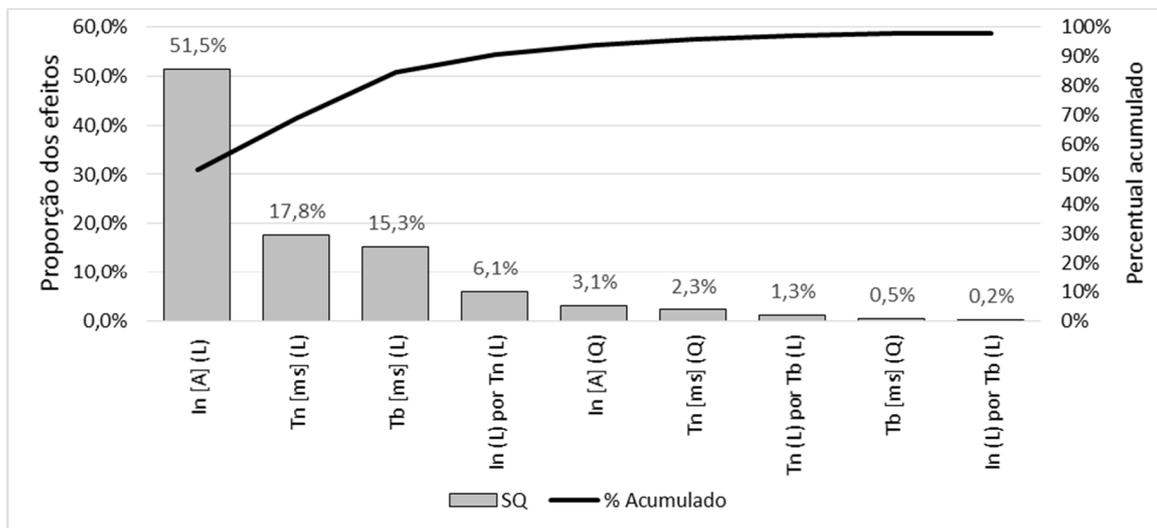


Figura 4.15 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para alargura, curva #1.

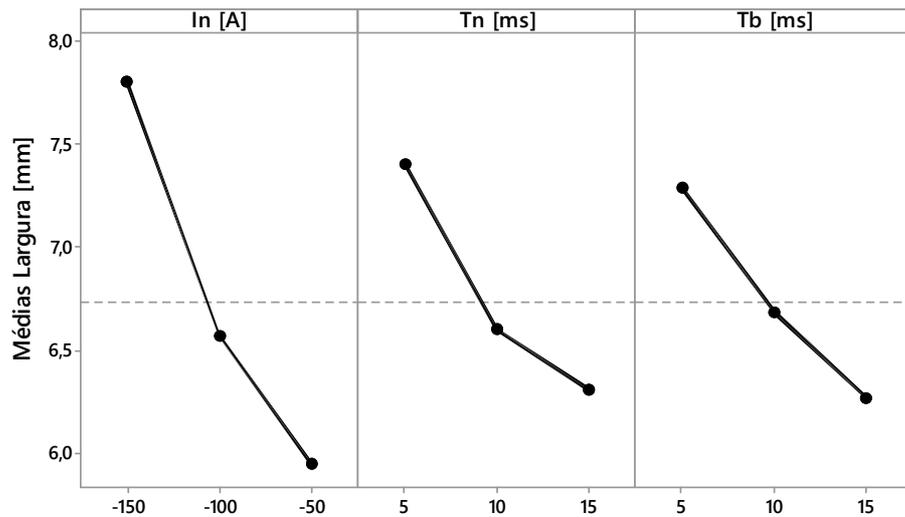


Figura 4.16 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais para a largura, curva #1.

Verifica-se que apesar de não ser significativa, a interação entre corrente negativa e tempo de corrente negativa apresenta uma proporção de 6,1%, e por esta razão decidiu-se verificar a interação entre os fatores, para entender os efeitos das variações de níveis de ambos os fatores sobre a largura, conforme Figura 4.17.

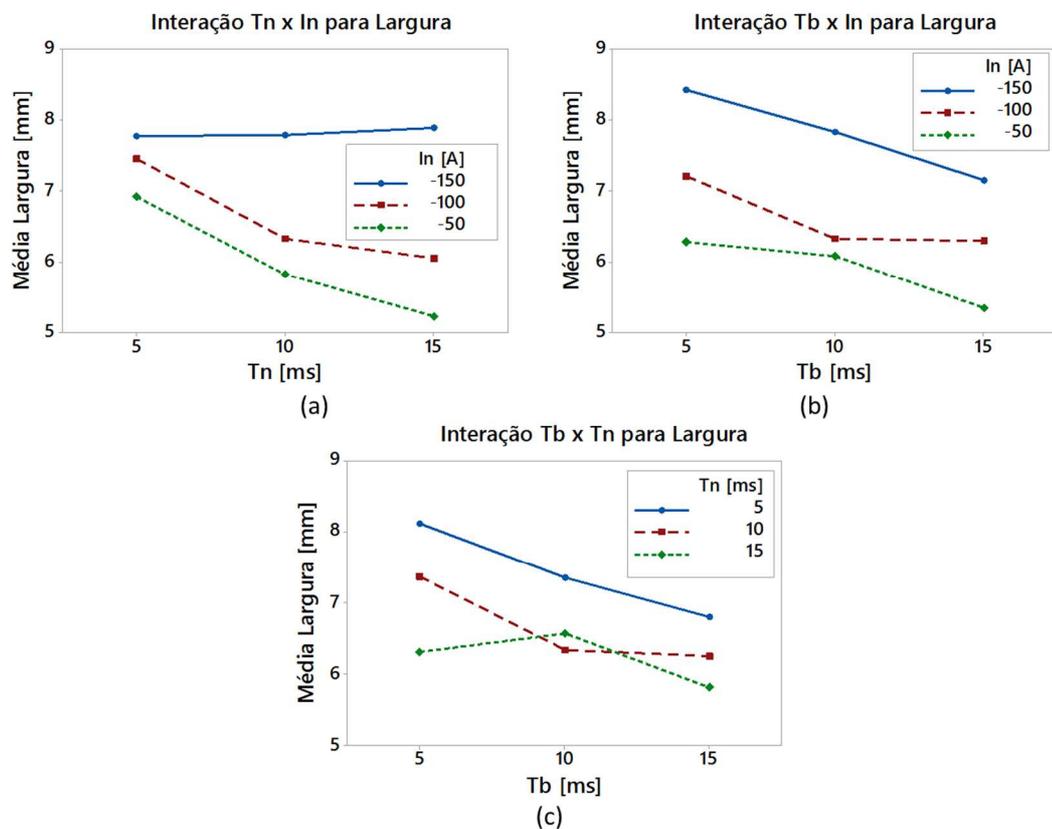


Figura 4.17 – Gráfico da interação dos fatores para a largura, curva #1.

Considerando os efeitos dos parâmetros principais e as interações, utilizou-se a metodologia da superfície de resposta para otimizar a largura, realizando assim a maximização da variável resposta. Para isso primeiramente buscou-se o entendimento da relação entre a corrente negativa e o tempo negativo, considerando que são os dois principais fatores com maiores proporções em relação a todos efeitos, e também a interação entre eles, mantendo constante o tempo de base em 5 ms. Neste gráfico, na Figura 4.18 (a), verificou-se que a corrente negativa para a maximização da largura deve permanecer em -150 A, porém não há uma conclusão clara a respeito do tempo de polaridade negativa. Por esta razão, realizou-se o segundo gráfico entre os tempos de corrente negativa e base, considerando a corrente negativa em -150 A, conforme a Figura 4.18 (b). Neste gráfico pode-se verificar realmente a necessidade de manter o tempo de base em 5 ms, e a conclusão de que a maximização da largura acontece com tempo de corrente negativa em 5 ms.

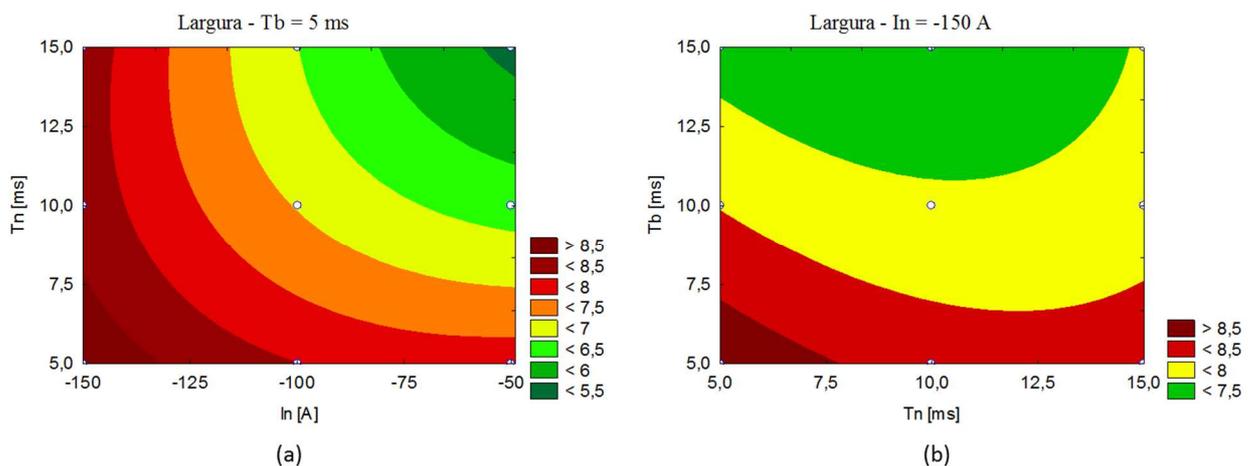


Figura 4.18 – Gráfico de Contorno da largura em relação a I_n e T_n com $T_b = 5$ ms (a); e da largura em relação a T_n e T_b com $I_n = -150$ A.

4.4.4 Curva #1: Análise da relação entre Penetração, Altura e Largura

Primeiramente, realizou-se a validação das equações de regressão e das superfícies respostas das três variáveis (penetração, altura e largura) em questão, através da utilização dos gráficos de valores observados (eixo x) em relação aos valores estimados (eixo y), para cada uma das variáveis separadamente, conforme a Figura 4.19.

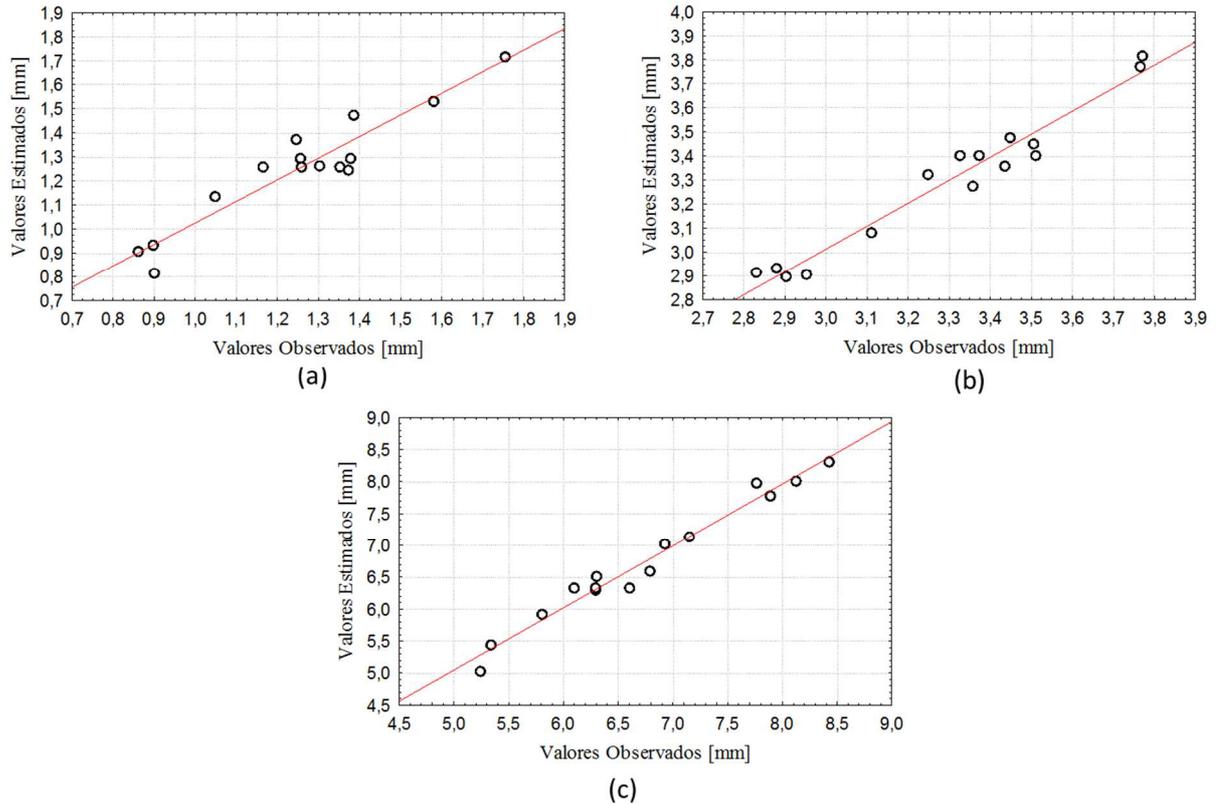


Figura 4.19 – Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados para a Penetração (a); Altura (b); Largura (c).

Primeiramente, realizou-se a validação das equações de regressão e das superfícies respostas das três variáveis (penetração, altura e largura) em questão, através da utilização dos gráficos de valores observados (eixo x) em relação aos valores estimados (eixo y), para cada uma das variáveis separadamente. Em relação à altura, Figura 4.19 (b), e a largura, Figura 4.19 (c), os valores estimados apresentam uma forte relação com os valores observados, mostrando a efetividade do modelo. Contudo para a penetração, Figura 4.19 (a), existem algumas diferenças entre os valores estimados em relação aos observados, principalmente entre os valores de 1,2 a 1,4 mm de penetração. Esta diferença pode ser observada também no gráfico das proporções para a penetração, Figura 4.10, onde o Pareto finaliza próximo de 90%, e não de 100%, assim mostra a presença do erro experimental nos efeitos dos fatores sobre a penetração.

Na Tabela 4.11, encontram-se os níveis por parâmetro necessários para se otimizar as três variáveis, penetração, altura e largura, assim como o valor otimizado, o qual é o valor resultante na equação de regressão utilizando os fatores listados para a otimização. Os valores dos coeficientes de regressão para os três fatores podem ser encontrados no (APÊNDICE F).

Tabela 4.11- Níveis necessários para otimização da Penetração, Altura e Largura.

Variável Resposta / Critério - Alvo	Fatores			Valor otimizado [mm]
	I_n [A]	T_n [ms]	T_b [ms]	
P: Penetração [mm]: Minimizar	-50	15	15	0,67
H: Altura [mm]: Maximizar	-150	15	5	3,86
L: Largura [mm]: Maximizar	-150	5	5	8,90

Considerando a geometria do cordão, visualmente pode ser verificado uma relação entre a penetração com a área A, e a altura com a área B. Esta relação é comprovada pelas respostas obtidas de otimização, onde para minimizar a penetração é necessário a combinação dos parâmetros nos seguintes níveis, $I_n = -50$ A, $T_n = 15$ ms e $T_b = 15$ ms, são os mesmos valores usados para minimizar a área A. Além disto, esta combinação apresenta uma presença alta do tempo de polaridade negativa, com isso é possível comparar com os resultados obtidos por [Nascimento, 2011], que utilizou apenas os tempos das polaridades para calcular a proporção de polaridade negativa (%EN). Dessa forma apresenta uma menor penetração com o aumento do tempo de polaridade negativa no processo, assim como verificado neste experimento. Essa relação também é verificada por [So et al., 2010].

Seguindo esta analogia da área com o respectivo parâmetro da geometria do cordão de solda, a altura e a área B também apresentam a mesma combinação de parâmetros, nos mesmos níveis para a maximização da resposta. Levando em conta a corrente eficaz teórica calculada para a combinação dos parâmetros para a maximização, a qual atinge o valor de 176 A, superior aos valores para a minimização da área A (114 A) e o ponto central (145 A). Valores maiores de corrente eficaz podem ser atingidos se considerado o tempo de corrente negativa 5 ms ao invés de 15 ms, assim apresentando 194 A de corrente eficaz, porém existe aqui também uma relação entre o aumento da altura/área B com a presença da polaridade negativa. Apesar da corrente eficaz, e por sua vez a energia de soldagem serem maiores com o tempo de polaridade negativa de 5 ms, a maior presença nessa polaridade resulta em valores maiores de altura e da área B, devido à maior taxa de fusão da polaridade negativa, conforme também apresentado por [Nascimento, 2011], a qual está relacionada na Figura 2.13 deste trabalho.

Todavia, seguindo a analogia das variáveis da geometria do cordão e áreas fundidas, a largura é presente tanto na área A quando na área B. Segundo apresentado por [So et al., 2010] não há uma relação direta entre a proporção da polaridade negativa e a largura. Esta relação também é apresentada por [Nascimento, 2011], onde não há uma correlação definida

entre a largura e a polaridade negativa. Conforme apresentado anteriormente no trabalho, os três parâmetros são significativos sobre a largura, sendo a combinação deles para maximização a largura a mesma necessária para se obter o maior valor de corrente eficaz entre as combinações, de 194 A, e por consequência os maiores valores de energia de soldagem de 1025 J/mm.

Por fim, desejando a otimização do processo para a aplicação em soldagem para revestimento, utilizou-se a técnica da superposição dos gráficos da superfície de resposta de contorno para assim otimizar o processo, considerando a minimização da penetração e maximização da altura e largura. O processo consiste em analisar individualmente cada variável resposta, através da metodologia de superfície de resposta, e posteriormente estabelecer um intervalo de valores desejados, para assim buscar a combinação dos parâmetros que satisfaçam esse intervalo objetivo por meio da superposição dos gráficos de contorno de cada variável resposta. Na Tabela 4.12 é apresentado variável resposta e o critério, assim como o respectivo intervalo desejado na otimização. Para a penetração, em adicional, buscou-se o intervalo onde os valores estimados se aproximassem dos valores observados.

Tabela 4.12- Intervalo das variáveis respostas utilizados nos gráficos de contorno.

Variável Resposta: Critério	Resposta desejada Intervalo	
	Mínimo	Máximo
P: Penetração [mm]: Minimizar	0,8	1,2
H: Altura [mm]: Maximizar	3,0	4,0
L: Largura [mm]: Maximizar	7,0	8,5

A Figura 4.20 apresenta o gráfico de superposição de três respostas, exibindo os contornos da penetração de 0,8 a 1,2 mm, altura de 3,0 a 4,0 mm e largura de 7,0 a 8,5 mm. A área não-sombreada mostra as respostas desejadas em função das combinações de corrente negativa ($I_n - A$) e tempo da corrente negativa ($T_n - ms$), para o tempo de base de $T_b = 10$ ms (Figura 4.20 (a)) e $T_b = 15$ ms (Figura 4.20 (b)). A área sombreada em cada um desses gráficos identifica combinações inviáveis de parâmetros para as respostas desejadas.

A Figura 4.20 mostra que para obter valores no intervalo da Tabela 4.12, a corrente negativa deve permanecer no valor -150 A, e tempo de polaridade negativa em 15 ms, combinação que apresenta maior participação possível da polaridade negativa no processo. O tempo de base deve permanecer entre 10 e 15 ms, para assim satisfazer os intervalos acima escolhidos.

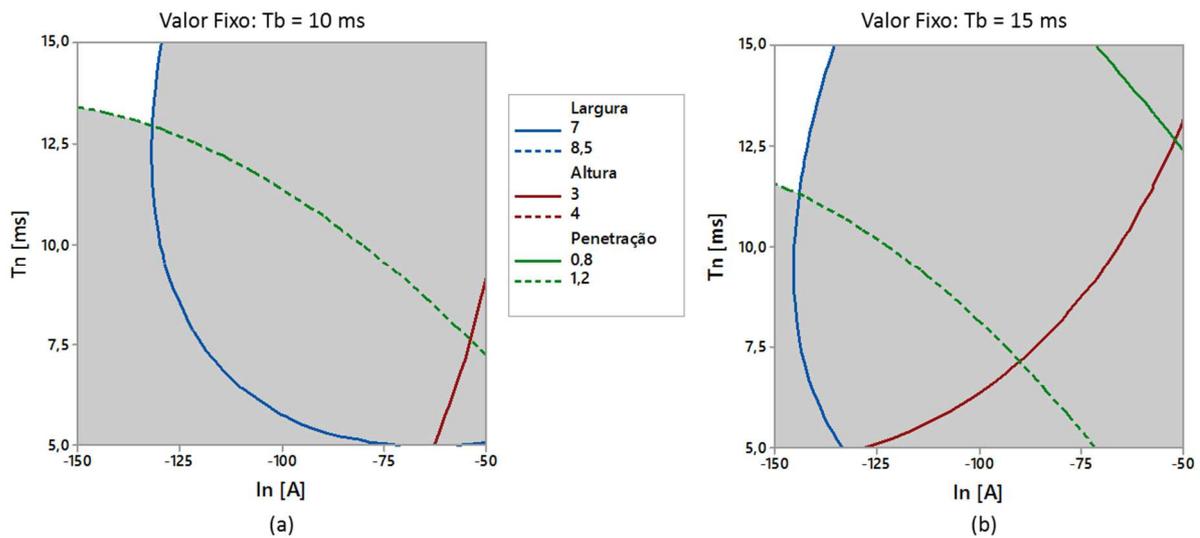


Figura 4.20 – Superposição das superfícies de respostas da penetração, altura e largura mostrando a região do ótimo (área não-sombreada). Parâmetro mantido constante $T_b = 10$ ms (a); e $T_b = 15$ ms (b).

4.5 Curva #1: Análise do %EN em relação à Geometria do Cordão de Solda

A Figura 4.21 mostra a curva #1 com os seis parâmetros (I_n , T_n , T_b , I_b , I_p e T_p), do processo para MIG/MAG com polaridade variável, desses foram escolhidos três parâmetros (I_n , T_n e T_b), e aplicado projeto de experimentos Box-Behnken, para entender os efeitos sobre a diluição e a geometria do cordão de solda, discutido anteriormente.

Nesta seção se pretende apresentar uma análise da relação entre os parâmetros e a proporção de polaridade negativa (%EN). Como citado na revisão bibliográfica deste trabalho, devido à grande complexidade do efeito dos seis parâmetros da curva #1 de corrente e da interação entre eles, autores como [Tong et al., 2001; Kim et al., 2002; Farias et al., 2005; Park et al., 2009; Vilarinho et al., 2009; So et al., 2010; Dutra et al., 2015] nos seus trabalhos de pesquisa apresentam o percentual de eletrodo negativo (%EN) como a relação entre a polaridade negativa e o total da polaridade utilizada durante o processo de soldagem. Segundo os autores citados acima, há duas formas de cálculo para a proporção da polaridade negativa (%EN), a primeira considera no cálculo as intensidades de corrente (I_p , I_b , I_n) e o respectivo tempo de cada uma das correntes utilizadas (T_p , T_b , T_n), conforme a Equação 2.4. Além dessa relação entre as polaridades, muitos autores utilizam a relação apenas dos tempos da curva de corrente, tempo de base e pico positivos e tempo de corrente negativa (T_p , T_b , T_n), para a análise da polaridade negativa no processo, conforme a Equação 2.5.

Do mesmo modo, encontra-se no capítulo 2 do presente trabalho, a relação entre os trabalhos dos autores e a equação utilizada no estudo da polaridade negativa, conforme a Tabela 2.2. Junto com a utilização da equação para a proporção de polaridade negativa, os seguintes autores [Tong et al., 2001; Farias et al., 2005; So et al., 2010; Nascimento, 2011; Monteiro e Scotti, 2013] utilizam a penetração como objeto de estudo, buscando melhorias nos processos, para assim por exemplo, aprimorar passes de raiz, fechamento de abertura entre chapas ou soldagem para revestimento, onde há uma necessidade de um maior controle da penetração no processo de soldagem. E o entendimento dos efeitos do eletrodo negativo através de apenas um fator (%EN), tornaria aplicável a polaridade variável em nível industrial. Pelas razões expostas anteriormente, foi realizada a análise da proporção de polaridade negativa (%EN) em relação a penetração para a curva #1.

Na Figura 4.21, são apresentados os resultados obtidos de penetração para cada um dos 15 ensaios da matriz de experimento Box-Behnken realizados em relação às duas formas de cálculo do %EN. Conforme verificado no gráfico, existem diferentes valores de %EN considerando o mesmo conjunto dos parâmetros da curva de corrente, como por exemplo para o ensaio 1, o %EN considerando as Equações 2.4 e a 2.5 são próximos, 41% e 43%, respectivamente. Porém, para o ensaio 8, por exemplo, para o mesmo grupo de parâmetros, os valores são divergentes de %EN, sendo 29% para a Equação 2.4 e 56% para a Equação 2.5.

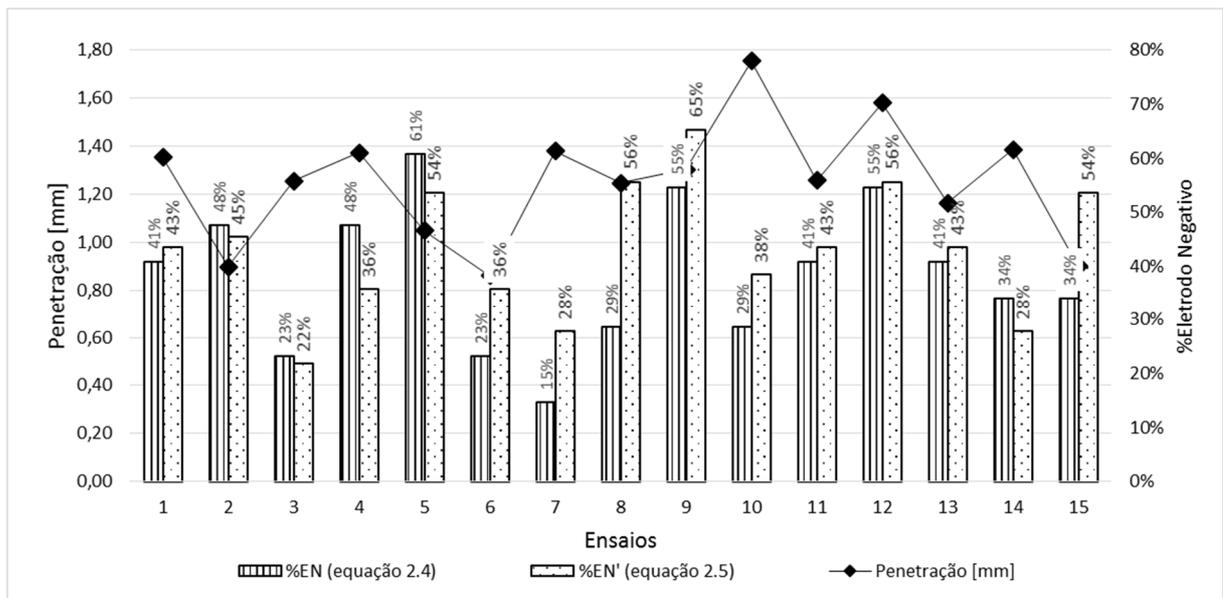


Figura 4.21 – Resultados da penetração em relação as duas formas de cálculo de %EN.

Outro ponto verificado na Figura 4.21, em uma análise preliminar, a não relação entre as formas de cálculo do %EN e a penetração, não apresentando uma relação proporcional. Em

busca desta correspondência entre a penetração e as diferentes equações do %EN, um gráfico de dispersão entre os valores foi realizado, conforme a Figura 4.22. Contudo, conforme visualizado no gráfico não há uma relação aparente entre a proporção de eletrodo negativo e a penetração.

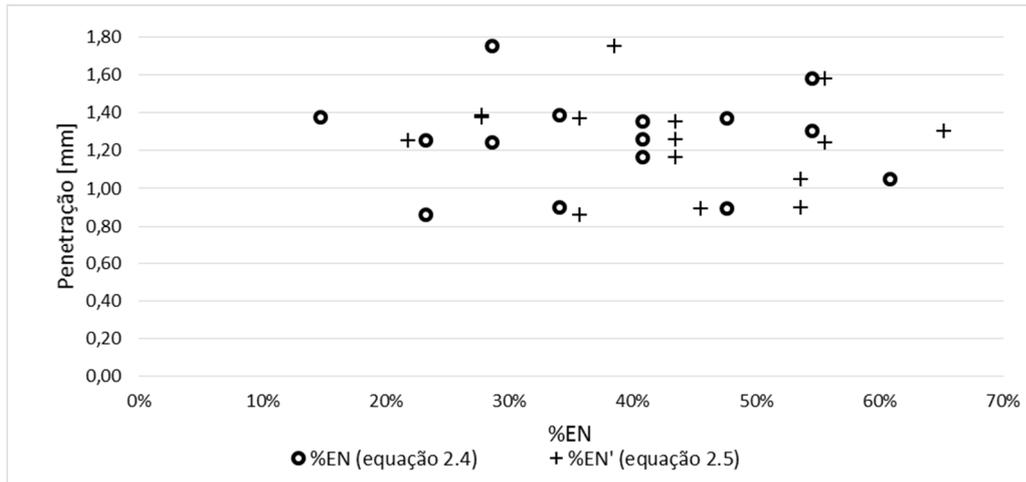


Figura 4.22 – Gráfico de dispersão entre a penetração e os valores obtidos das Equações 2.4 e 2.5 de %EN.

Verificando o gráfico de efeitos principais para a penetração, Figura 4.11, assim como o gráfico de contorno da superfície de resposta da penetração, Figura 4.12, pode-se constatar uma relação inversamente proporcional entre o tempo de corrente negativa e proporcional a corrente negativa. Os tempos estudados, tanto de corrente negativa quanto de base foram significativos para a penetração na análise de variância, e por esta razão analisando a Equação 2.5, que considera para o %EN apenas os tempos de atuação da corrente, faz sentido a utilização quando os tempos apenas são variados no processo de soldagem, assim os valores das correntes de pico, de base e negativa devem ser mantidos constantes, para assim estudar o efeito da proporção do tempo de polaridade negativa sobre o processo de soldagem. Estas considerações são realizadas por [Vilarinho et al., 2009; Nascimento, 2011], os quais utilizam a Equação 2.5 para cálculo do %EN, e em seus experimentos apenas variam o tempo de corrente negativa, T_n , para alcançar os diferentes níveis de estudo de %EN (30, 50 e 70), concluindo que há relação inversa entre %EN e a penetração. [Dutra et al., 2015] empregaram pequenas alterações na corrente negativa, I_n , e variações maiores de T_n para analisar as variações do %EN, utilizando a Equação 2.5. Realizando alterações no tempo de base (T_b) e tempo de corrente negativa (T_n), [Santos, 2008] alcança os níveis de %EN desejados na Equação 2.5. Este por sua vez, quando utiliza a curva de corrente sem a corrente de base,

alterando apenas I_n e T_n para obter os intervalos de %EN, para ambos os casos apresenta uma redução da penetração com o aumento da parcela da polaridade negativa (%EN).

Utilizando as equações de regressão para a penetração (coeficientes encontram-se no APÊNDICE F), analisou-se isoladamente o tempo de corrente negativa, considerando tempo de corrente de base e corrente negativa nos seus valores médios (10 ms e -100 A, respectivamente), conforme Figura 4.23 (a). Foi adicionado ao gráfico as proporções de polaridade negativas, %EN, considerando as duas formas de cálculo, onde pode-se verificar a relação apresentada na literatura, independente da equação utilizada, ocorre uma redução da penetração com o aumento do %EN.

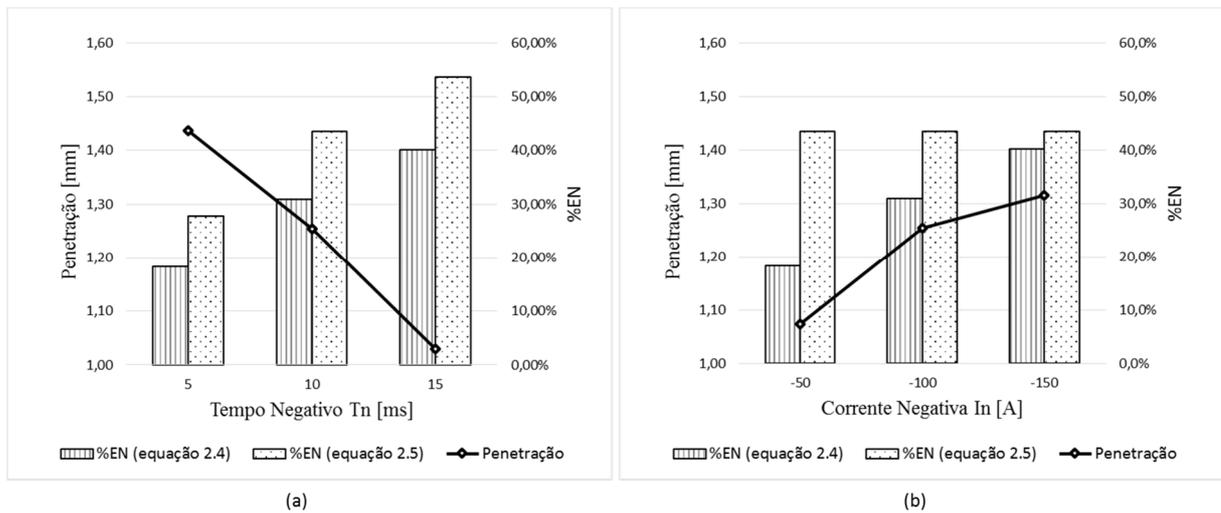


Figura 4.23 – Penetração em função de %EN: e variando T_n (a) e variando I_n (b).

No gráfico da Figura 4.23 (b), se mostra a penetração e %EN em função da corrente negativa nos valores de -50, -100 e -150 A, onde os demais parâmetros da curva #1 foram mantidos no valor médio. Primeiramente, mostra-se o %EN calculado pela Equação 2.5, embora haja uma pequena variação da corrente negativa, o %EN permanece em 43,5%, pois depende do tempo da corrente negativa ($T_n = 10$ ms). Entretanto, aplicando a Equação 2.4, percebe-se que um acréscimo (em valor absoluto) da corrente negativa produz um aumento no valor de %EN, portanto é influenciado absolutamente pela corrente negativa. Dessa forma, para um aumento em %EN ocorre um aumento na penetração do cordão de solda. Na Figura 4.24 se mostra a relação entre a corrente eficaz e a penetração.

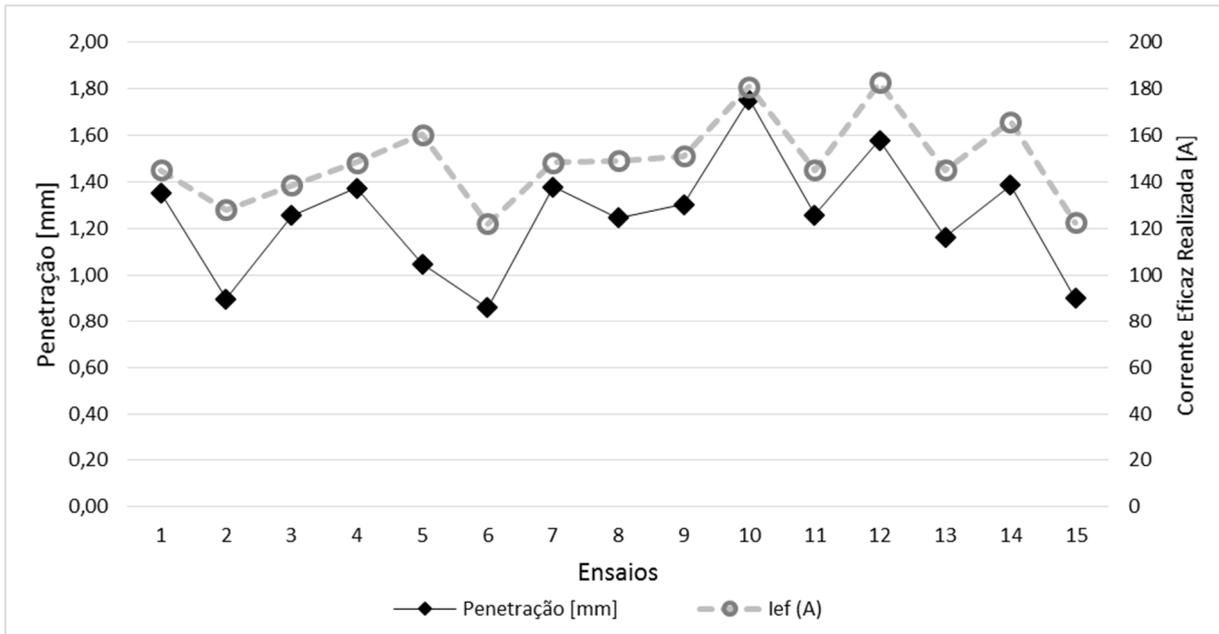


Figura 4.24 – Penetração em relação a corrente eficaz medida.

Considerando o aumento no valor da corrente negativa (em valor absoluto), embora haja um aumento da polaridade negativa (%EN), também ocorre um aumento da energia de soldagem, causando uma variação proporcional na penetração do cordão de solda. Por esta razão, quando há variações de corrente negativa e tempo da corrente negativa no processo MIG/MAG PV, é necessário utilizar a Equação 2.4, isso é válido para as correntes analisadas neste trabalho. Além disso, procurar manter a corrente eficaz do processo o mais próximo possível entre as combinações do experimento. [Kim et al., 2002] mantiveram a corrente média de soldagem em 130 A e variaram %EN utilizando a Equação 2.5, porém não apresentaram quais parâmetros dentro da equação foram alterados. As mesmas considerações, a de manter o valor da corrente média de soldagem constante foram adotadas por [Park et al., 2009]. [Farias et al. 2005], realizaram variações nos seis parâmetros da curva de corrente com o propósito de obter 10%, 20% e 30% de proporção de eletrodo negativo (%EN), mantendo constante a corrente eficaz do processo, conforme a Figura 2.14 (a), mostrando que a penetração diminui para um aumento de %EN. Em adição, foi realizada a variação em dois níveis da corrente eficaz, buscando o entendimento desta no processo, conforme Figura 2.15 (b), ilustra que aumentando a corrente eficaz causa um aumento na penetração.

4.6 Curva #2: Análise da geometria do cordão de solda

Os resultados dos cordões de solda para a curva #2, diferentes para a curva #1, apresentaram questões críticas de qualidade e instabilidade do arco elétrico (e transferência de metal), gerando elevado nível de salpicos e dificuldade na execução da soldagem. A configuração final dos cordões de solda utilizando a curva #2 podem ser encontradas no (APÊNDICE G). Como exemplo, o oscilograma de tensão do arco elétrico e da corrente de soldagem do ponto central para a curva #2, encontra-se no (APÊNDICE H).

Conforme a estabilidade do arco durante o processo de soldagem, quantidade de salpico e aspecto visual do cordão de solda, os 15 ensaios foram classificados em três grupos, sendo eles:

- Critério de qualidade 1: Dificuldades na realização dos cordões de solda, alta quantidade de salpicos, instabilidade do arco elétrico, aspecto visual negativo do cordão.
- Critério de qualidade 2: Menores dificuldades de execução da soldagem, surgimento de salpicos, e menor, porém instabilidade do arco elétrico.
- Critério de qualidade 3: Sem dificuldades para execução dos cordões de solda, sem nada ou poucos salpicos, arco elétrico estável.

Na Figura 4.25 podem ser encontrados exemplos para cada um dos critérios de qualidade definidos acima. Dos 15 ensaios realizados, 5 ensaios apresentaram critério de qualidade igual a 1, assim como 5 ensaios com critério igual a 2, e 5 com critério igual a 3.

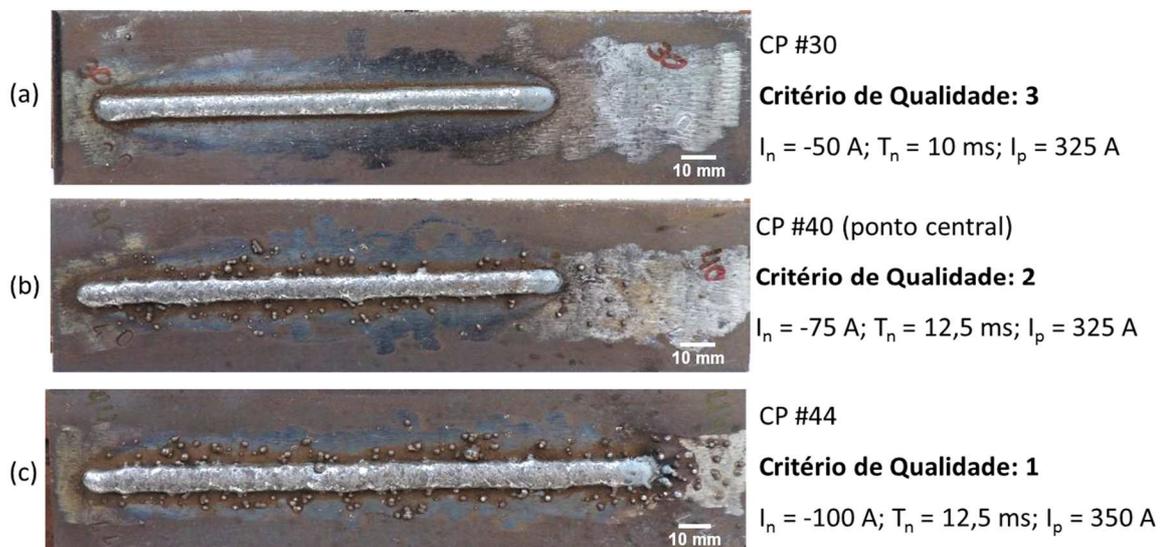


Figura 4.25 – Exemplo dos critérios de qualidade, sendo: critério 3 (a); critério 2 (b) e critério 1 (c).

A lista dos ensaios e dos critérios de qualidade pode ser encontrada na Tabela 4.13, onde também está relacionado os resultados obtidos da geometria do cordão para a curva #2, sem a utilização do tempo de base ($T_b = 0$ ms).

Tabela 4.13- Resultados do critério de qualidade e da geometria do cordão de solda para os parâmetros da curva #2.

Ensaio (CP)	Parâmetros			Critério de Qualidade	Variáveis Respostas				
	I_n [A]	T_n [ms]	I_p [A]		Área A [mm ²]	Área B [mm ²]	P [mm]	L [mm]	H [mm]
1 (#30)	-50	10	325	3	4,16	16,86	1,70	7,01	2,91
2 (#31)	-50	15	325	3	2,77	14,49	1,28	6,35	3,05
3 (#32)	-75	10	300	2	3,15	14,07	1,16	7,38	2,56
4 (#33)	-100	12,5	300	1	2,67	17,00	0,69	5,63	3,31
5 (#34)	-50	12,5	300	2	2,58	12,73	1,09	5,90	2,81
6 (#35)	-75	10	350	3	4,78	20,48	1,76	7,49	3,45
7 (#36)	-50	12,5	350	3	3,55	17,81	1,42	6,89	3,07
8 (#37)	-75	12,5	325	2	3,56	17,33	1,29	7,29	2,97
9 (#38)	-100	15	325	1	1,22	21,23	0,54	7,46	3,66
10 (#39)	-75	15	350	3	3,62	19,57	1,26	6,74	3,27
11 (#40)	-75	12,5	325	2	3,44	17,89	1,29	7,27	3,06
12 (#41)	-100	10	325	1	3,79	19,07	0,95	7,82	3,14
13 (#42)	-75	15	300	1	2,14	16,28	0,86	6,43	3,22
14 (#43)	-75	12,5	325	2	3,42	17,76	1,50	6,88	3,06
15 (#44)	-100	12,5	350	1	2,66	23,61	0,92	8,89	3,55

Assim como para a curva #1, embora que para a curva #2 não se tenha atingido os critérios de qualidade, foram medidas as áreas A e B para a determinação da diluição por ensaio, considerando os limites aceitáveis entre 10% a 15% de diluição, conforme a Figura 4.26.

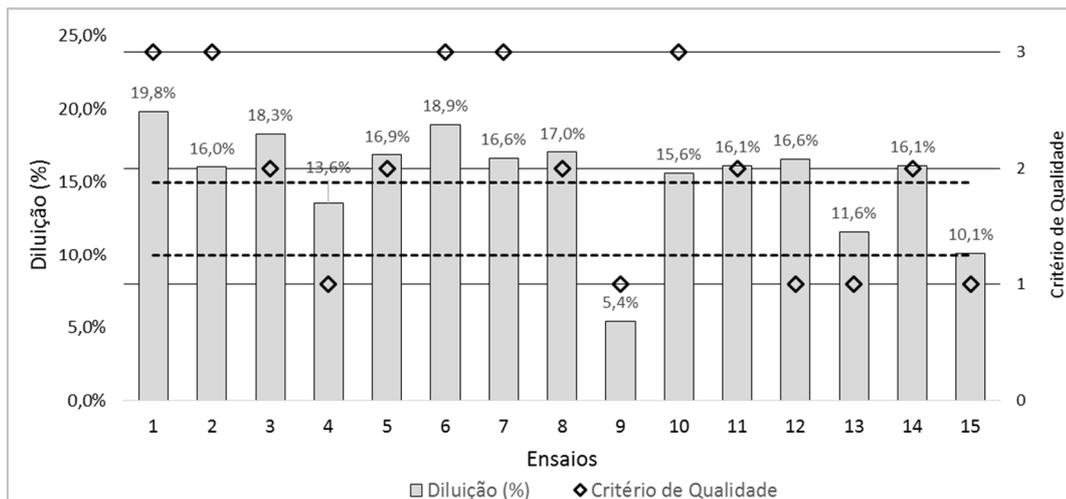


Figura 4.26 – Resultado da Diluição (%) para os ensaios referentes a curva #2

Como verificado no gráfico da Figura 4.26, apenas 3 dos 15 ensaios permaneceram entre os limites objetivados de diluição, que estão entre 10 a 15%. O restante apresentou diluições acima de 15%, todavia o ensaio número 9 apresentou diluição em torno de 5%, porém este é um dos ensaios com critério de qualidade igual a 1, ou seja, o arco elétrico apresentou muita instabilidade e alto nível de salpicos.

As variáveis de respostas a serem avaliadas são da geometria do cordão de solda, penetração (P), largura (L) e altura (H), estão listadas na Tabela 4.13.

4.6.1 Curva #2: Penetração

A Tabela 4.14, apresenta a análise de variância (ANOVA) da penetração dos cordões de solda obtido com a curva #2. Pode ser observado que o efeito dos três fatores principais, corrente negativa (I_n), tempo de corrente negativa (T_n) e corrente de pico (I_p) são significantes para a penetração.

Tabela 4.14- ANOVA para a Penetração da curva #2.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	0,710432	1	0,710432	50,46040	0,019247	Significativo
I_n [A] (Q)	0,210027	1	0,210027	14,91773	0,060968	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	0,330891	1	0,330891	23,50246	0,040012	Significativo
T_n [ms] (Q)	0,000222	1	0,000222	0,01575	0,911601	Não-Signif.
I_p [A] (L)	0,301476	1	0,301476	21,41318	0,043664	Significativo
I_p [A] (Q)	0,031763	1	0,031763	2,25608	0,271932	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,000042	1	0,000042	0,00300	0,961293	Não-Signif.
I_n (L) por I_p (L)	0,002352	1	0,002352	0,16708	0,722336	Não-Signif.
T_n (L) por I_p (L)	0,009409	1	0,009409	0,66830	0,499541	Não-Signif.
Falta de ajuste	0,067478	3	0,022493	1,59760	0,407333	
Erro Puro	0,028158	2	0,014079			
Total	1,681772	14				

Diferente para a curva #1, a corrente negativa é significativa para a curva #2, e conforme mostrado na Figura 4.27, a corrente negativa apresenta 42,2% da proporção total dos efeitos. Seguidos do tempo de corrente negativa com 19,7% e a corrente de pico com 17,9%. Embora não seja significativa, mas com grande presença na proporção dos efeitos, o fator da corrente negativa quadrático representa 12,5% em relação aos efeitos totais para a penetração na curva #2, isto mostra a importância do efeito da corrente negativa sobre a penetração do cordão de solda. Importante que se verificou menor presença de erro na análise da penetração para a curva #2, mostrada no gráfico de Pareto, Figura 4.27, onde a

proporção total dos fatores se aproxima do valor de 100%, diferente do ocorrido para a curva #1, Figura 4.10.

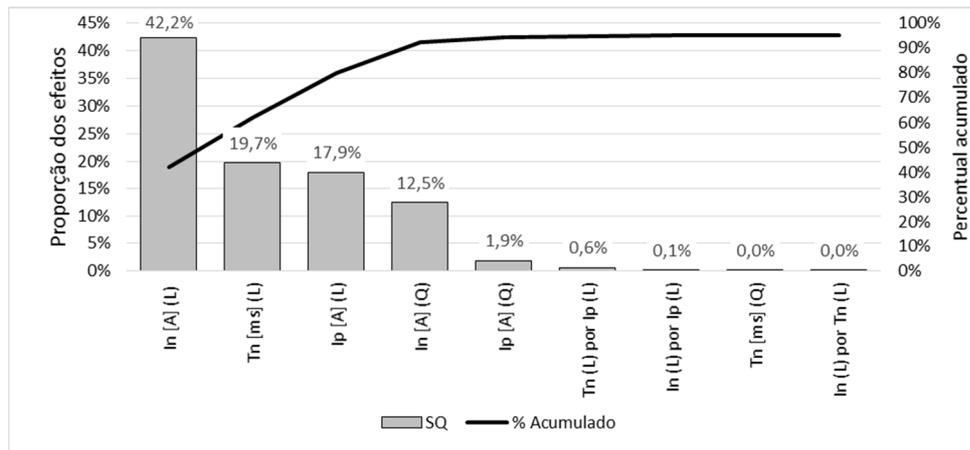


Figura 4.27 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a penetração, curva #2.

Esta influência da corrente negativa também é comprovada no gráfico dos efeitos principais, Figura 4.28, onde há uma grande variação da penetração alterando a corrente do seu nível central $I_n = -75$ A para o valor $I_n = -100$ A. A relação da corrente negativa com a penetração apresenta uma relação inversa, quando incremento de -50 a -100 A (no valor absoluto), causa redução na penetração, oposto do ocorrido na curva #1, conforme a Figura 4.11, onde para um incremento de -50 a -150 A causa um aumento na penetração. Entretanto, o tempo de corrente negativa apresenta a mesma relação na curva #2 do que na curva #1, uma proporção inversamente proporcional, porém menos significante na curva #2. O terceiro parâmetro avaliado, quando se incrementa a corrente de pico, ocorre o aumento do valor da penetração.

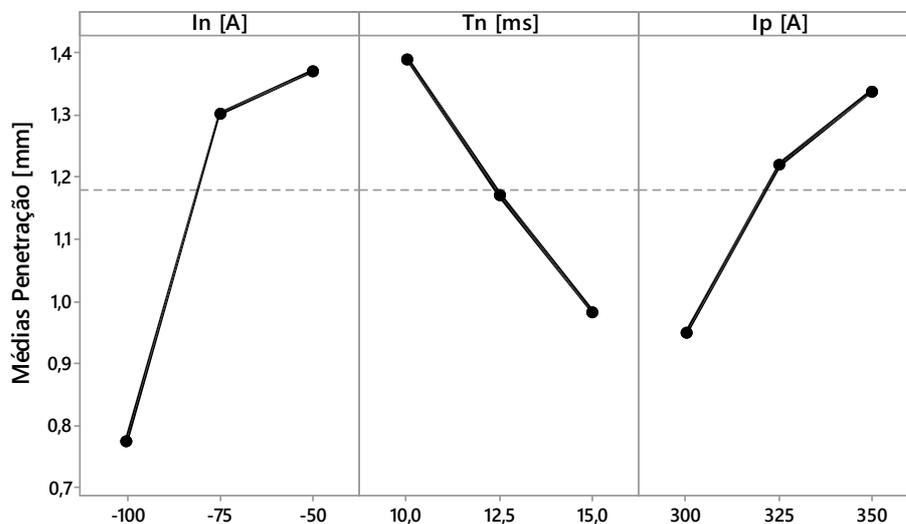


Figura 4.28 – Gráfico dos efeitos principais para a penetração, curva #2.

Na Figura 4.29 se apresentam os gráficos de contorno da superfície de resposta da penetração, para os parâmetros da curva #2, em função da corrente (I_n) e o tempo da polaridade negativa (T_n), para a corrente de pico de 300 A. Na Figura 4.29 (a) é possível observar que os menores valores de penetração podem ser obtidos para a corrente negativa em -100 A e tempo de polaridade negativa em 15 ms, diferente do encontrado para a curva #1. Conforme a Figura 4.29 (b), comprova-se a necessidade de manter a corrente de pico inferior aos 320 A, $T_n = 15$ ms e $I_n = -100$ A para se atingir menores valores de penetração.

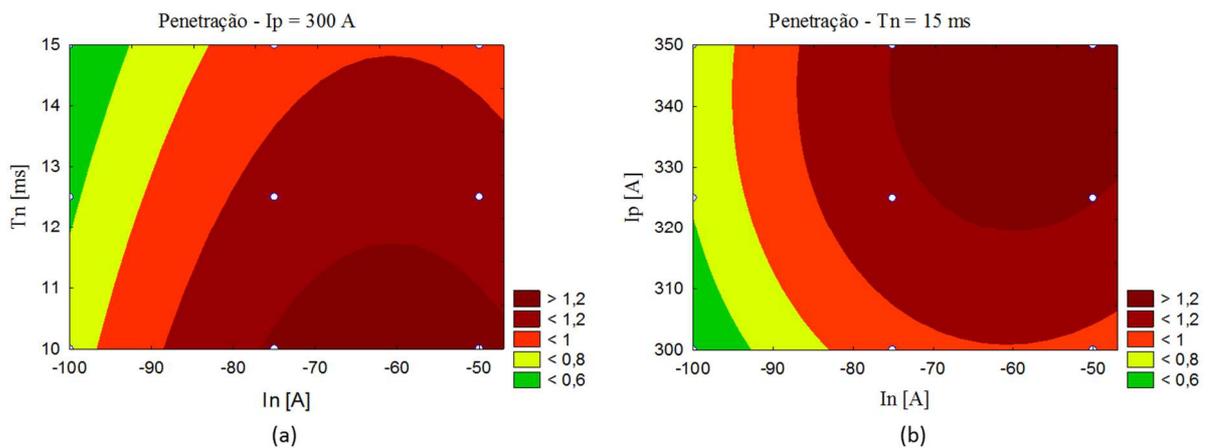


Figura 4.29 – Gráfico de Contorno da superfície de resposta da penetração em relação a I_n e T_n com $I_p = 300$ A (a); e da penetração em relação a I_n e I_p com $T_n = 15$ ms (b).

4.6.2 Curva #2: Altura

A Tabela 4.15 mostra a análise de variância (ANOVA) dos três parâmetros principais e interações sobre a altura do reforço do cordão de solda realizado usando a curva #2. A corrente negativa, a corrente de pico e a interação ($T_n \times I_p$) tem efeito significativo sobre a altura. Os resultados mostram a influência significativa da corrente negativa com 36,7% de proporção dos efeitos e a corrente de pico com 22,6% desta proporção.

Tabela 4.15- Análise de Variância dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a Altura do reforço do cordão de solda realizado com a curva #2.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	0,419070	1	0,419070	154,6955	0,006402	Significativo
I_n [A] (Q)	0,043768	1	0,043768	16,1564	0,056683	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	0,161596	1	0,161596	59,6516	0,016354	Não-Signif.
T_n [ms] (Q)	0,009185	1	0,009185	3,3904	0,206922	Não-Signif.
I_p [A] (L)	0,258481	1	0,258481	95,4155	0,010319	Significativo
I_p [A] (Q)	0,008730	1	0,008730	3,2226	0,214475	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,036290	1	0,036290	13,3962	0,067210	Não-Signif.
I_n (L) por I_p (L)	0,000049	1	0,000049	0,0181	0,905328	Não-Signif.
T_n (L) por I_p (L)	0,174724	1	0,174724	64,4976	0,015153	Significativo
Falta de ajuste	0,031771	3	0,010590	3,9093	0,210370	
Erro Puro	0,005418	2	0,002709			
Total	1,142754	14				

A Figura 4.30 mostra os efeitos dos parâmetros principais sobre a altura. Onde um aumento no valor da corrente negativa de -50 a -100 A causa um aumento na altura do cordão de solda, efeito semelhante apresentou esse parâmetro na curva #1. O efeito do tempo da corrente negativa, por exemplo, para um incremento de 10 a 15 ms ocorre um aumento da altura. Aumentando a corrente de pico causa aumento na altura.

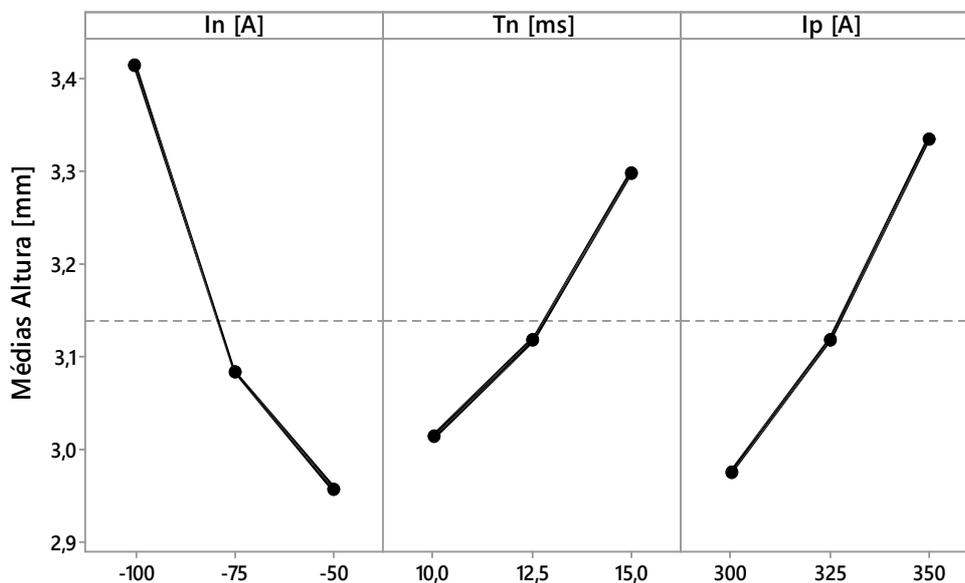


Figura 4.30 – Gráfico dos efeitos parâmetros principais sobre a altura, curva #2.

Na Figura 4.31 estão relacionados os gráficos de interações, da análise de variância a interação o tempo de polaridade negativa (T_n) e da corrente de pico (I_p) apresenta efeito significativo sobre a altura, conforme Figura 4.31 (b). Quando o valor da corrente de pico for ajustado em 300 A é necessário que o $T_n = 15$ ms para obter a maior altura.

As demais interações são lineares e não apresentam efeito significativo sobre a altura do cordão de solda.

A interação entre o tempo de polaridade negativa e a corrente de pico também pode ser visualizada no gráfico de contorno da superfície de resposta na Figura 4.33 (a), onde é possível atingir o valor máximo da altura quando os parâmetros são os seguintes $T_n = 15$ ms e I_p de 300 a 350 A (quando se mantém constante $I_n = -100$ A).

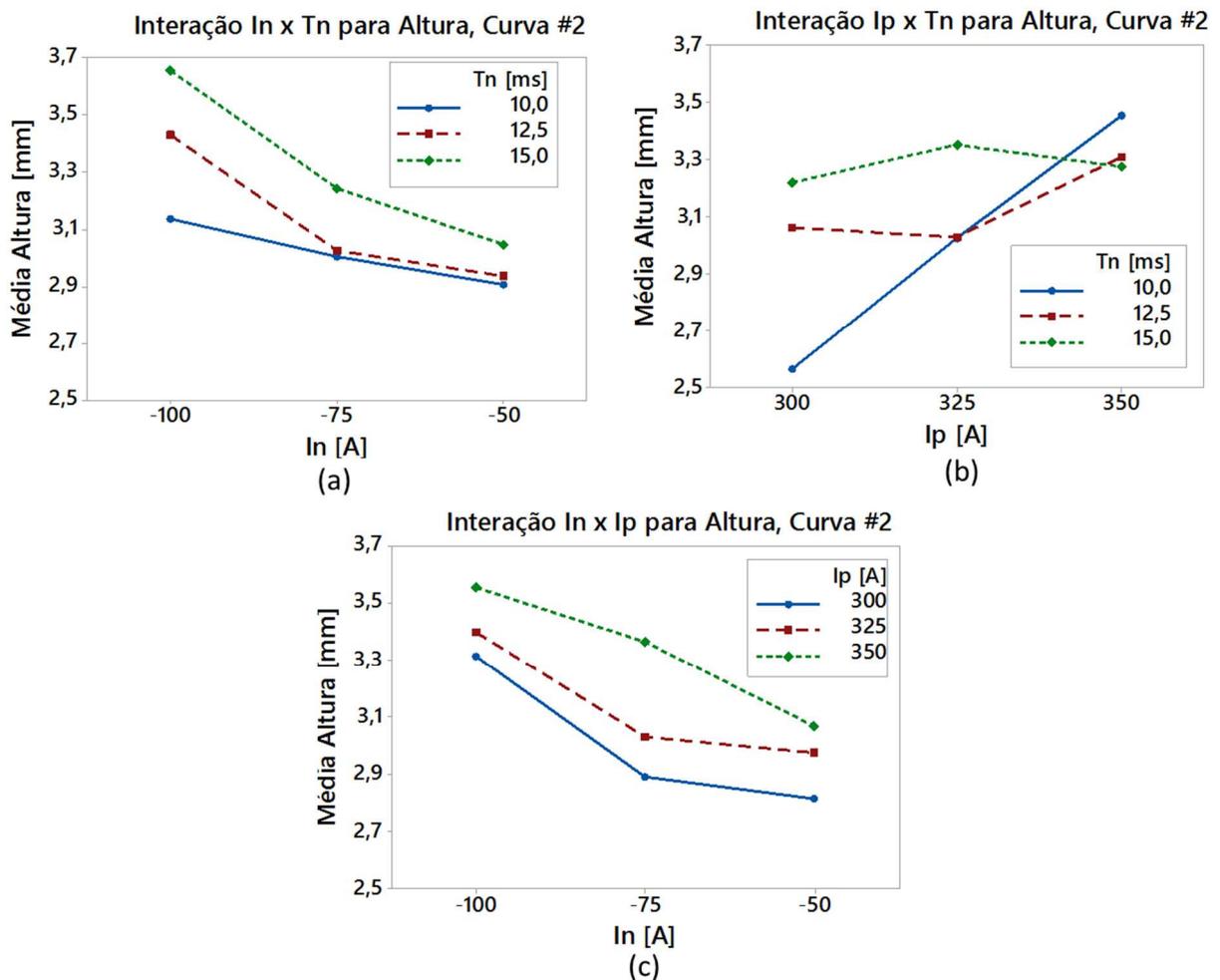


Figura 4.31 – Gráfico da interação dos fatores para a altura, curva #2.

Analisando os gráficos de contorno das superfícies de resposta da Figura 4.33 (b) e (c), é possível maximizar a altura (maior que 3,6 mm), para seguinte combinação de parâmetros $I_n = -100$ A e I_p de 300 a 350 A, mantendo constante o tempo de corrente negativa de 15 ms. Mesmo com o auxílio das superfícies de resposta, o entendimento do nível da corrente de pico positiva para atingir os maiores valores de altura, necessitou da análise de sensibilidade utilizando a equação de regressão para a altura (os coeficientes de regressão podem ser encontrados no APÊNDICE D). Para o tempo de corrente negativa igual a 15 ms e a corrente

negativa igual a -100 A, e utilizando a equação de regressão, para os valores de corrente de pico igual a 350 A, a altura resultante é 3,67 mm. E considerando a corrente de pico igual a 300 A, a altura resulta em 3,73 mm, leve diferença entre os dois níveis.

Em resumo, para atingir a maximização da altura para a forma de onda de corrente #2, os parâmetros necessários são: corrente negativa de -100 A, tempo de polaridade negativa de 15 ms e corrente de pico de 300 A.

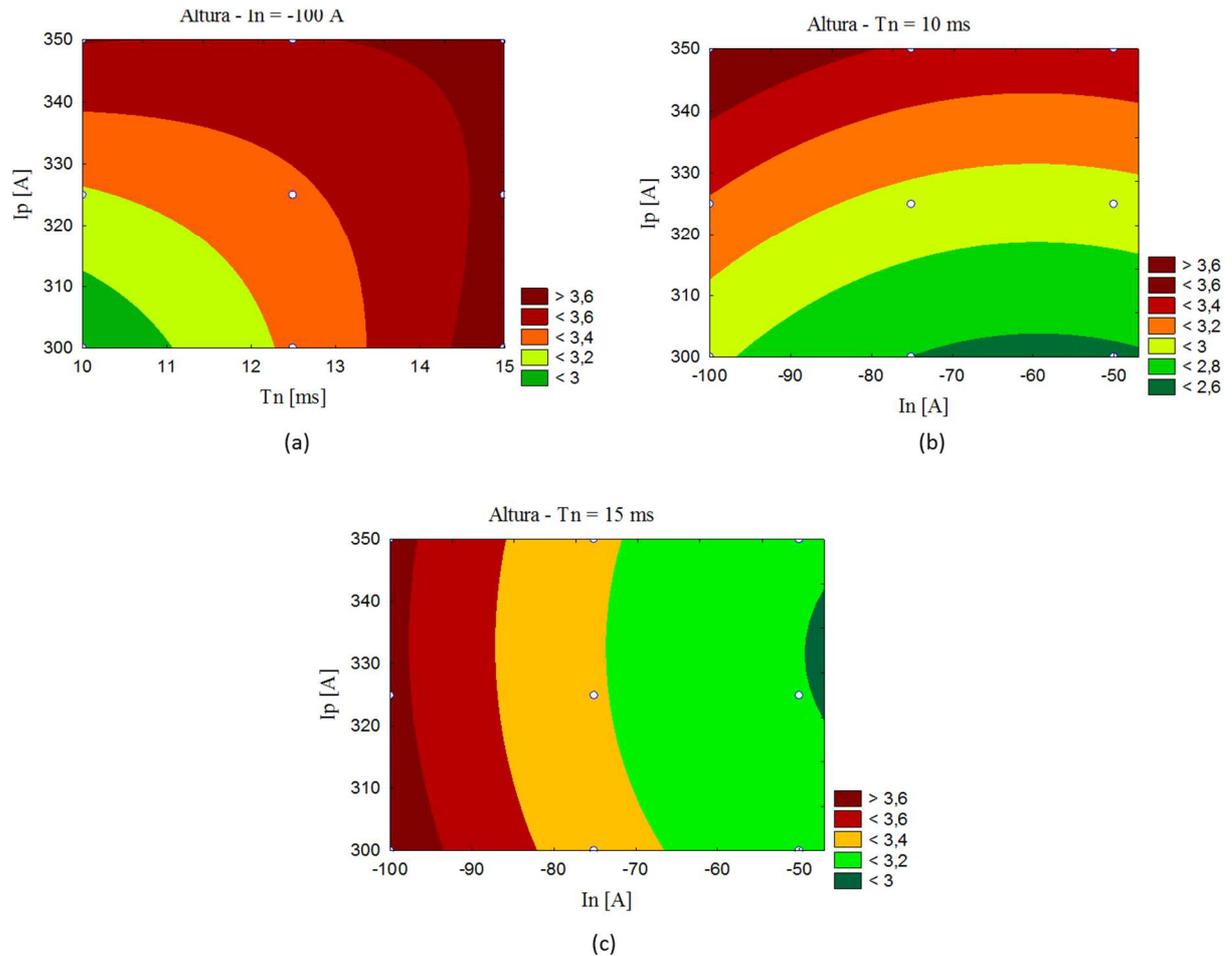


Figura 4.32 – Gráfico de Contorno da altura para a curva #2 em relação a I_p e T_n com $I_n = -100$ A (a); em relação a I_n e I_p com $T_n = 15$ ms (b) e com $T_n = 10$ ms (c).

4.6.3 Curva #2: Largura

Na Tabela 4.16 se apresenta a análise de variância dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a largura do cordão de solda da curva #2.

Tabela 4.16- Análise de Variância dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a Largura do cordão de solda, curva #2.

Fator	SQ	GDL	QM	F	Valor-p	Significância
I_n [A] (L)	1,666225	1	1,666225	31,75698	0,030076	Significativo
I_n [A] (Q)	0,027547	1	0,027547	0,52502	0,544008	Não-Signif.
T_n [ms] (L)	0,924800	1	0,924800	17,62598	0,052322	Não-Signif.
T_n [ms] (Q)	0,033940	1	0,033940	0,64687	0,505643	Não-Signif.
I_p [A] (L)	2,741311	1	2,741311	52,24730	0,018607	Significativo
I_p [A] (Q)	0,203691	1	0,203691	3,88219	0,187602	Não-Signif.
I_n (L) por T_n (L)	0,022500	1	0,022500	0,42883	0,579811	Não-Signif.
I_n (L) por I_p (L)	1,289360	1	1,289360	24,57422	0,038366	Significativo
T_n (L) por I_p (L)	0,010201	1	0,010201	0,19442	0,702345	Não-Signif.
Falta de ajuste	1,897654	3	0,632551	12,05595	0,077561	
Erro Puro	0,104936	2	0,052468			
Total	8,930718	14				

Semelhante à altura, para a largura do cordão de solda, considerando a curva #2, a corrente negativa e a corrente de pico, e a interação ($I_n \times I_p$) têm efeito significativo sobre a largura. Os efeitos dos parâmetros I_n , T_n e I_p sobre a largura são apresentados na Figura 4.33, mostrando uma relação semelhante aos encontrados para a curva #1, na Figura 4.16. O incremento da corrente de pico positiva causa aumento na largura do cordão de solda, possivelmente devido ao aumento da energia de soldagem.

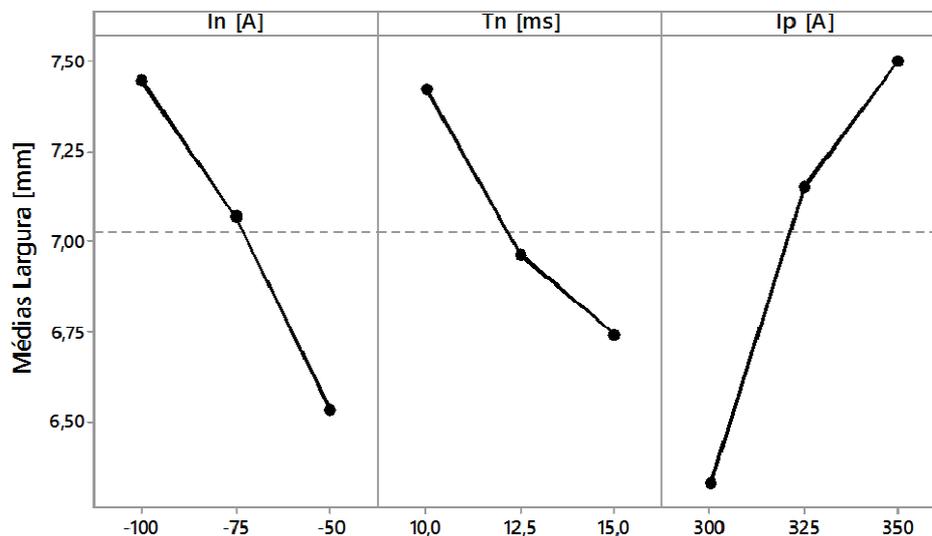


Figura 4.33 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais sobre a largura, curva #2.

A determinação dos parâmetros da interação entre a corrente negativa e a corrente de pico, e a maximização da largura podem ser realizados mediante os gráficos de contorno das superfícies de resposta da Figura 4.34 (a).

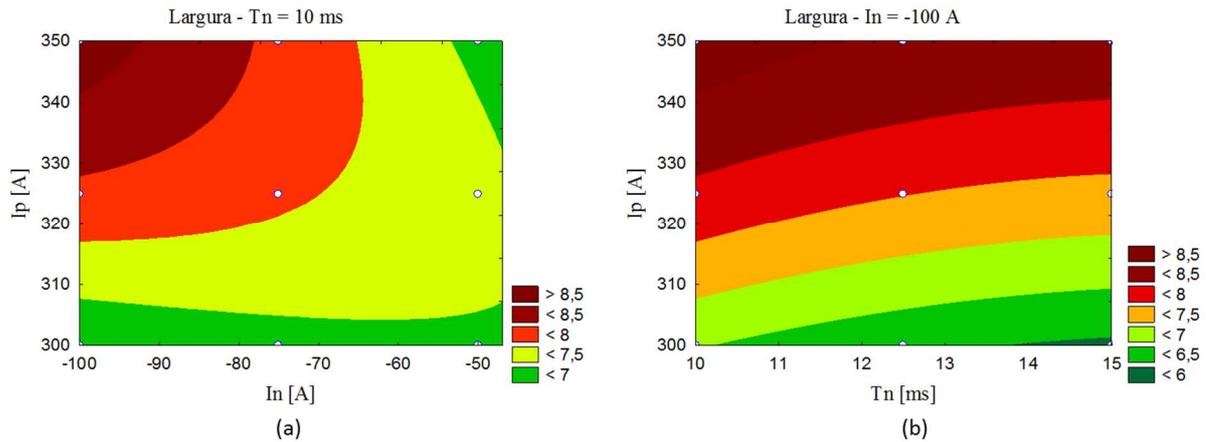


Figura 4.34 – Gráfico de contorno da largura para a curva #2 em relação a I_n e I_p com $T_n = 10$ ms (a); e da largura em relação a T_n e I_p com $I_n = -100$ A.

A maximização da largura do cordão de solda para a curva #2 ocorre para os seguintes valores dos parâmetros: $I_n = -100$ A, $T_n = 10$ ms e $I_p = 350$ A, semelhante ao ocorrido para a curva #1.

4.6.4 Curva #2: Análise da relação entre Penetração, Altura e Largura

Para as variáveis resposta da curva #2 foi realizada a análise dos valores observados em relação aos valores estimados, conforme a Figura 4.35. Para a penetração e a altura os valores medidos se aproximaram dos estimados, pode verificar-se a proximidade entre as dispersões e os valores estimados nas equações de regressão. Entretanto para a largura alguns valores estimados entre 6,5 e 8,0 apresentam dispersão em relação aos valores observados, isso pode ser verificado alto valor de soma quadrática (SQ) do erro na tabela ANOVA da largura, Tabela 4.16.

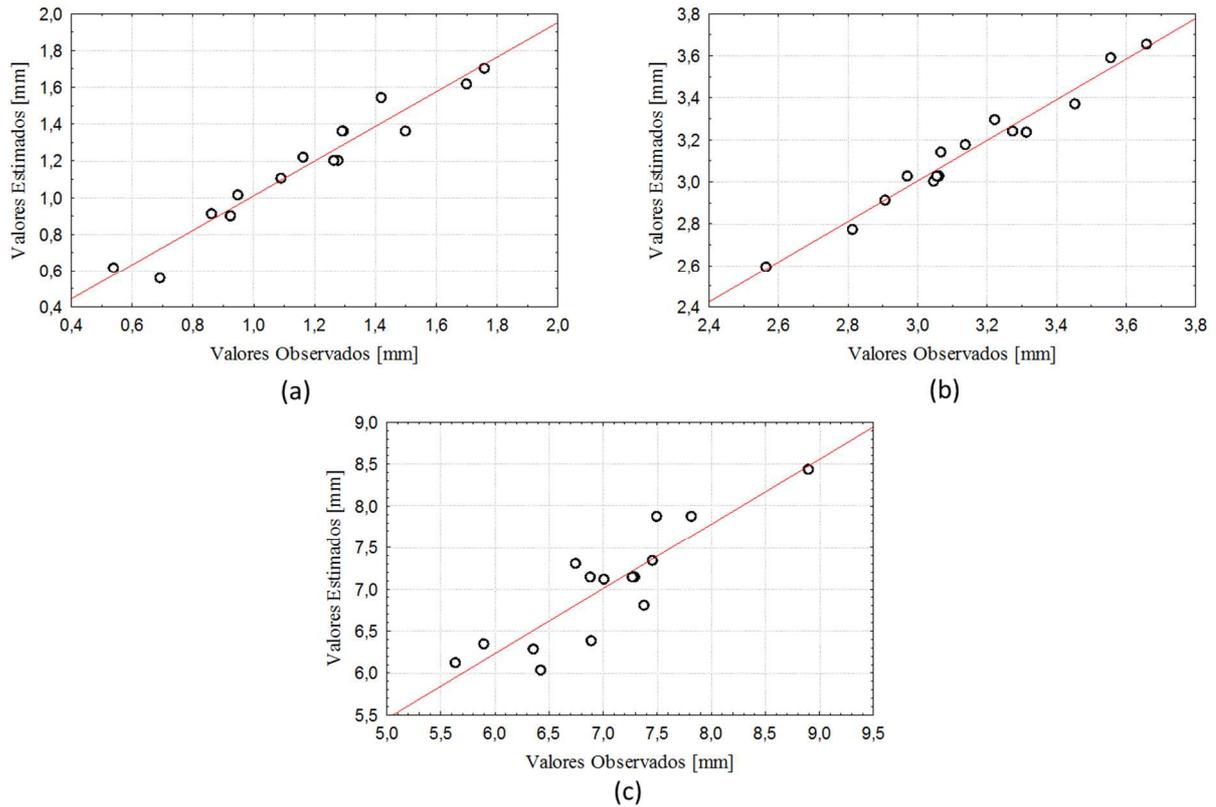


Figura 4.35 – Gráfico comparativo entre valores observados e valores estimados considerando a curva #2 para a Penetração (a); Altura (b); Largura (c).

Por fim, buscou-se a otimização do processo combinando as três variáveis resposta, penetração, altura e largura do cordão de solda. Na Tabela 4.17, estão listados os parâmetros necessários para a otimização individual de cada uma das respostas, assim como o valor otimizado encontrado nas equações de regressão (coeficientes de regressão listados no APÊNDICE H).

Tabela 4.17- Níveis para otimização da Penetração, Altura e Largura para a curva #2.

Variável Resposta: Critério	Fatores			Valor otimizado [mm]
	I_n [A]	T_n [ms]	I_p [A]	
P: Penetração [mm]: Minimizar	-100	15	300	0,40
H: Altura [mm]: Maximizar	-100	15	300	3,74
L: Largura [mm]: Maximizar	-100	10	350	8,75

Da mesma forma que foi realizado para a curva #1, utilizou-se gráficos de superposição de três respostas para a otimização do processo, limitando cada uma das variáveis em intervalos alvo. Na Tabela 4.18 podem ser comparados os valores adotados para as duas curvas estudadas.

Tabela 4.18- Intervalo das variáveis respostas utilizados nos gráficos de contorno, curva #2.

Variável Resposta: Critério	Objetivo			
	Intervalo Curva #1		Intervalo Curva #2	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
P: Penetração [mm]: Minimizar	0,8	1,2	0,4	0,8
H: Altura [mm]: Maximizar	3,0	4,0	3,0	4,0
L: Largura [mm]: Maximizar	7,0	8,5	8,0	8,5

Considerando o critério da Tabela 4.18 para a penetração, a altura e a largura, observa-se que o valor de -100 A para a corrente negativa é comum para as três respostas. Dessa forma é necessário plotar um gráfico de superposição de contorno das três respostas com o valor constante de -100 A, e verificar a relação entre o tempo de corrente negativa e a corrente de pico, conforme a Figura 4.36.

Analisando o gráfico de superposição de três respostas da Figura 4.36, exibindo os contornos da penetração de 0,4 a 0,8 mm, altura de 3,0 a 4,0 mm e largura de 8,0 a 8,5 mm. A área não-sombreada mostra as respostas desejadas em função das combinações de tempo de corrente negativa ($T_n = 15$ ms) e corrente de pico ($I_p = 350$ A), constante a corrente negativa igual a -100 A. A área sombreada desse gráfico identifica as combinações inviáveis de parâmetros para as respostas desejadas.

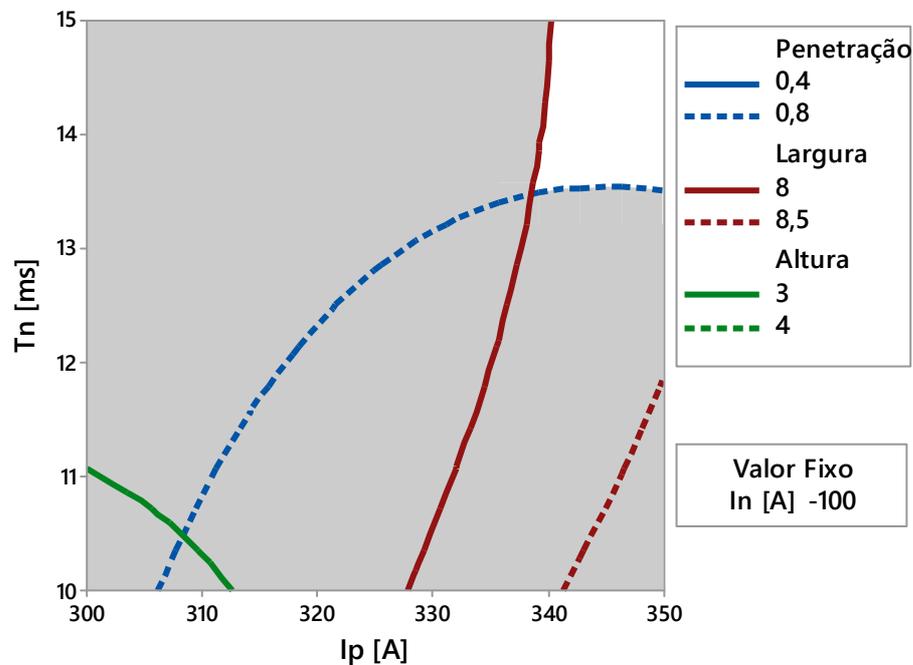


Figura 4.36 – Gráficos de contorno para Penetração, Altura e Largura considerando a curva #2 e valor fixo $I_n = -100$ A.

4.7 Relação entre Curva #1 e Curva #2

Primeiramente em relação a curva #1 para a curva#2, verificou-se a necessidade do tempo de base para conseguir atingir a estabilidade do arco elétrico durante o processo de soldagem. No primeiro experimento Box-Behnken, a corrente de base de 40 A e o tempo de base variando de 5 a 15 ms, contribuíram na estabilidade do arco elétrico e cordões de solda isentos de salpicos. Entretanto, no Box-Behnken para a curva #2, a não utilização do tempo e corrente de base ($T_b = 0$) gerou ensaios no experimento com alta quantidade de salpicos e instabilidade do arco elétrico. Conforme concluído por [Nascimento et al., 2008], a corrente de base é importante para evitar salpicos. Esta alta quantidade de salpicos é explicada pelos autores, onde mostraram no seu experimento, para a curva sem a corrente de base (curva #2) não foi atingida a condição de uma gota por período de pulso (UGPP). Já para a curva com corrente de base (curva #1) os autores conseguiram obter a condição de UGPP.

Em relação aos resultados obtidos da geometria do cordão de solda, houveram poucas diferenças entre as curvas #1 e #2, mostrando uma maior variação de penetração, altura e largura entre os níveis dos parâmetros estudados do que entre os dois tipos de curvas estudadas. [Farias et al., 2005] concluíram que, variando as formas de onda de corrente no experimento não há influência estatística da forma de onda em relação a geometria do cordão de solda.

No gráfico da Figura 4.37, estão relacionados os resultados de penetração obtidos em vinculação com os níveis predeterminados de %EN calculados pela Equação 2.4 para as curvas #1 e #2.

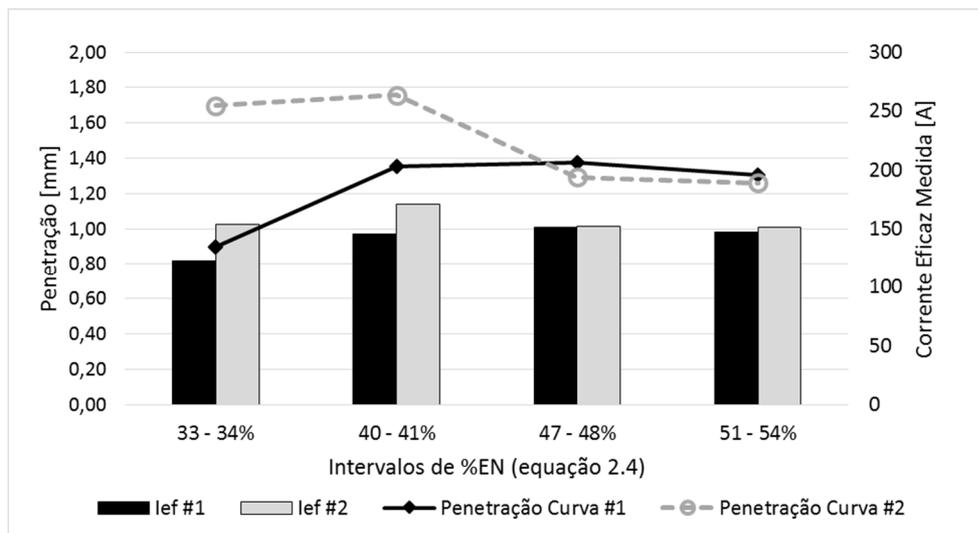


Figura 4.37 – Gráfico considerando %EN, Corrente Eficaz e Penetração para ensaios da curva #1 e curva #2.

Considerando os resultados obtidos de penetração em relação ao %EN (Equação 2.4) e corrente eficaz mostrados para a curva #1, foram divididos alguns dos ensaios realizadas em grupos próximos de %EN, buscando a relação entre corrente eficaz, %EN e a penetração. Como mostrado na Figura 4.37, nos dois primeiros intervalos (33-34% e 40-41%) a penetração na curva #2 é maior do que na curva #1, e pode-se observar que a corrente eficaz para a curva #2 é maior. Já para os dois últimos intervalos de %EN (47-48% e 51-54%), os valores dos resultados da penetração entre as curvas são muito próximos, assim como os respectivos valores de correntes eficazes medidos. Em suma, há uma maior dependência da variação do %EN e da corrente eficaz sobre a penetração do que a própria forma da curva de corrente.

Por fim, os valores otimizados da geometria do cordão de solda, considerando as três variáveis respostas juntas (penetração, altura e largura), realizados através da superposição dos gráficos de contorno, estão resumidos na Tabela 4.19, onde pode-se comparar os resultados da curva #1 com a curva #2. A corrente negativa (I_n) e seu respectivo tempo (T_n) foram usados nos dois experimentos, e mostra a necessidade da polaridade negativa, para a curva #1 (Figura 4.20) o valor de -150 A e para a curva #2 (Tabela 4.17), o valor de -100 A, e para o tempo de corrente negativa, o nível superior de 15 ms.

Tabela 4.19- Comparativo dos valores otimizados das três variáveis de resposta em conjunto para a curva #1 e #2, considerando os gráficos de contorno.

Variáveis Respostas: Critério	Valores Otimizados	
	Curva #1	Curva #2
P: Penetração [mm]: Minimizar	1,13	0,65
H: Altura [mm]: Maximizar	3,77	3,67
L: Largura [mm]: Maximizar	7,79	8,32

5. CONCLUSÕES

A avaliação dos parâmetros da polaridade negativa e a forma de onda de corrente do processo MIG/MAG com polaridade variável foi realizada depositando cordões de solda em aço inoxidável sobre aço ao carbono, assim chegando às seguintes conclusões:

- a) A metodologia da superfície de resposta se torna uma ferramenta importante na obtenção do conjunto de condições do processo quando há necessidade de estimar as múltiplas respostas alvo ou objetivo. Mediante a superposição dos gráficos de contorno da superfície de resposta é possível determinar a região da otimização do processo.
- b) Nesse processo é possível obter diluição de 12% até 15%, valores recomendados para aplicações em revestimento usando o processo de soldagem. Por meio da avaliação da área A e da área B, foi verificado uma relação significativa do tempo de polaridade negativo com a diluição. A corrente negativa no seu nível inferior (-50 A) apresentou valores menores da área A, proporcionando uma menor influência do metal base nas características anticorrosivas da superfície soldada;
- c) A otimização dos parâmetros da curva #1, em relação a geometria do cordão de solda para aplicação para revestimento, sendo minimização da penetração e maximização da altura e largura simultaneamente, foi atingida com os parâmetros combinados na seguinte configuração: corrente negativa em -150 A, tempo de corrente negativa em 15 ms e tempo de base entre 10 e 15 ms;
- d) Para realizar a comparação da proporção de eletrodo negativo (%EN), deve-se utilizar a Equação 2.4, a qual considera os tempos e as intensidades de corrente, a fim de uma comparação efetiva dos níveis de %EN. Além disso, deve-se manter constante o valor da corrente eficaz, pois esta exerce influência na penetração do processo.
- e) Os cordões de solda realizados utilizando a curva #2 mostraram a necessidade da corrente de base positiva para a estabilidade do arco elétrico e melhor qualidade de soldagem.
- f) Para a curva #2, o tempo de corrente negativa apresentou influência nos resultados da otimização da geometria do cordão de solda, minimizando a penetração e maximizando a altura e a largura.

- g) Não foi constatada uma relação entre a forma da curva de corrente (curva #1 e curva #2) e a penetração dos cordões de solda, mas sim uma maior relação entre %EN e corrente eficaz independente da forma da curva de corrente.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros, são listadas:

- a) Executar soldas com os parâmetros otimizados (diluição entre 10 e 15%) utilizados neste trabalho, em revestimentos de superfícies, depositando uma, duas e até três camadas; ou pode ser sugerido usar em passe de raiz em juntas de topo;
- b) Realizar experimentos com os mesmos parâmetros utilizados, buscando a eficiência térmica do processo e comparar com o processo convencional, através da utilização do calorímetro utilizado por [Hackenhaar, 2016];
- c) Analisar outras formas da curva de corrente:
 - o Curva de corrente com corrente de base negativa;
 - o Curva de corrente com duas correntes de base positivas, anterior e posterior ao pico de corrente positivo;
- d) Analisar outros tipos de consumíveis, afim de expandir os benefícios da aplicação da polaridade variável, como a utilização em revestimentos de superfícies resistentes à abrasão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS, American Welding Society. **Welding Handbook – Welding Science and Technology**. Welding Handbook Committee, v. 1, ed. 8, USA, Miami, 1987.

AWS, American Welding Society. **Welding Handbook –Welding Processes, part 1**. Welding Handbook Committee, v. 2, ed. 8, USA, Miami, 1991.

Andrade, A. F. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro da gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

Cirino, L. M. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 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.

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.

Gohr Jr., R. **Novos Métodos de Controle de Soldagem MIG/MAG**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Gomes, J. H. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

Gonzalez, A. R. **Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada**, Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Hackenhaar, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Harwig, D. D.; Dierksheide, J.; Yapp, D.; Blackman, S. **Melting Rate Analysis of the VP-GMAW Process**, Cooperative Research Program-EWI, Summary Report December, 2002.

Hillier, F. S.; Lieberman, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**, McGraw-Hill Interamericana do Brasil, ed. 8, 2006.

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

Junior, L. P. C.; et al. **Análise microestrutural e de microdureza para revestimento de chapas de aço carbono pelo processo MIG-DWOA com arame ER 308LSi**, 6^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Caxias do Sul, 2011.

Kah, P.; Suoranta, R.; Martikainen, J. **Advanced gas metal arc welding process**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jul/2013.

Kim, T. J.; Joe, G. J.; Kong, H. S.; Cho, S. M.; Kim, C. U. **The study of variable polarity AC pulse GMA welding system**, International Conference on Electrical Engineering, p. 688-691, 2002.

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.

Kumar, R.; Dilthey, U.; Dwivedi, D. K.; Ghosh, P. K. **Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding**, Materials and Design, v. 30, p. 306-313, 2009.

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**, editado pelo autor, Porto Alegre, 1996.

Miranda, H. C.; Ferraresi, V. A. **Identificação da transferência metálica na soldagem MIG/MAG pulsada de aço inoxidável a partir de um sensor óptico**, 2^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Mai/2003.

Monteiro, L. S.; Scotti, A. **A methodology for parametrization of the MIG/MAG CA and its application in service repair of pipelines of oil and gas**, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Nov/2013.

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

Murugan, N.; Parmar, R. S. **Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel**, Journal of Materials Processing Technology, v. 41, p. 381-398, 1994.

Murugan, N.; Parmar, R. S. **Stainless Steel Cladding Deposited by Automatic Gas Metal Arc Welding**, Welding Research Supplement, p. 391-400, 1997.

Nascimento, A. S.; Vilarinho, L. O. **Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA**, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.

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. **Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (passe de raiz)**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

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.

Praveen P.; Kang, M. J.; Yarlagadda, P. K. D. V. **Arc voltage behavior in GMAW-P under different drop transfer modes**, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 32 (2), p. 196-203, 2009.

Plaine, A. H. **Estudo do processo de soldagem a ponto por fricção de juntas dissimilares entre ligas de alumínio e titânio**, Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

Puhl, E. B. **Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

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.

Santos, T. F. **Soldagem MIG com Corrente Alternada**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

Savi, B. M. **Desenvolvimento tecnológico para soldagem MIG de ligas de alumínio 5083 H116**, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

Scotti, A.; Monteiro, L. S. **Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA**, Soldagem e Inspeção, v. 17, n. 3, p. 271-277, São Paulo, 2012.

Scotti, A.; Ponomarev, V. **Soldagem MIG /MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, Editora Artliber, São Paulo, 2008.

So, W. J.; Kang, M. J.; Kim, D. C. **Weldability of pulse GMAW joints of 780 MPa dual-phase steel**, International Scientific Journal, v. 41 (1), p. 53-60, 2010.

Sreeraj, P.; Kannan, T.; Subhasismaji. **Sensitivity analysis of process parameters in cladding of stainless steel by GMAW**, Machine Design, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2013.

Subramaniam, S.; White, D. R.; Jones, J. E.; Lyons, D. W. **Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW**, Welding Research Supplement, p. 167-172, May/1999.

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 aluminium 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.

Vilarinho, L. O.; Saramago, S. F. P.; Bálamo, P. S. S.; Scotti, A. **Otimização do cálculo de variáveis no processo MIG Pulsado**, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, 2000.

Vilarinho, L. O.; Nascimento, A. S.; Fernandes, D. B.; Mota, C. A. M. **Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW**, Welding Journal, v. 88, p.92-98, 2009.

APÊNDICE A

Os parâmetros e resultados obtidos nos ensaios exploratórios para a curva #1 estão apresentados na Tabela A.1 e A.2.

Tabela A.1- Parâmetros dos Ensaios Exploratórios para a curva #1.

Ensaios	I _p [A]	T _p [ms]	I _n [A]	T _n [ms]	I _b [A]	T _b [ms]	V _a [m/min]	V _s [cm/min]	Ângulo Tocha [°]
#1	300	4	-62	6,5	42	6,5	4,3	25	-10
#2	350	3	-60	6	40	10	4,0	25	-10
#3	350	3	-100	6	40	14	4,0	25	-10
#4	350	3	-140	10	40	14	5,0	25	-10
#5	350	3	-140	14	40	10	5,5	25	-10
#6	350	3	-140	14	40	10	5,5	37,5	-10
#7	350	3	-140	14	40	10	5,5	25	+10

Tabela A.2- Resultados dos Ensaios Exploratórios para a curva #1.

Ensaios	Largura [mm]	Altura [mm]	Penetração [mm]	Área A [mm ²]	Área B [mm ²]	Diluição [%]
#1	4,45	2,90	1,15	2,55	11,85	17,7
#2	6,09	3,33	1,33	3,46	17,50	16,5
#3	6,55	3,27	1,41	3,98	17,09	18,9
#4	6,61	3,76	1,21	3,22	20,16	13,8
#5	6,64	4,02	1,39	3,99	21,32	15,8
#6	5,34	3,49	1,09	2,71	14,39	15,9
#7	6,56	3,91	1,48	4,40	21,22	17,2

APÊNDICE B

As curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva#1, considerando o intervalo de 0 a 50 ms, podem ser encontradas na Figura B.1.

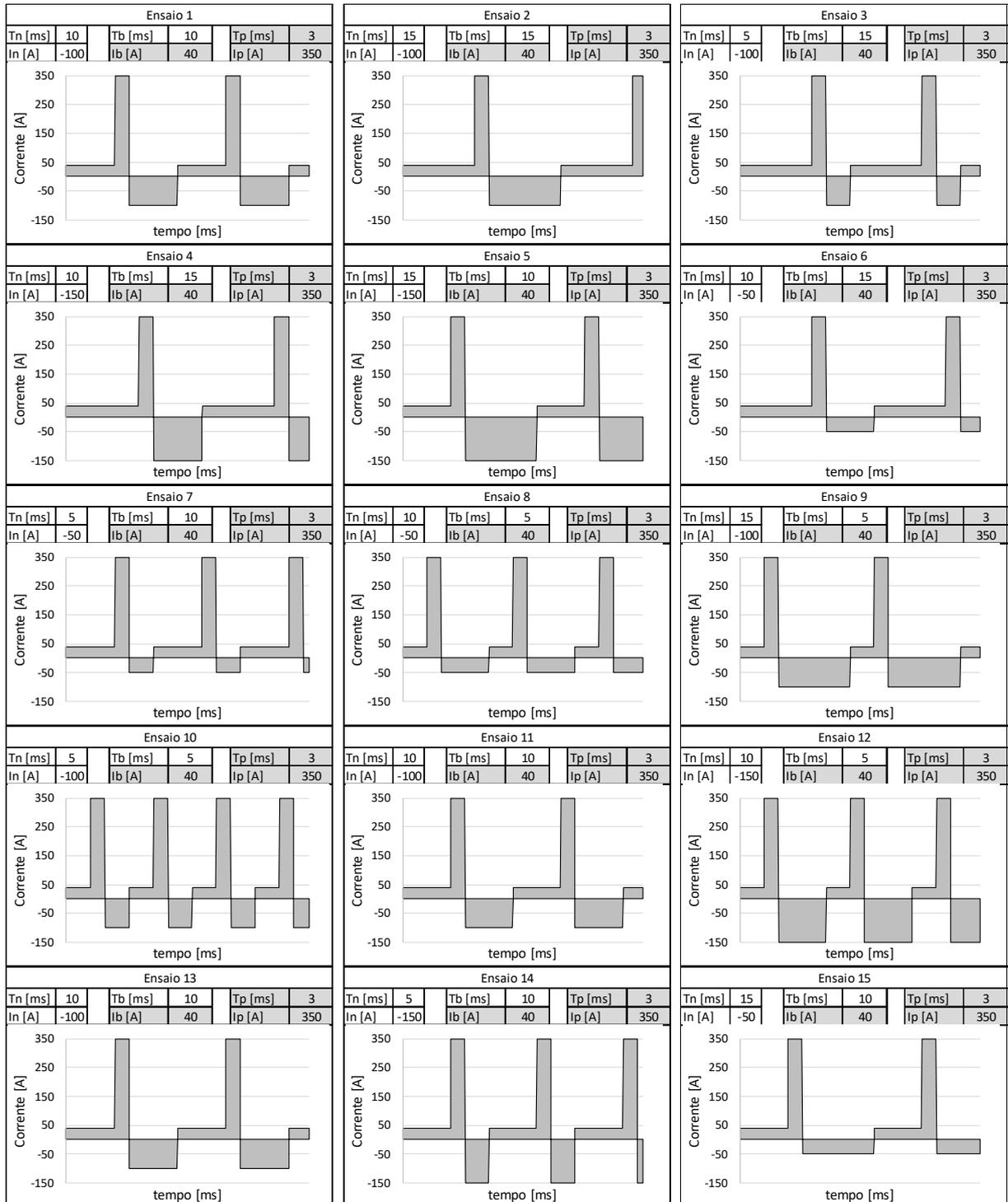


Figura B.1 – Curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva #1 no intervalo de 0 a 50 ms.

APÊNDICE C

As curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva#2, considerando o intervalo de 0 a 50 ms, podem ser encontradas na Figura C.1.

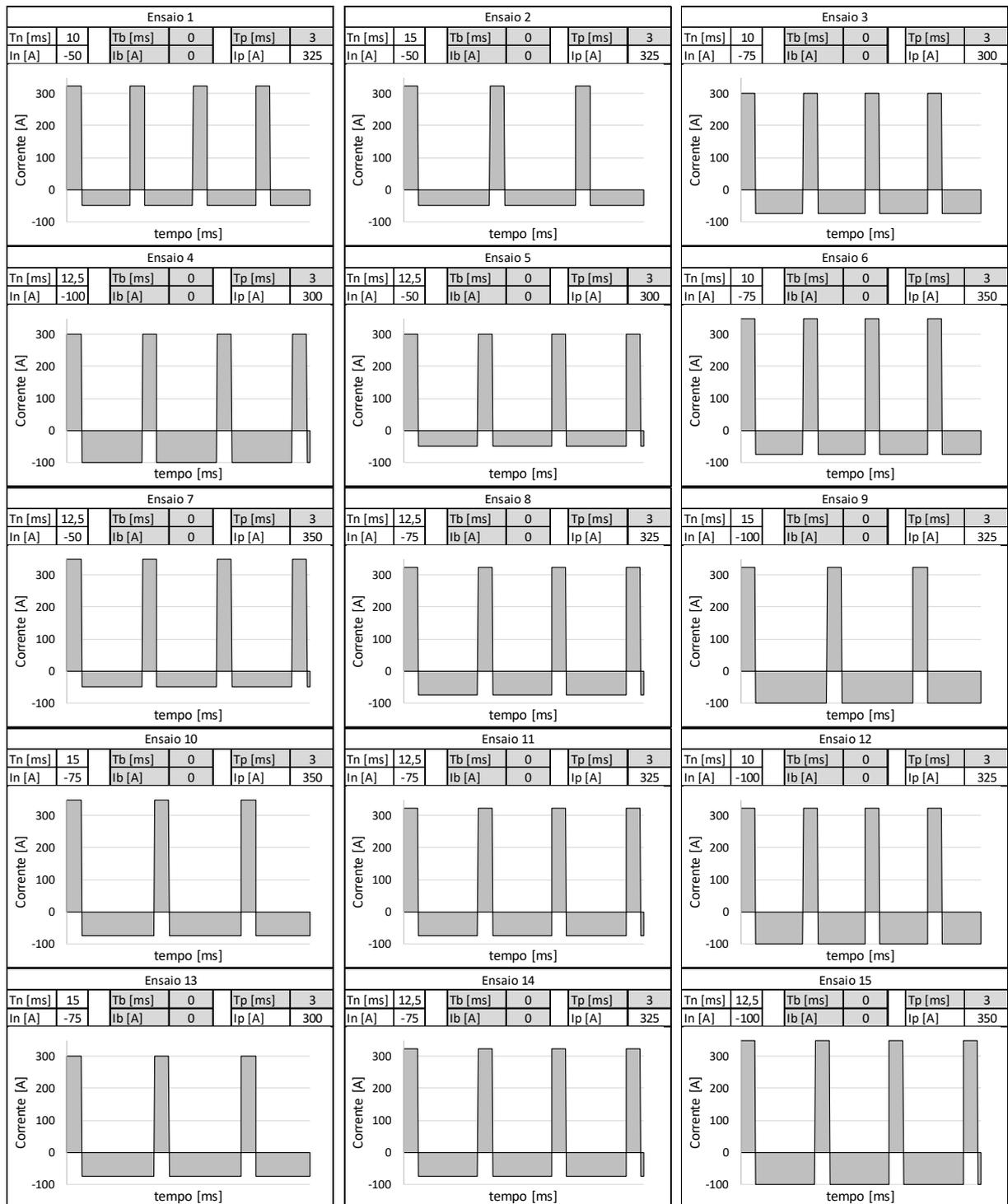


Figura C.1 – Curvas de corrente para cada um dos 15 ensaios para a curva #2 no intervalo de 0 a 50 ms.

APÊNDICE D

A configuração final do cordão, macrografias e parâmetros utilizados dos cordões da curva #1 podem ser encontrados a seguir.

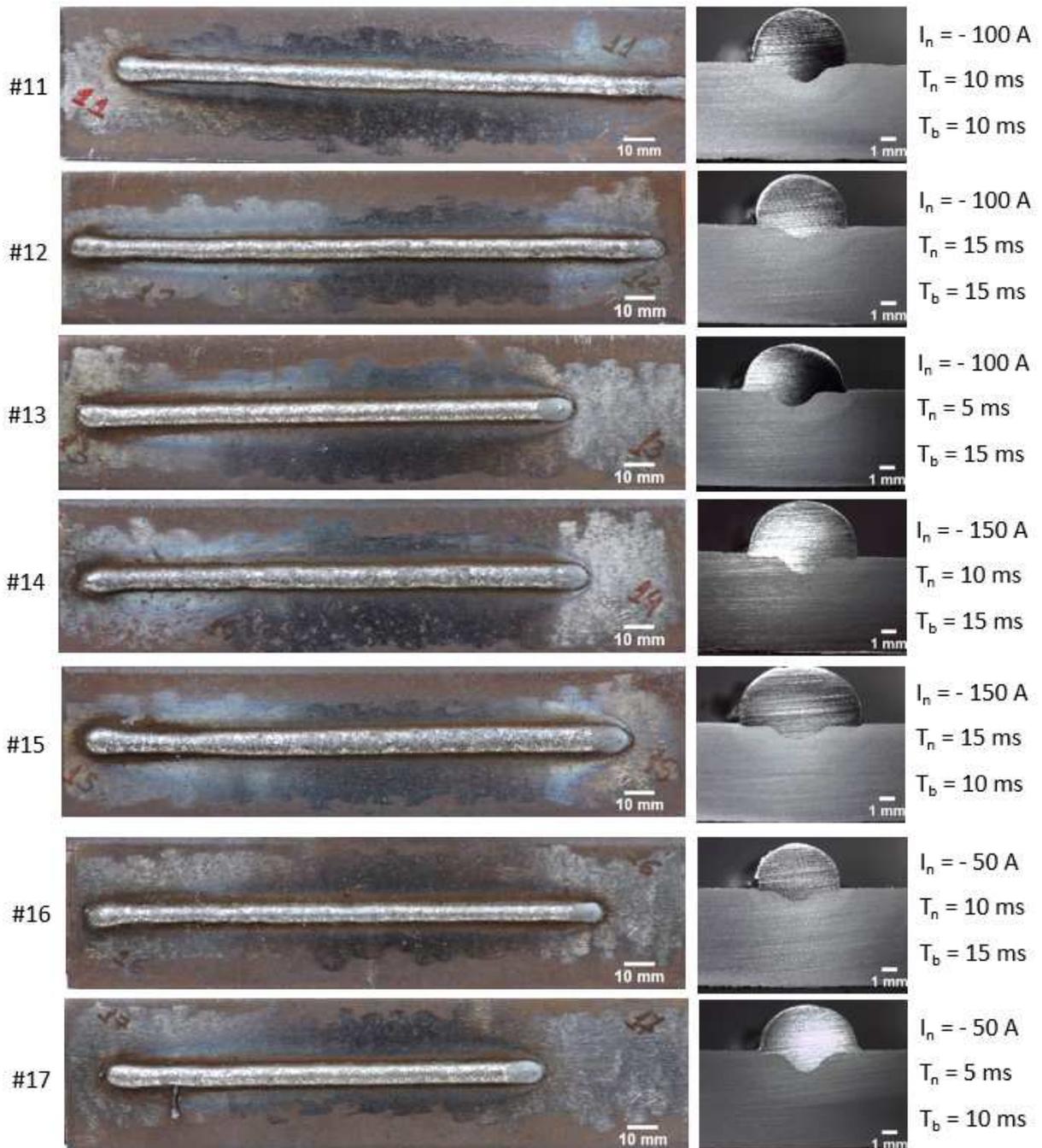


Figura D.1 – Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #11 a #25 do projeto Box- Behnken para curva #1.

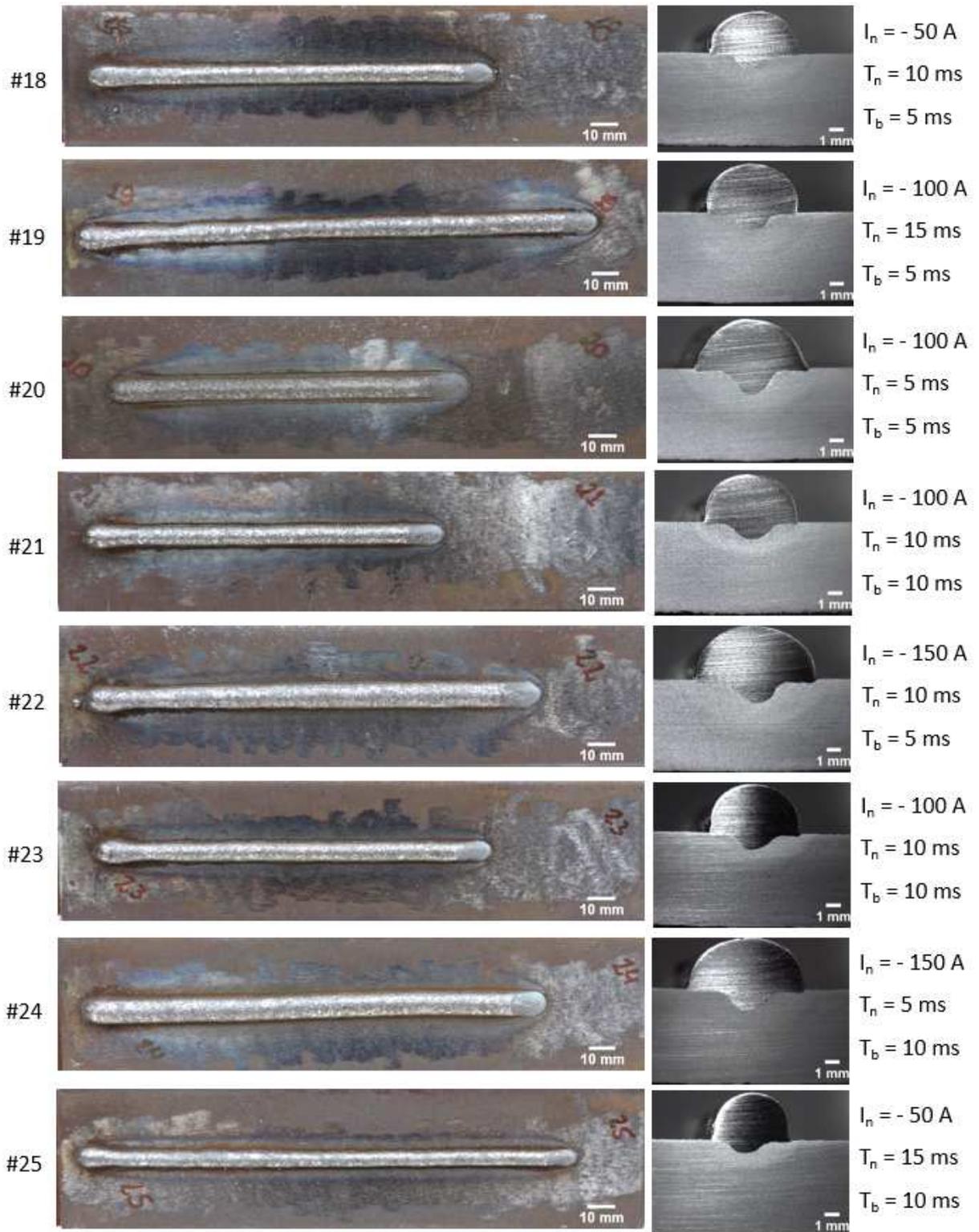


Figura D.1 – Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #11 a #25 do projeto Box-Behnken para curva #1.

APÊNDICE E

Os dados adquiridos durante o processo de soldagem para os ensaios da curva #1, podem ser encontrados na Tabela E.1. Como exemplo, encontra-se na Figura E.1 a curva de corrente e tensão adquirida para o ensaio 1 (ponto central), nos intervalos 30,06 a 30,24 segundos.

Tabela E.1- Dados adquiridos durante o processo de soldagem para a curva #1.

Ensaio	Intervalo (5 segundos)		Potência Média [W]	Corrente Eficaz [A]
1 (ponto central)	30,0	35,0	2812	146
2	20,0	25,0	2426	130
3	20,0	25,0	2529	140
4	20,0	25,0	2978	151
5	20,0	25,0	3361	165
6	30,0	35,0	2116	126
7	20,0	25,0	2552	148
8	20,0	25,0	2518	143
9	30,0	35,0	2989	147
10	15,0	20,0	3414	172
11 (ponto central)	15,0	20,0	2738	142
12	20,0	25,0	3842	178
13 (ponto central)	15,0	20,0	2691	141
14	25,0	30,0	3241	167
15	25,0	30,0	2070	123

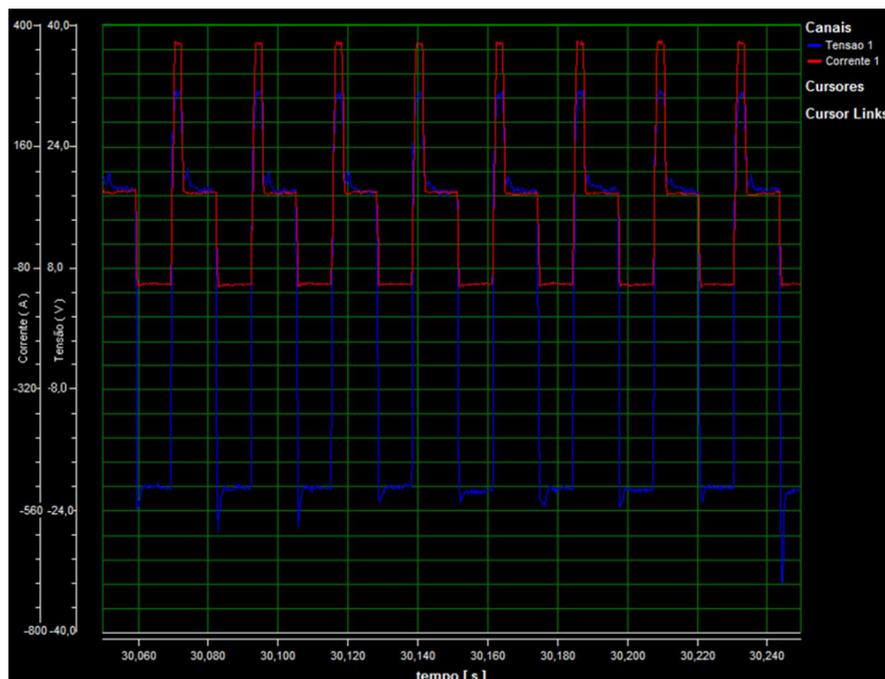


Figura E.1 – Curva de corrente e tensão para o ensaio 1, curva #1.

APÊNDICE F

Os coeficientes para a Equação 2.3 de regressão, igualmente apresentada na Equação F.1, podem ser encontrados na Tabela F.1, a seguir. Nesta equação, Y representa as variáveis resposta, podendo ser a penetração, altura e largura dos cordões de solda.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (\text{F.1})$$

Tabela F.1- Coeficientes da equação de regressão para as variáveis resposta: Penetração, Altura e Largura.

Coeficiente de Regressão	Penetração	Altura	Largura
b ₀	2,143833	1,859500	11,92100
b ₁	-0,004021	-0,016032	0,02292
b ₂	-0,047192	0,005575	-0,60318
b ₃	-0,117017	0,082650	-0,26110
b ₁₂	-0,000141	-0,000112	-0,00181
b ₁₃	-0,000178	0,000537	0,00032
b ₂₃	0,000940	0,002990	0,00828
b ₁₁	-0,000024	-0,000027	0,00013
b ₂₂	-0,000852	-0,001130	0,01154
b ₃₃	0,002618	-0,004320	0,00547

APÊNDICE G

Combinações de parâmetros da curva #2 usados para realizar os cordões de solda, e macrografia da seção transversal dos cordões de solda.

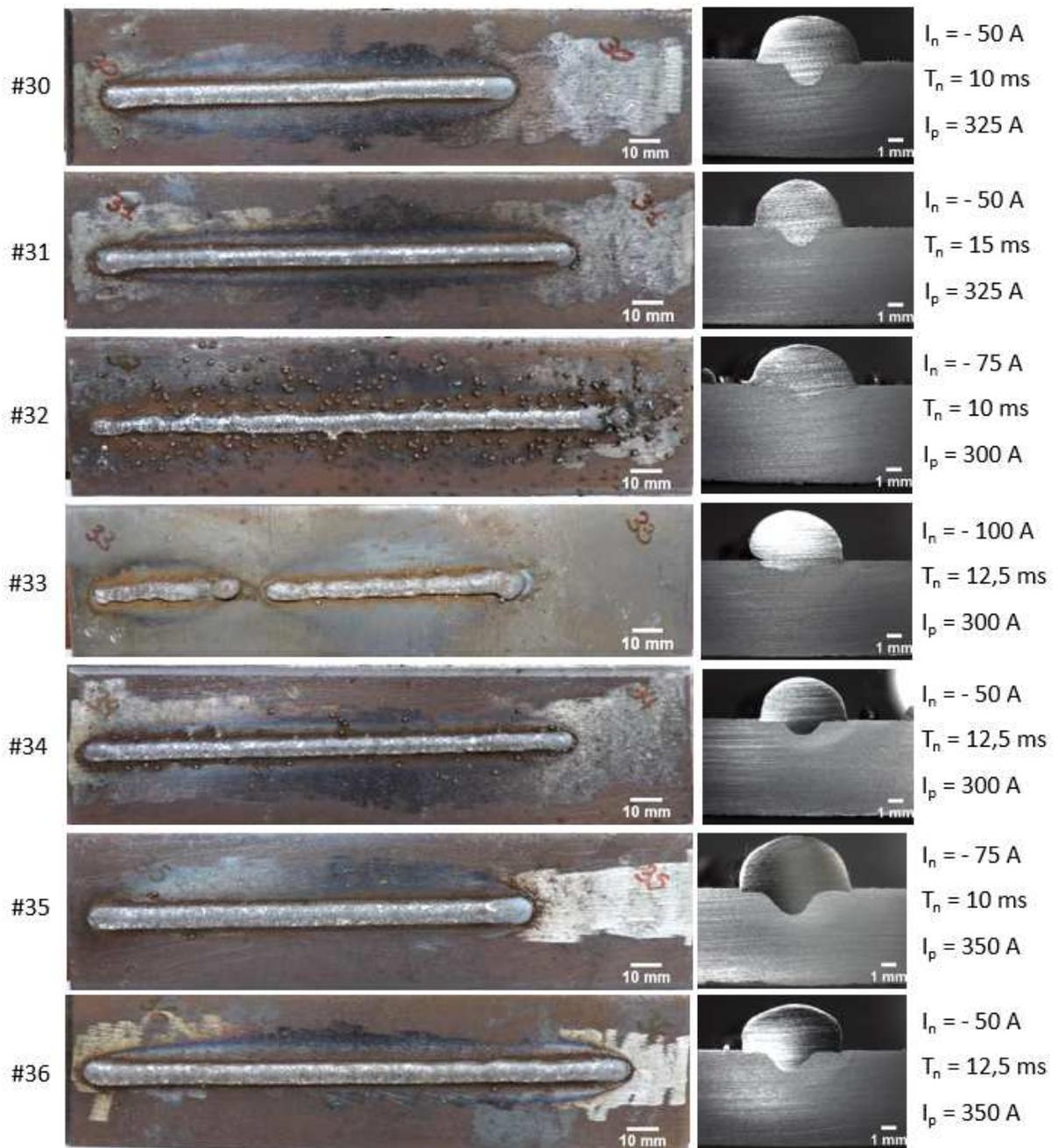


Figura G.1 – Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #30 a #44 do projeto Box- Behnken para curva #2.

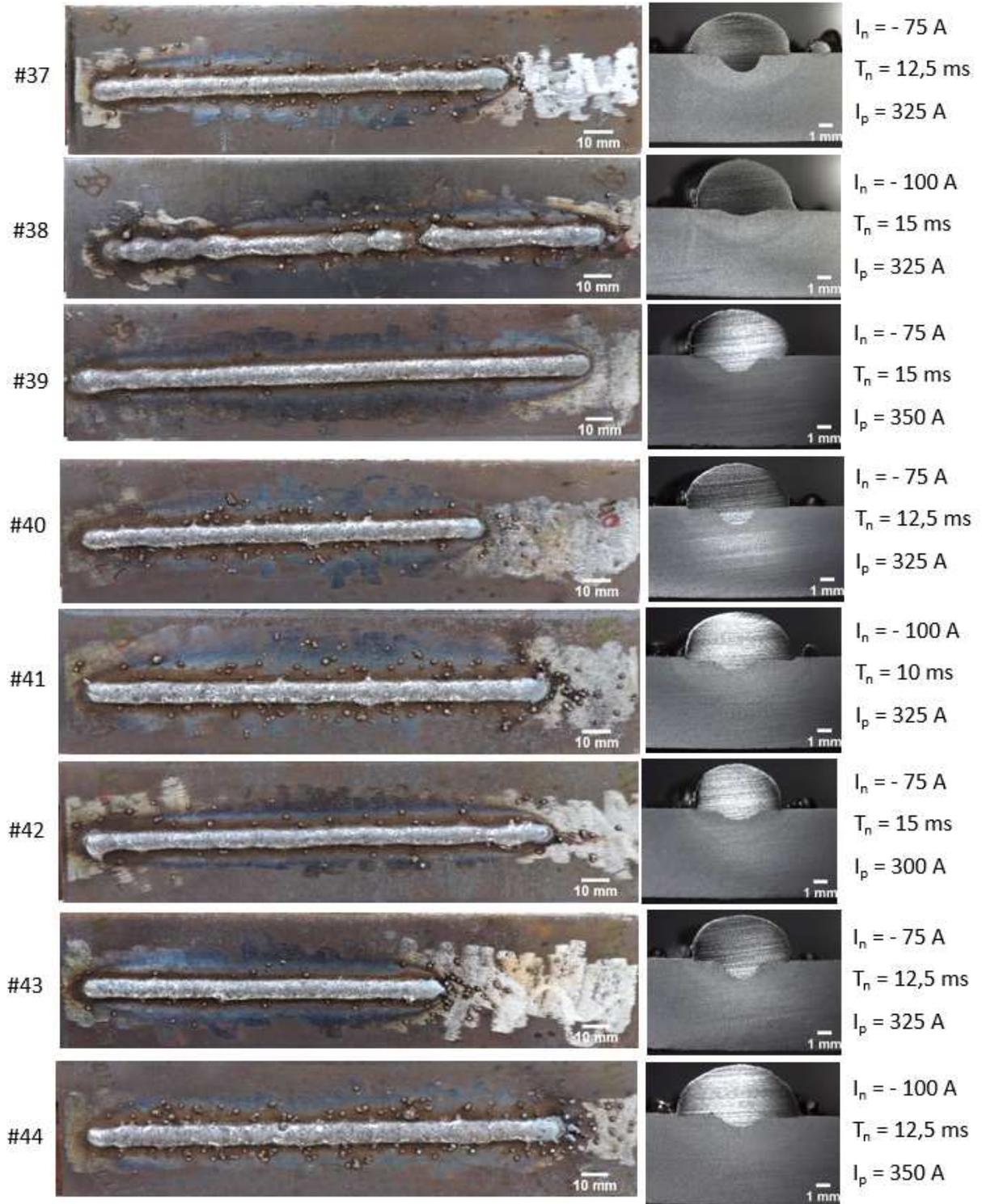


Figura G.1 – Configuração, macrografias e parâmetros dos ensaios #30 a #44 do projeto Box-Behnken para curva #2.

APÊNDICE H

Dados adquiridos durante a execução dos cordões de solda para a curva #2, encontra-se na Tabela H.1. Como exemplo, na Figura H.1, mostra-se a curva de corrente e tensão adquirida para o ensaio 11 (ponto central), nos intervalos 30,60 a 30,78 segundos.

Tabela H.1- Dados adquiridos durante o processo de soldagem para a curva #2.

Ensaio	Intervalo (5 segundos)		Potência Média [W]	Corrente Eficaz [A]
1	20,0	25,0	2818	154
2	20,0	25,0	2230	136
3	20,0	25,0	3014	152
4	10,0	15,0	3247	157
5	20,0	25,0	2265	137
6	25,0	30,0	3178	171
7	20,0	25,0	2585	152
8 (ponto central)	20,0	25,0	2861	152
9	30,0	35,0	2904	151
10	25,0	30,0	2890	151
11 (ponto central)	25,0	30,0	2769	152
12	30,0	35,0	3477	173
13	5,0	30,0	2555	144
14 (ponto central)	15,0	20,0	2819	152
15	30,0	35,0	3471	171

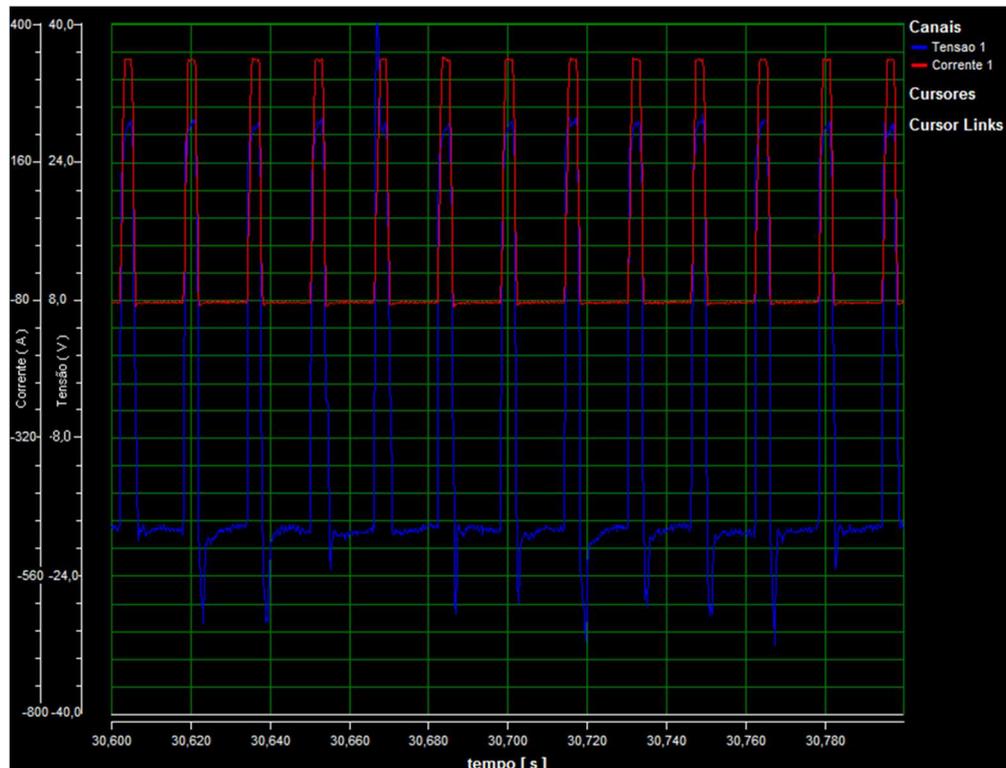


Figura H.1 – Curva de corrente e tensão para o ensaio 8, curva #2.

APÊNDICE I

Os coeficientes para a Equação 2.3 de regressão para a curva #2, igualmente apresentada na Equação I.1, podem ser encontrados na Tabela I.1, a seguir. Nesta equação, Y representa as variáveis resposta, podendo ser a penetração, altura e largura dos cordões de solda para a curva #2.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (\text{I.1})$$

Tabela I.1- Coeficientes da equação de regressão para as variáveis resposta: Penetração, Altura e Largura, para a curva #2.

Coeficiente de Regressão	Penetração	Altura	Largura
b ₀	-21,3163	-2,55337	-11,6556
b ₁	-0,0573	0,03421	0,2712
b ₂	0,1979	0,82985	-0,8721
b ₃	0,1168	-0,00116	0,1895
b ₁₂	-0,0001	-0,00152	-0,0012
b ₁₃	0,0000	0,00001	-0,0009
b ₂₃	-0,0008	-0,00334	0,0008
b ₁₁	-0,0004	0,00017	-0,0001
b ₂₂	-0,0012	0,00798	0,0153
b ₃₃	-0,0001	0,00008	-0,0004