

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

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO MAG PULSADO SOBRE A  
PENETRAÇÃO EM JUNTA SOBREPOSTA - 2F

por

Alexandre Cezar Boeira

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

Porto Alegre, Novembro de 2013



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

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO MAG PULSADO SOBRE A  
PENETRAÇÃO EM JUNTA SOBREPOSTA - 2F

por

Alexandre Cezar Boeira

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

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2013.

## AGRADECIMENTOS:

Aos meus pais, pelo apoio incondicional durante esta etapa da minha vida.

Aos amigos feitos durante o meu tempo na UFRGS.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, pela orientação neste trabalho e pela ajuda durante diversos momentos durante o curso.

A todos os integrantes do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) desta Universidade, pela ajuda durante a realização deste trabalho.

BOEIRA, A.C. **Análise dos parâmetros de soldagem no processo MAG pulsado sobre a penetração em junta sobreposta - 2F**. 2013. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

**RESUMO:**

A soldagem pelo processo MAG pulsado está sendo estudada como uma alternativa na soldagem de chapas finas, por exemplo, na manutenção em operação de tubulações de petróleo que apresentem corrosão. Este processo tem a possibilidade de utilização de maior velocidade de soldagem com uma menor energia de soldagem. Para a parte experimental do trabalho foram variados os parâmetros de corrente de pico, tempo de base e velocidade de soldagem, com o objetivo de avaliar sua influência sobre a penetração no passe de raiz em juntas sobrepostas, na posição horizontal (2F). Outro fator levado em consideração na avaliação dos cordões de solda foi a sua qualidade em termos de aparência, ou seja, continuidade e presença de salpicos. Neste trabalho foi utilizado o projeto experimental Box-Behnken para procedimentos de otimização. A partir da análise de variância dos parâmetros estudados, foi verificado o nível de significância de cada um deles e suas interações. Concluiu-se que para aumentar o valor da Penetração é preciso reduzir a relação entre o Tempo de Base ( $T_b$ ) e a Velocidade de Soldagem ( $v$ ). Já para o Índice de Qualidade Visual foi notada a significância dos parâmetros Tempo de Base ( $T_b$ ) e Velocidade de soldagem ( $v$ ) e suas interações com a Corrente de Pico ( $I_p$ ).

**PALAVRAS-CHAVE:** Soldagem MAG Pulsado; Penetração no passe de raiz; Variação de parâmetros.

**BOEIRA, A.C. Analysis of welding parameters in pulsed MAG process on the penetration in overlap joint position - 2F.** 2013. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

**ABSTRACT:**

The pulsed MAG welding process is being studied as an alternative to welding thin sheet metal, for example, in the maintenance during operation of corroded oil pipe. This process has the possibility of using higher speed with a lower welding energy input. For the experimental part of the paper were varied parameters peak current, time base and welding speed, in order to assess their influence on the penetration in root pass in lap joints, horizontal (2F). Another factor taken into account in the assessment of the weld beads was their quality in terms of appearance, ie, continuity and presence of speckles. In this work the Box- Behnken experimental design was used for optimization procedures. From the analysis of variance of the parameters studied, it was found the level of significance of each of them and their interactions. It was concluded that to increase the value of penetration is necessary to reduce the relationship between Base Time (TB) and welding speed ( $v$ ). As for the Visual Quality Index was noted the significance of the parameters Base Time (TB) and welding speed ( $v$ ) and their interactions with Peak Current ( $I_p$ ).

**KEYWORDS:** Pulsed MAG welding; Penetration root pass; Parameter variation.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
3.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA .....	1
3.2 O PROCESSO MAG CONVENCIONAL.....	2
3.3 O PROCESSO MAG PULSADO.....	2
4. EQUIPAMENTO E MATERIAL .....	3
5. PARÂMETROS .....	4
5.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS.....	4
5.2 EFEITO DAS CONDIÇÕES DO PULSO NA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA .....	5
5.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA.....	6
5.4 PARÂMETROS VARIADOS NO EXPERIMENTO.....	7
5.5 PARÂMETROS MANTIDOS CONSTANTES .....	7
5.6 FORMA DO PULSO.....	7
6. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	7
6.1. TRABALHO PRELIMINAR: A DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS INDEPENDENTES E SEUS NÍVEIS .....	8
6.2. SELEÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL, PREVISÃO E VERIFICAÇÃO DA EQUAÇÃO MODELO.....	9
6.3. PROJETO DE EXPERIMENTO BOX-BEHNKEN.....	9
7. METODOLOGIA.....	10
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
8.1.- ANÁLISE ÍNDICE DE QUALIDADE VISUAL.....	11
8.2.- ANÁLISE DA PENETRAÇÃO (P-MM) DO CORDÃO DE SOLDA.....	13
9. CONCLUSÃO .....	14
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE II – ENERGIA DE SOLDAGEM .....	17
APÊNDICE III - MACROGRAFIAS.....	18
APÊNDICE IV – TABELAS PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DAS RESPOSTAS AVALIADAS .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

A manutenção de tubulações para transporte de petróleo exige uma série de procedimentos, sendo um dos mais complexos a inserção de placas de reforço. Devido ao desgaste natural pela utilização e tempo, alguns trechos destas tubulações podem ter sua espessura mínima comprometida e, desta forma não atendendo aos requisitos preestabelecidos na concepção do projeto das linhas de transporte.

Para a união entre as placas de reforço e a tubulação existente desgastada, são utilizados preferencialmente processos de soldagem de baixa penetração no passe de raiz. Os processos utilizados atualmente são o eletrodo revestido ou TIG, com parâmetros selecionados a fim de evitar que o tubo desgastado seja danificado durante o procedimento de união com o reforço.

Estes dois processos são amplamente utilizados, porém têm como grandes desvantagens baixas taxas de deposição, baixas velocidades de soldagem, grande geração de salpicos e alta energia de soldagem.

Uma alternativa que tem sido estudada para evitar estas desvantagens é a utilização do processo MAG, com modo de transferência pulsado, com a variação dos parâmetros deste processo. A variação destes parâmetros e a sua relação com a qualidade do cordão de solda é um dos pontos de interesse deste trabalho.

Desta maneira é possível a obtenção das penetrações necessárias para o passe de raiz na manutenção de tubulações, uma vez que há redução do limite mínimo de espessura possível a ser soldado, com altas velocidades de soldagem e baixa energia de soldagem. Este processo também permite soldagem em todas as posições.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos dos parâmetros do processo MAG Pulsado, mediante a variação da corrente de pico ( $I_p$ ), tempo de base ( $T_b$ ) e velocidade de soldagem ( $v$ ) modo de transferência pulsado, sobre o aspecto visual e a penetração no passe de raiz em cordões de solda, realizado em junta sobreposta, na posição horizontal (2F).

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Modo de transferência metálica é a forma pela qual o metal do arame é transferido para a poça de fusão. Os modos de transferência metálica são [Scotti, 2008 e Brandi, 1992]:

- Curto-Circuito: baixa densidade de corrente de soldagem e baixa tensão do arco elétrico;
- Globular: baixa densidade de corrente de soldagem e tensão do arco elétrico de moderada a alta;
- Goticular: alta densidade de corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico;
- Goticular com alongamento: alta densidade de corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico;
- Goticular rotacional: altíssima densidade de corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico.

Os fatores que determinam o modo de transferência metálica são a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção.

### 3.2 O PROCESSO MAG CONVENCIONAL

O processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) é bastante versátil por poder ser aplicado em todas as posições de solda e pode ser facilmente automatizado e integrado a centros de produção robotizados. Por isso, está cada vez mais sendo utilizado para fabricação em diversos ramos industriais. Neste processo, o arco é formado entre um arame (eletrodo) sem revestimento continuamente alimentado e o metal base. Por se tratar de um eletrodo sem revestimento, a proteção da poça de fusão e do próprio eletrodo contra a ação do ar atmosférico deve ser feita com a utilização de um gás de proteção para evitar a formação de bolhas no cordão de solda e a formação de inclusões indesejadas.

Existem diversas vantagens na utilização dos processos MIG/MAG quando comparados aos processos eletrodo revestido, TIG e arco submerso. Além da possibilidade de se soldar em todas as posições e de automação, podem ser citadas como vantagens:

- Altas velocidades de soldagem;
- Altas taxas de deposição, pela possibilidade de elevada densidade de corrente;
- Possibilidade de aplicação em diversas ligas com diferentes espessuras;
- O processo não forma escoria, pois utiliza eletrodo nu.

### 3.3 O PROCESSO MAG PULSADO

No processo MAG pulsado há a formação de uma gota de metal fundido na ponta do eletrodo em cada pulso. Esta gota é então impulsionada através do arco elétrico para a poça de fusão pelo incremento correto de corrente.

O pulso pode ser considerado como tendo a forma retangular, com aumentos e diminuições sucessivas da corrente elétrica. Desta forma, quando não há a necessidade de altas potências e, portanto há a diminuição do valor da corrente, o sistema é resfriado. Esta característica do MAG pulsado faz com que este processo seja ideal para soldagem em materiais menos espessos, com bom controle sobre as distorções.

Podem ser citadas como principais características do processo MAG pulsado:

- Com baixos valores de corrente média de soldagem (< 100 A) é possível se obter transferência axial-projetado;
- Menor energia de aporte em relação ao convencional com modo aerossol. Essa redução de energia diminui a distorção da junta soldada;
- Redução da zona afetada pelo calor (ZAC);
- Precisão no controle da poça de fusão em todas as posições de soldagem, sendo essa facilidade devido ao desdobramento da corrente de soldagem contínua do convencional em níveis alto e baixo, em função do tempo do processo pulsado;
- Capacidade de realizar cordões de solda em chapas finas (< 6 mm);
- O efeito da variação da corrente de soldagem pode produzir agitação da poça de fusão, minimizando a ocorrência de porosidade;
- Enquanto no processo convencional é praticamente impossível realizar soldas sobrecabeça, com o modo aerossol, no processo pulsado é possível realizar com maior facilidade.
- A transferência do metal se dá de forma semelhante ao modo de spray com valores decorrentes médias baixas ( $I_m < 100$  A).
- Redução na geração de fumos;



#### 4. EQUIPAMENTO E MATERIAL

Para a parte prática deste trabalho foram utilizados equipamentos e instalações do Laboratório de Soldagem e Técnica Conexas (LS&TC) da UFRGS, localizado no Centro de Tecnologia, no Campus do Vale desta universidade.

Foram utilizadas como metal-base barras chatas com dimensões 12,7 mm x 100 mm x 250 mm, sobrepostas em barras chatas de mesmas dimensões. As espessuras destas chapas são semelhantes às aquelas encontradas nas tubulações de transporte de petróleo. Estas barras foram soldadas na posição 2F (horizontal junta de filete), posição que simula a situação de soldagem em campo das chapas de reforço na tubulação.

O comprimento das chapas foi determinado de modo a garantir que se tivesse tempo suficiente para estabilização do arco e sua largura foi considerada suficiente para que se tivesse dissipação do calor sem que este voltasse para o cordão de solda. Desta forma foi possível obter dados representativos para o processo.

Para a soldagem foi utilizada a fonte DIGPlus A7, multiprocessado com processador de 32 bits do LS&TC. Esta fonte é capaz de realizar soldas MAG de correntes contínuas com controle de tensão ou corrente. Para este trabalho foi utilizado o controle de corrente para obtenção do modo pulsado.

Os cordões de solda foram realizados utilizando-se um sistema de soldagem fabricado pela IMC Soldagem. Este sistema consiste das seguintes partes: cabeçote alimentador de arame STA-20-2 que contém a tocha de soldagem, fonte de soldagem multiprocessos Digiplus A7 450, microcontrolador ARM 7 de 32 bits que possibilita o controle e monitoramento dos parâmetros de soldagem e um sistema automatizado CNC Tartilope v.4 com 4 graus de liberdade que possibilita o controle e a repetitividade dos movimentos da tocha de soldagem e dos parâmetros do processo.

O monitoramento dos testes foi feito através de um sistema de aquisição de dados SAP-v40.1 fabricado pela IMC Soldagem [IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, 2005]. Este sistema tem sensores para medir os sinais de correntes, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão de gás de proteção. O sistema possui também software para aquisição e registro destes sinais.

O gás de proteção utilizado foi uma mistura de Argônio com 10% de CO<sub>2</sub> a uma vazão de 15 litros por minuto. O metal de adição utilizado foi o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm.

Para o corte das peças foi utilizada a máquina de corte Cut-off que utiliza um disco de corte com o processo de corte refrigerado. Desta forma se evitou que o calor gerado pelo corte alterasse as características dos cordões de solda. Na preparação das amostras foram feitas sequências de lixamentos utilizando lixas de numeração 100, 180, 220, 320, 400 e 600. As superfícies obtidas com a lixa 600 se mostram de boa qualidade para a realização da macrografia e análise das imagens.

Para o ataque químico das amostras, foi utilizado Nital 10% preparado no próprio LS&TC. As faces das amostras sofreram ataque até que, por análise visual, fosse possível perceber as áreas a serem analisadas de forma bem distinta. Buscou-se principalmente destaque no cordão de solda e na ZAC.

As macrografias foram obtidas através do escaneamento das amostras e manipulação de brilho e contraste para uma melhor visualização. Os dados coletados foram avaliados com a utilização do programa Image J.

## 5. PARÂMETROS

### 5.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS

A seleção correta de parâmetros para o pulso é uma das maiores dificuldades para utilização do processo MAG pulsado. Para cada combinação de metal base, gás de proteção e tipo e diâmetro do eletrodo se têm um conjunto de parâmetros ideal para obtenção de cordões de solda com as características desejadas.

Amin, 1983, estabeleceu três critérios essenciais para selecionar os parâmetros de pulso no processo MIG/MAG pulsado, os quais são:

1.- Taxa de Fusão do Arame: Equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão do mesmo, necessário para manter o comprimento do arco aproximadamente constante.

As combinações das características do pulso podem ser expressas por meio de funções, qualquer que seja o valor de corrente média.

Amin, 1983, representou a corrente em função da velocidade de alimentação do arame, usando distância normal do bico de contato-metal base, comprimento médio do arco, para várias combinações de *material-diâmetro do arame-gás de proteção*, mostradas na Fig.5.1. A característica de fusão tem relação linear, com a equação 5.1 [Amin, 1983]

$$I_m = m_{fa} \cdot Va + k_0 \quad (5.1)$$

Onde:  $m_{fa}$  = Fator de fusão do arame;

$k_0$  = Interseção na ordenada;

$I_m$  = Corrente média;

$Va$  = Velocidade de alimentação do arame.

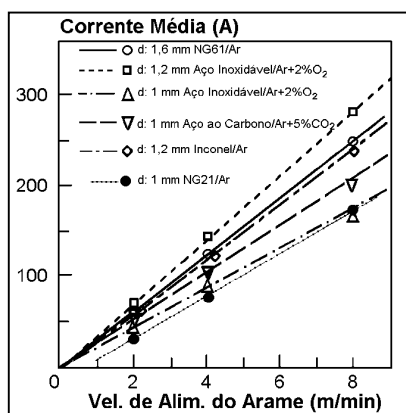


Figura 5.1 – Característica de fusão para várias combinações de *material-diâmetro do arame – gás de proteção*, processo MIG/MAG pulsado [Amin, 1983].

2.- Modo de Transferência de Massa: O modo de transferência axial-projetado deve ser obtido ainda com baixa velocidade de alimentação do arame, a qual causaria transferência globular no processo convencional.

Algumas combinações do critério “taxa de fusão do arame” não produzem o modo de transferência axial-projetado, isto é, quando a amplitude e/ou a duração do pulso forem insuficiente para destacar o volume da gota desejado.

Os valores da corrente e tempo de pico estão limitados pela necessidade de destacar uma gota por período. Para tanto é definido o seguinte “limite de amplitude e duração do pulso” [Amin, 1983]

3.- Estabilidade do Arco: A corrente de base deve exceder o limite inferior, para manter estável o arco, pois para menores valores o arco se extinguiria.

As combinações dos parâmetros de pulso são limitadas pela necessidade da corrente de base, e esta deve exceder o valor mínimo, pois o arco pode ser instável para baixos valores de corrente de base ( $I_b$ ). O limite é expresso pela equação 5.2 [Amin, 1983]

$$I_b \propto C \quad (5.2)$$

Onde:

$I_b$  = Corrente de base;

$C$  = Limite de corrente base para a estabilidade do arco.

A corrente de base deve satisfazer os critérios Taxa de Fusão do Arame, Modo de Transferência de Massa, e também o de Estabilidade do Arco.

## 5.2 EFEITO DAS CONDIÇÕES DO PULSO NA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Os critérios básicos a serem considerados no estudo e análise dos parâmetros no processo MIG/MAG pulsado, são:

- a.- Equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão, o que é necessário para manter o comprimento do arco elétrico aproximadamente constante;
- b.- Que em cada pulso seja destacada uma e somente uma gota da ponta do arame à peça.

Matsuda *et al.*, 1983, estudaram a característica de transferência de massa, no processo MIG/MAG pulsado; arame de aço ao carbono com diâmetro de 1,2 mm; misturas de gases Ar+20%CO<sub>2</sub> e 100% Ar e vazão do gás de proteção de 25 l/min.

Os autores ajustaram a duração da corrente de pico, até destacar uma gota por período de pulso, para assim satisfazer as condições “a” e “b” descritas acima. Na Fig.5.2 (a-d), a seta indica o instante em que a gota é separada do arame, quando é variado o valor do tempo de pico, mantendo constante a corrente de pico e a velocidade de alimentação do arame. Quando o tempo de pico diminui, o tempo necessário para destacar uma gota do arame aumenta, até que a condição (“b”) de uma gota por período de pulso não seja satisfeita ( $T_p < 2,2$  ms), isto é para um mesmo valor de corrente de pico. A Fig.5.2 (e-g) mostra que, se a corrente e tempo de pico são mantidos constantes, modificando a duração da corrente de base ( $T_b$ ) ou frequência do pulso, a condição “b” é satisfeita, e todos os tempos de separação da gota são coincidentes. Concluindo, para manter o comprimento do arco aproximadamente constante, é necessário que exista equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação do arame, o que pode ser obtido controlando-se os valores da corrente ( $I_p$ ) e tempo de pico ( $T_p$ ).

A situação mostrada na Fig.5.2 (e-f), em que a gota é separada em fase com a corrente de base, apresenta as seguintes vantagens: evita a explosão da gota reduzindo assim o nível de salpico, estabiliza o movimento do metal líquido na poça de fusão, e o aporte de energia é menor.

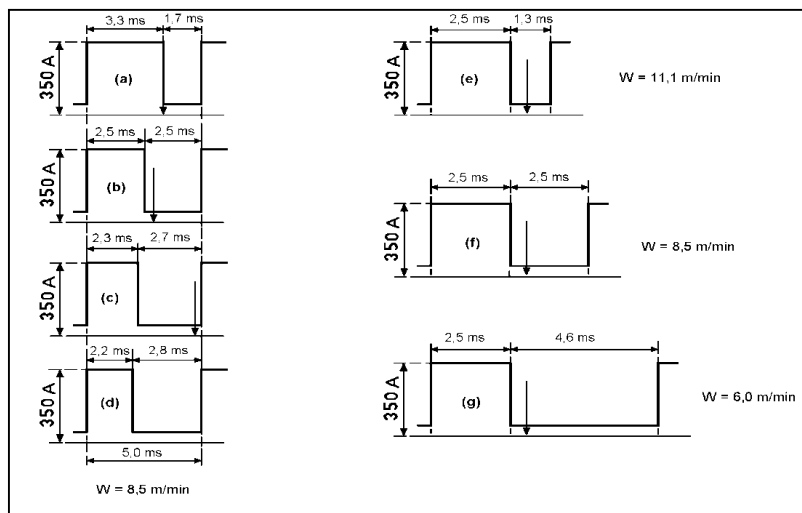


Figura 5.2 – Variação dos parâmetros do pulso para a obtenção de uma gota por período de pulso. A seta indica o instante em que ocorre a separação da gota [Matsuda *et al.*, 1983].

### 5.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a característica de fusão, como a taxa de fusão, diluição, aporte de energia, etc., têm implicações metalúrgicas.

Allum *et al.*, 1985, estudaram a influência da corrente média e da velocidade de soldagem -processo MIG/MAG pulsado- sobre as características de fusão, com os seguintes parâmetros:  $s = 15$  mm;  $I_m/F = 2$  A/Hz;  $(I_p)^2 \cdot T_p = 490$  A<sup>2</sup>.s;  $K_1 = 0,27$  mm.A<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>;  $K_2 = 5,93 \cdot 10^{-5}$  A<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. Os autores apresentaram a seguinte relação entre esses parâmetros:

$$W = K_1 \cdot I_m + K_2 \cdot s \cdot D \cdot F \quad (5.3)$$

Taxa de Fusão – Allum *et al.*, 1985, determinaram, experimentalmente, a relação entre a velocidade de alimentação do arame em função da corrente média e da energia de soldagem, como mostra a Figura 5.3. Na mesma se observa, que para intensidade de corrente média maior do que 150 A, há diferença nos valores obtidos e a reta representada pela equação (5.3). Esse desvio, pode ser explicado pela não consideração do efeito Joule, devido à corrente de base  $I_b$ , na equação (5.3).

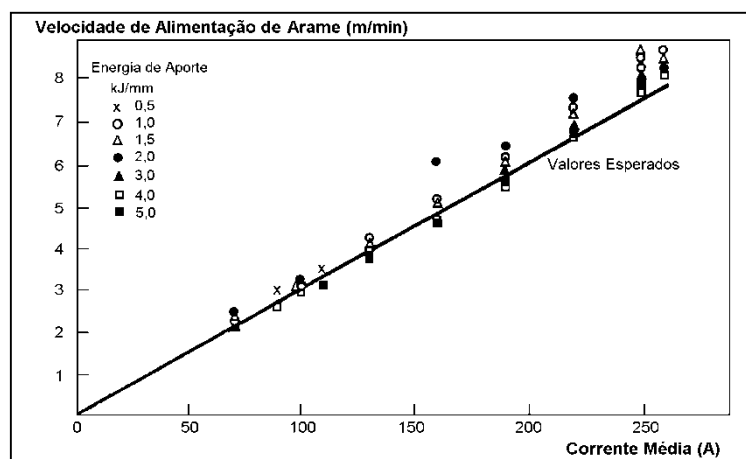


Figura 5.3 – Relação entre a velocidade de alimentação do arame e a energia de soldagem, para diferentes valores de corrente média de soldagem [Allum *et al.*, 1985].

#### 5.4 PARÂMETROS VARIADOS NO EXPERIMENTO

Tempo de base - Tempo no qual a corrente de base é empregada. É a duração da corrente de base. O tempo de base está relacionado à frequência dos pulsos de corrente do processo. O tempo de base foi variado entre 2,5 ms e 7,5 ms.

Corrente de pico - O nível mais alto de corrente na onda do pulso e no qual a transferência por spray é alcançada. É o fator controlador da fusão e da transferência da gota. A tendência é usar o tempo de pico o menor possível, para assim aumentar a frequência de trabalho e obter uma taxa de deposição maior.

Velocidade de soldagem - É a velocidade na qual a tocha se desloca realizando o cordão de solda. Este parâmetro influencia na taxa de deposição e na geometria do cordão. A velocidade de soldagem é inversamente proporcional à energia de soldagem.

Taxa de alimentação do arame - Velocidade em que o arame é expelido pelo bico de contato. Este parâmetro foi ajustado para que se obtenha a condição de uma gota por pulso (UGPP). Para este trabalho foram utilizados valores de 4 m/min., 6 m/min. e 8 m/min.

#### 5.5 PARÂMETROS MANTIDOS CONSTANTES

Ângulo de trabalho - É o ângulo que o eletrodo forma com a superfície do metal de base em um plano perpendicular ao eixo da solda e ao eletrodo. O ângulo de trabalho selecionado para este experimento foi de 50°.

Ângulo de deslocamento da tocha - Ângulo que o eletrodo forma com uma reta de referência, perpendicular ao eixo da solda e ao eletrodo. Neste trabalho foi utilizado ângulo de deslocamento da tocha de +10°.

Distância bico de contato-peça - É o parâmetro que mede a distância entre o bico de contato da tocha e a chapa. Para este trabalho foi utilizada uma distância de 15 mm em todos os ensaios.

Tempo de pico - Tempo no qual a corrente de pico é empregada. É a duração da corrente de pico. O tempo de pico será relacionado à frequência dos pulsos de corrente do processo. O valor estabelecido neste trabalho foi de 2,5 ms.

Vazão do gás de proteção - Volume de gás de proteção expelido pelo bocal. Para este trabalho foi utilizada vazão de 15 litros por minuto.

Corrente de base - É a corrente mínima requerida para manutenção do arco elétrico. É o nível mais baixo de corrente elétrica na onda do pulso e não é suficiente para haver transferência metálica. Neste trabalho foi utilizada corrente de base de 30 A.

#### 5.6 FORMA DO PULSO

As variáveis que definem a forma do pulso de corrente são: corrente de pico ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pico ( $T_p$ ) e tempo de base ( $T_b$ ). A corrente de base usualmente tem ondulações devido às características da fonte de potência e o pulso de corrente é aproximadamente senoidal [Palani e Murugan, 2006].

Quando são considerados intervalos de tempo relativamente grandes, quando comparados ao tempo de pico e tempo de base, pode-se considerar o pulso de corrente com a forma retangular.

### 6. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é, atualmente, o mais popular conjunto de técnicas para otimização, devido a sua completa teoria, eficiência e simplicidade [Box; Drapper, 1987; Liu *et al*, 2013; Wu *et al*, 2012; Raffin *et al*, 2011]. A MSR consiste de um grupo de métodos matemáticos e estatísticos, que podem ser utilizados para definir as relações entre

a resposta e as variáveis independentes. A MSR define o efeito de variáveis independentes, principal e/ou interações, sobre a variável dependente ou resposta do processo. Além de avaliar os efeitos das variáveis independentes, mediante a aplicação desta metodologia experimental é possível gerar um modelo matemático. A perspectiva gráfica do modelo matemático conduz ao nome de metodologia de superfície de resposta [Myers, Montgomery, 2002].

A abordagem de um projeto fatorial também pode ser usada para otimização do processo de soldagem e para o desenvolvimento de modelos empíricos vinculados à resposta para as variáveis do processo [Gunaraj, Murugan, 1999]. De acordo com esses autores, a relação entre a resposta e a entrada é dada pela Equação. 6.1:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (6.1)$$

onde  $y$  é a resposta,  $f$  é a função desconhecida de resposta,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  denotam as variáveis independentes, também chamados variáveis naturais,  $k$  é o número de variáveis independentes e, finalmente,  $\varepsilon$  é o erro estatístico que representa a outras fontes de variabilidade não contabilizada pela  $f$ . Estas fontes incluem os efeitos, tais como o erro de medição, variação de temperatura ambiente. Supõe-se geralmente que  $\varepsilon$  tem uma distribuição normal e independentemente distribuída com média zero e variância positiva.

É possível separar o estudo de otimização usando MSR em três fases. A primeira fase é o trabalho preliminar em que são determinados os parâmetros independentes em que seus níveis são definidos. A segunda etapa é a seleção do projeto experimental, a previsão e a verificação da equação do modelo. A última fase é a obtenção do gráfico da superfície de resposta e o gráfico de contorno de resposta em função dos parâmetros independentes e determinação de pontos ótimos.

## 6.1. TRABALHO PRELIMINAR: A DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS INDEPENDENTES E SEUS NÍVEIS

Os processos de soldagem ao arco elétrico são afetados por inúmeros parâmetros. Uma vez que não é possível identificar os efeitos de todos os parâmetros, é necessário selecionar os parâmetros que têm efeitos importantes. Experiências de rastreamento são úteis para identificar os parâmetros independentes. Um Projeto Fatorial pode ser usado para esta finalidade. Após a identificação dos parâmetros importantes, a direção em que as melhorias se encontram, é determinada e os níveis dos parâmetros são identificados. A determinação desses níveis é importante porque o sucesso do processo de otimização está diretamente relacionado a esses níveis.

As unidades das variáveis independentes diferem uma da outra. Mesmo se alguns dos parâmetros possuem as mesmas unidades, nem todos estes parâmetros serão ensaiados durante o mesmo intervalo. Uma vez que possuem diferentes parâmetros de unidades e/ou intervalos no domínio experimental, análise de regressão não deverá ser executada. Em vez disso, deve-se primeiro normalizar os parâmetros antes de realizar uma análise de regressão. Cada uma das variáveis codificadas é forçada a variar de  $-1$  a  $+1$ , de modo que tudo o que afeta a resposta de forma mais uniforme, e assim as unidades dos parâmetros são irrelevantes. A Equação 6.2 é normalmente usada para a codificação [Myers, Montgomery, 2002]

$$X = \frac{x - [x_{\max} + x_{\min}]/2}{[x_{\max} - x_{\min}]/2} \quad (6.2)$$

em que  $x$  é a variável naturais,  $X$  é a variável codificada, e  $x_{\max}$  e  $x_{\min}$  são os valores máximos e mínimos da variável natural.

## 6.2. SELEÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL, PREVISÃO E VERIFICAÇÃO DA EQUAÇÃO MODELO

O projeto de experimento Box-Behnken foi selecionado neste trabalho. Uma vez escolhido o projeto de experimento, a equação do modelo é definida e coeficientes da equação do modelo são previstos. Na maioria dos problemas em Superfície de Resposta, a forma do relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecida. Assim, o primeiro passo é encontrar uma aproximação para o verdadeiro relacionamento entre a variável resposta ( $y$ ) e as variáveis independentes (fatores). Geralmente utiliza-se de uma regressão polinomial de baixo grau em alguma região das variáveis independentes. Exemplo: o modelo de regressão polinomial de primeiro grau é dado por [Box, Behneken, 1960]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (6.3)$$

O modelo de segunda ordem é dado por [Box, Behneken, 1960]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6.4)$$

onde  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes de regressão da interseção, linear, os coeficientes quadráticos e de interação, respectivamente, e  $x_i$  e  $x_j$  são as variáveis independentes.

Os coeficientes dos modelos podem ser estimados mais eficientemente se for usado um projeto experimental adequado para a coleta de dados.

## 6.3. PROJETO DE EXPERIMENTO BOX-BEHNKEN

Projetos de experimentos Box-Behnken constituem uma alternativa aos projetos de experimentos compostos centrais [Box, Behnken 1960; Ferreira *et. al.*, 2007; Myers, Montgomery, 2002; Box, Draper, 1987]. Eles são uma classe de projetos de segunda ordem, rotacionalidade ou quase rotacional, com base em três níveis fatoriais incompletos. Na Figura 6.1 se mostra o projeto de experimento de Box-Behnken para três fatores, que correspondem aos valores codificados listados na Tabela 6.1. É possível perceber que esse tipo de projeto de experimento é composto por três partes de quatro corridas cada onde cada parte consta de dois fatores que estão dispostos em um projeto fatorial completo de dois níveis, enquanto o nível do terceiro fator é fixado em zero (ponto médio). Os pontos estão situados na superfície de uma esfera centrada na origem do sistema de coordenadas e tangente ao ponto central de cada lado do cubo.

O projeto Box- Behnken três fatores requer apenas 12 corridas, mais réplicas no ponto central. Em geral, o número de pontos experimentais é dado por  $2k(k - 1) + C_0$ . Além disso, cada fator é estudado em apenas três níveis, um recurso importante em algumas situações experimentais.

Tabela 6.1 - Níveis de fator codificados para um projeto Box-Behnken para um sistema de três variáveis ( $x_1, x_2, x_3$ ).

$x_1$	$x_2$	$x_3$
-1	-1	0
1	-1	0
-1	1	0
1	1	0
-1	0	-1
1	0	-1
-1	0	1
1	0	1
0	-1	-1
0	1	-1
0	-1	1
0	1	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

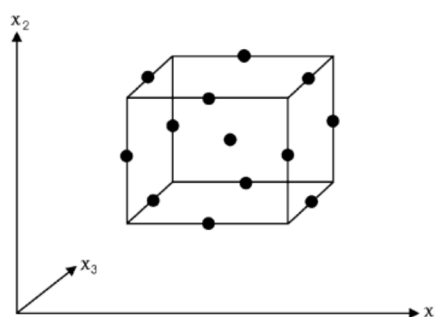


Figura. 6.1. Pontos que representam as corridas experimentais de um projeto de Box-Behnken três fatores.

O delineamento fatorial de Box-Behnken é um planejamento experimental utilizado para procedimento de otimização e o modelo consiste na repetição do ponto central, para medir a variabilidade experimental, mais um conjunto de pontos fatoriais definidos no ponto central da região de interesse [Box; Behnken 1960].

Nesse contexto o objetivo do presente trabalho foi a otimização da penetração mediante a análise de três parâmetros do processo de soldagem MAG Pulsado, utilizando o projeto experimental Box- Behnken.

## 7.METODOLOGIA

No item 5 deste trabalho foram apresentados os parâmetros que influenciam o processo de soldagem. A seleção dos parâmetros para o pulso de corrente foi feita de modo a alcançar as características desejadas de aparência do cordão de solda, ausência de salpicos e penetração.

A velocidade de alimentação do arame foi determinada para obter a condição de destacamento de uma gota de metal de solda em cada pulso. O diâmetro dessa gota deve ser equivalente ao diâmetro do eletrodo.

Depois de feita a soldagem sobre as chapas, foram realizados os cortes das amostras em locais apropriados, descartando 50 mm no começo e final do cordão de solda. Após o corte, as amostras foram lixadas para se obter qualidade de superfície suficiente para a macrografia. Os corpos de prova sofreram ataque químico com Nital 10%, escaneados e as imagens geradas foram avaliadas com a utilização do programa ImageJ.



## 8.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as macrografias e o resultado da avaliação visual segundo o critério definido do Índice de Qualidade Visual – IQV e da medição da penetração dos cordões de solda – as respostas – foi realizado o tratamento dos dados através das técnicas estatísticas. A Tabela 8.2 mostra o Projeto de Experimento Box-Behnken com os três parâmetros de processo controláveis (em unidades não-codificadas – vide Tabela 8.2) e os valores obtidos para as duas características dos cordões de solda de acordo com as avaliações visual e as medições da penetração realizadas após os experimentos.

### 8.1.- ANÁLISE ÍNDICE DE QUALIDADE VISUAL

Quanto à produção de salpicos e aspecto visual do cordão de solda, pode-se observar na Tabela I.1 do Apêndice I e os índices da avaliação dos 15 cordões de solda que, em geral, o processo MAG Pulsado utilizando como gás de proteção uma mistura de Ar+10% CO<sub>2</sub> resultou em cordões de solda com salpicos e de baixa qualidade visual, porém para determinadas combinações de parâmetros avaliados é possível obter cordões de solda de bom aspecto visual e sem salpicos, conforme Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Critérios para a classificação do Índice de Qualidade Visual.




IQV	Descrição	Exemplo de cordão de solda realizado
1	Cordões de solda sem continuidade.	
3	Cordões de solda contínuos com elevada quantidade de salpico.	
5	Cordões de solda contínuos e com baixa quantidade de salpico.	

Tabela 8.2. Projeto de experimento Box-Behnken com os resultados obtidos.

Projeto de Experimento Box-Behnken				Respostas	
Experimento	Ip (A)	Tb (ms)	v (mm/s)	IQV	P (mm)
1	270	2,5	6,0	3	0,81
2	340	2,5	6,0	5	0,72
3	270	7,5	6,0	3	0
4	340	7,5	6,0	1	0
5	270	5,0	4,0	3	0
6	340	5,0	4,0	4	0,56
7	270	5,0	8,0	3	0,35
8	340	5,0	8,0	1	0,37
9	305	2,5	4,0	5	1,77
10	305	7,5	4,0	2	0
11	305	2,5	8,0	4	0,64
12	305	7,5	8,0	1	0
13	305	5,0	6,0	4	0,40
14	305	5,0	6,0	4	0,31
15	305	5,0	6,0	4	0,49

Foi realizada Análise de Variância para o Índice de Qualidade Visual (IQV) do cordão de solda utilizando-se unidades codificadas. Esta análise (vide Tabela IV.1, Apêndice IV) mostrou que os parâmetros  $T_b$ ,  $v$  e, ainda, as interações  $I_p * T_b$  e  $I_p * v$ , também os termos quadráticos  $I_p^2$  e  $v^2$  têm influência significativa no Índice de Qualidade Visual ( $P < 0,05$ ).

Os coeficientes de regressão para cada variável e suas interações foram estimados utilizando-se unidades **não codificadas**, o que resultou na equação de resposta para Índice de Qualidade Visual (IQV) do cordão de solda, segundo a Equação 8.1.

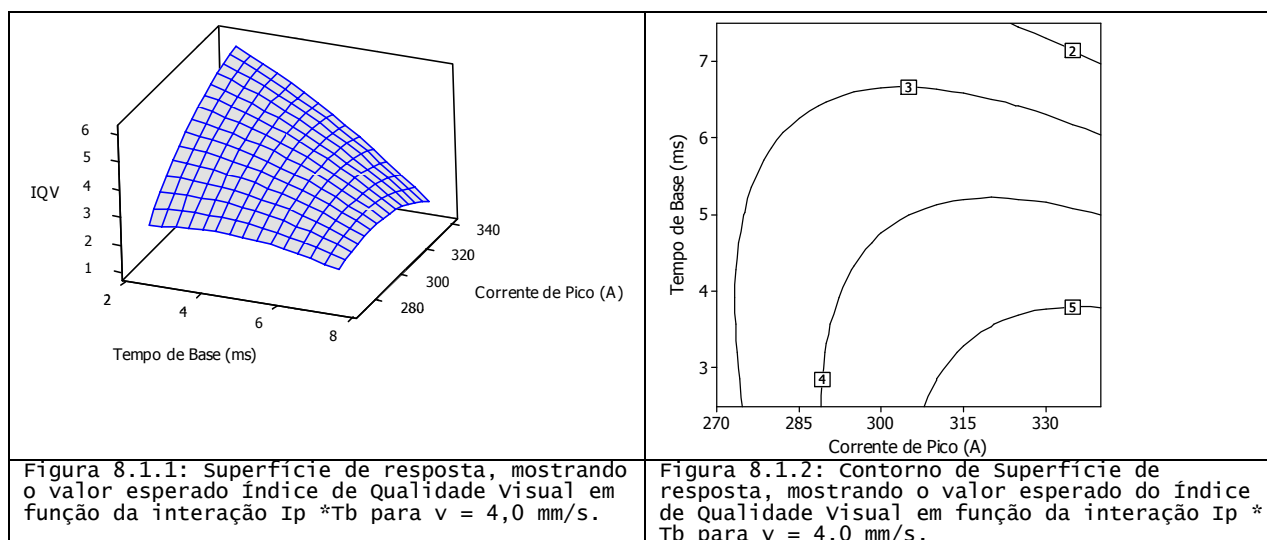
$$\widehat{IQV} = [-82,1582 + 0,42908 \cdot I_p + 3,58571 \cdot T_b + 4,83036 \cdot v - 5,1020 \cdot 10^{-4} \cdot I_p^2 - 0,0600 \cdot T_b^2 - 0,15625 \cdot v^2 - 0,0114286 \cdot I_p \cdot T_b - 0,010714 \cdot I_p \cdot v + 8,017 \cdot 10^{-17} \cdot T_b \cdot v] \quad (8.1)$$

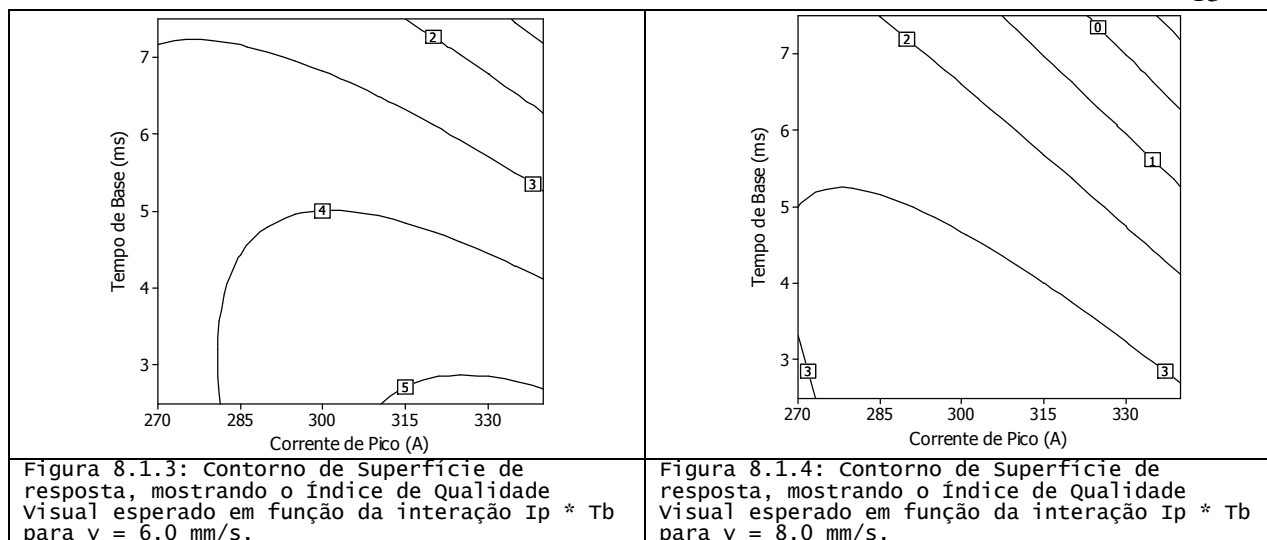
A ANOVA indicou que o termo linear, quadrático e interação são significativos na equação de resposta de P ( $P < 0,05$ ). O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado. O valor de  $R^2$  é obtido pela comparação entre os valores obtidos a partir dos dados experimentais e os valores previstos pelo modelo. A análise estatística indicou que o modelo matemático é adequado, resultando um  $R^2 = 0,9709$ , conforme Tabela IV.1.

A Figura 8.1.1 mostra o gráfico da superfície de resposta do valor esperado do Índice de Qualidade Visual em função da interação da Corrente de Pico e do Tempo de Base para uma Velocidade de Soldagem 4,0 mm/s. Na Figura 8.1.2 é mostrado o gráfico de contorno obtido a partir desta superfície de resposta (Figura 8.1.1), fixando-se o valor da velocidade de soldagem no nível **inferior** ( $v = 4,0$  mm/s). A análise da Figura 8.1.2 revela que é possível obter  $IQV \geq 5$  para valores de tempo de base inferiores a 4,0 ms e corrente de pico maior que 310 A.

A Figura 8.1.3 demonstra que a região que se obtêm  $IQV \geq 5$  é menor quando comparado à Figura 8.1.2, para um aumento de velocidade de soldagem (de 4,0 a 6,0 ms).

Na Figura 8.4 se observa o Contorno de superfície de resposta, mostrando o Índice de Qualidade Visual esperado em função da interação  $I_p * T_b$  para  $v = 8,0$  mm/s; para nenhuma combinação de valores de  $T_b$  e  $I_p$  foi possível obter  $IQV = 5$ .





## 8.2.- ANÁLISE DA PENETRAÇÃO (P-MM) DO CORDÃO DE SOLDA

Na Tabela IV.2 do Apêndice IV é apresentada a Análise de Variância para a Penetração (P) do cordão de solda utilizando-se unidades codificadas. Esta análise mostrou que o parâmetro  $T_b$  e, ainda, a interação  $T_b * v$  têm influência significativa na Penetração ( $P < 0,10$ ).

Os coeficientes de regressão para cada variável e suas interações foram estimados utilizando-se unidades não codificadas, o que resultou na equação de resposta para a Penetração (P) do cordão de solda, segundo a Equação 8.2.

$$\hat{P} = [-10,458 + 0,06873 \cdot I_p - 0,82643 \cdot T_b + 0,03509 \cdot v - 1,2245 \cdot 10^{-4} \cdot I_p^2 + 0,0212 \cdot T_b^2 + 0,0175 \cdot v^2 + 2,571 \cdot 10^4 \cdot I_p \cdot T_b - 1,928 \cdot 10^3 \cdot I_p \cdot v + 0,0565 \cdot T_b \cdot v] mm \quad (8.2)$$

A análise estatística também indicou que o modelo matemático é adequado, resultando um  $R^2 = 0,8759$ .

Através da ANOVA também foi possível identificar o efeito da interação entre os parâmetros controláveis sobre as Respostas. No caso da Penetração (P) do cordão de solda, foi determinado que a interação  $T_b * v$  é significativa.

A Figura 8.2.1 mostra o gráfico da superfície de resposta do valor esperado da Penetração obtido para a interação do Tempo de Base e da Velocidade de Soldagem para uma Corrente de Pico 305 A, e a Figura 8.2.2 mostra o gráfico de contorno obtido a partir desta superfície de resposta, fixando-se o valor da Corrente de Pico no nível inferior ( $I_p = 270$  A). A análise da Figura 8.2.2 revela que a penetração do cordão de solda aumenta com a diminuição do tempo de base  $T_b$  e da velocidade de soldagem, atingindo seu maior valor quando estes parâmetros estão ajustados nos seus níveis inferiores ( $T_b = 2,5$  ms e  $v = 4,0$  mm/s). Pode ser observada esta afirmação nas Figuras 8.2.3 e 8.2.4. Esse comportamento pode ser explicado mediante a **energia média de soldagem**, um aumento da **energia média de soldagem** acontece quando se reduz os valores do tempo de base e da velocidade de soldagem. A redução do tempo de base se traduz em um aumento da frequência do pulso, mantendo os outros parâmetros constantes, o que implica em um aumento da potência média do arco elétrico (ou pode ser avaliado como um aumento da corrente média de soldagem). Sabe-se que a energia média de soldagem é a relação entre a potência média e velocidade de soldagem [Gonzalez,1997]. Portanto, para uma redução da velocidade de soldagem e mantendo constante a potência média ocorrerá um aumento na energia média de soldagem que causará um aumento na penetração do cordão de solda.

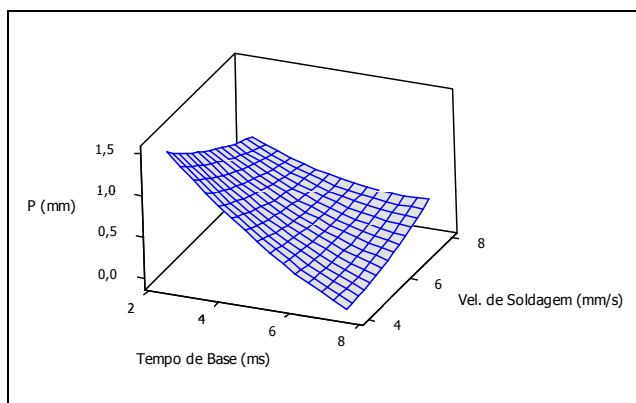


Figura 8.2.1: Superfície de resposta, mostrando o valor esperado da Penetração em função da interação do  $T_b * v$  para  $I_p=305$  A.

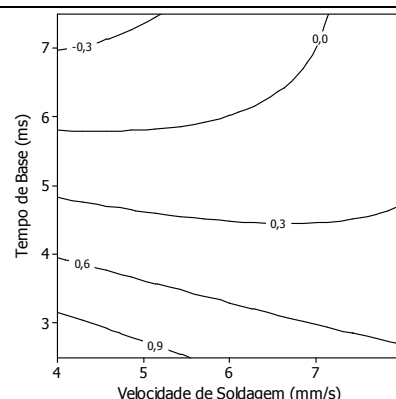


Figura 8.2.2: Contorno de Superfície de resposta, mostrando o valor esperado da Penetração em função interação do  $T_b * v$  para  $I_p=270$  A.

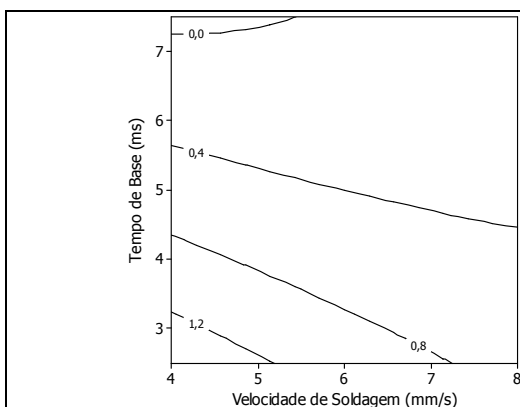


Figura 8.2.3: Contorno de Superfície de resposta, mostrando o valor esperado da Penetração em função em função da interação do  $T_b * v$  para  $I_p=305$  A.

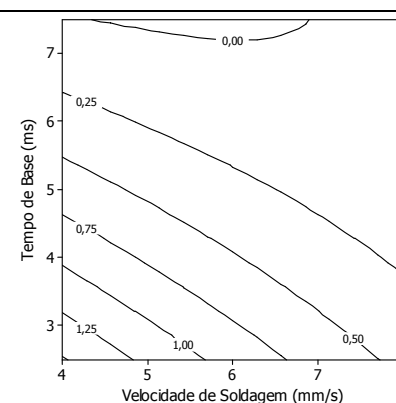


Figura 8.2.4: Contorno de Superfície de resposta, mostrando o valor esperado da Penetração em função em função da interação do  $T_b * v$  para  $I_p=340$  A.

## 9. CONCLUSÃO

Através das análises de variância (ANOVA) para as respostas avaliadas neste trabalho, vistas nas Tabelas do Apêndice IV, percebem-se quais são os parâmetros significativos e quais são as interações entre estes parâmetros são significativas tanto para a Penetração quanto para o Índice de Qualidade Visual.

Para a Penetração (P-mm) o parâmetro tempo de base ( $T_b$ ) e a interação Tempo de Base e Velocidade de Soldagem ( $T_b * v$ ) mostraram significância. De fato, quando são analisadas as Figuras 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3 e 8.2.4, percebe-se que para os três valores variados para Corrente de Pico ( $I_p$ ) o comportamento da Penetração é semelhante, aumentando seu valor para menores relações  $T_b * v$ .

Já para o Índice de Qualidade Visual ( $I_{QV}$ ) os parâmetros Tempo de Base ( $T_b$ ) e Velocidade de Soldagem ( $v$ ) se mostraram significativos, assim como as interações quadráticas da Corrente de Pico ( $I_p$ ) e Velocidade de Soldagem ( $v$ ). As interações  $I_p * T_b$  e  $I_p * v$  também são significativas sobre o  $I_{QV}$ . Analisando as Figuras 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3 e 8.1.4 nota-se um comportamento mais complexo e que para obter valores de  $I_{QV} \geq 5$  é necessário ajustar adequadamente os três parâmetros estudados.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allum, C.J. & Quintino, L., "**Control of Fusion Characteristics in Pulsed Current MIG Welding - Part 1**", Metal Construction, Apr., 17(4), p.242R-245R, 1985.

Amin, M., "**Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding**", Metal Construction, May, 15 (5), p.272-278, 1983.

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

Box, G.E.P. & Behnken, D.W., "**Some new three level designs for the study of quantitative variables**", Technometrics 2 (4) 455–475, 1960.

Box, G. E. P., & Draper, N. R. "**Empirical Model Building and Response Surfaces.**" John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.

Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., et al. "**Box–Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods.**" Analytica Chimica Acta, 597(2), 179–186, 2007.

Gonzalez, A.R., "**Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada**", Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Gunaraj V., Murugan N. "**Application of response surface methodologies for predicting weld base quality in submerged arc welding of pipes.**" J Mater Process Technol; 88:266–75, 1999.

IMC Soldagem, Manual da fonte de soldagem Digiplus A7 450, 2009, [www.imc-soldagem.com.br](http://www.imc-soldagem.com.br).

IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, Manual do sistema de aquisição de dados SAP v4.01, 2005, [www.imc-soldagem.com.br](http://www.imc-soldagem.com.br), [www.labsolda.ufsc.br](http://www.labsolda.ufsc.br).

Matsuda, F.; Ushio, M. & Tanaka, Y., "**Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding**", Transactions of JWRI, 12 (1), p.9-17, 1983.

Montgomery, D. C. "**Design and analysis of experiments (6th ed.)**". USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

Myers, R. H., & Montgomery, D. C. "**Response surface methodology**", 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

Palani, P.K.; Murugan, N. "**Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding**", Journal of Materials Processing Technology 172 1-10, 2006.

















Scotti, A.; Ponomarev, V. "**Soldagem MIG/MAG**", 1. ed., Artliber, 2008.

Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H. "Soldagem: Processos e Metalurgia" 1. ed., Edgard Blücher, 1992.

## APÊNDICE I

Baseado em uma inspeção visual, as amostras foram avaliadas segundo um Índice de Qualidade Visual (IQV). Cada amostra foi qualificada em valores de um a cinco, crescente para a aparência e continuidade do cordão de solda e ausência de salpicos, conforme tabela abaixo:

Tabela I.1 – Índice de Qualidade Visual e parâmetros para cada amostra.

Amostra	Ip (A)	Tb (ms)	Va (m/min)	v (mm/s)		IQV
1	270	2,5	8	6		3
2	340	2,5	8	6		5
3	270	7,5	4	6		3
4	340	7,5	4	6		1
5	270	5	6	4		3
6	340	5	6	4		4
7	270	5	6	8		3
8	340	5	6	8		1
9	305	2,5	8	4		5
10	305	7,5	4	4		2
11	305	2,5	8	8		4
12	305	7,5	4	8		1
13	305	5	6	6		4
14	305	5	6	6		4
15	305	5	6	6		4

## APÊNDICE II – ENERGIA DE SOLDAGEM

Energia de soldagem é definida como a quantidade de energia introduzida no metal base por unidade de comprimento do cordão de solda. Baixos valores para energia significam uma menor modificação nas características físicas e propriedades mecânicas do metal-base.

A energia de soldagem é calculada pela equação II.1 [Gonzalez, 1997].

$$E = \frac{Pm}{v} (J/mm)$$

II.1

Onde  $Pm$  é a potência média e  $v$  é a velocidade de soldagem.

Tabela II.1 – Energia de soldagem.

Amostra	v (mm/s)	Pm (W)	Em (J/mm)
1	6	4277	712,8
2	6	5942	990,3
3	6	2382	397
4	6	3602	600,3
5	4	2973	743,2
6	4	4021	1005,2
7	8	3009	376,1
8	8	4195	524,3
9	4	5290	1322,5
10	4	3202	800,5
11	8	4829	603,6
12	8	3030	378,7
13	6	3350	558,3
14	6	3154	525,6
15	6	3700	616,6

## APÊNDICE III - MACROGRAFIAS

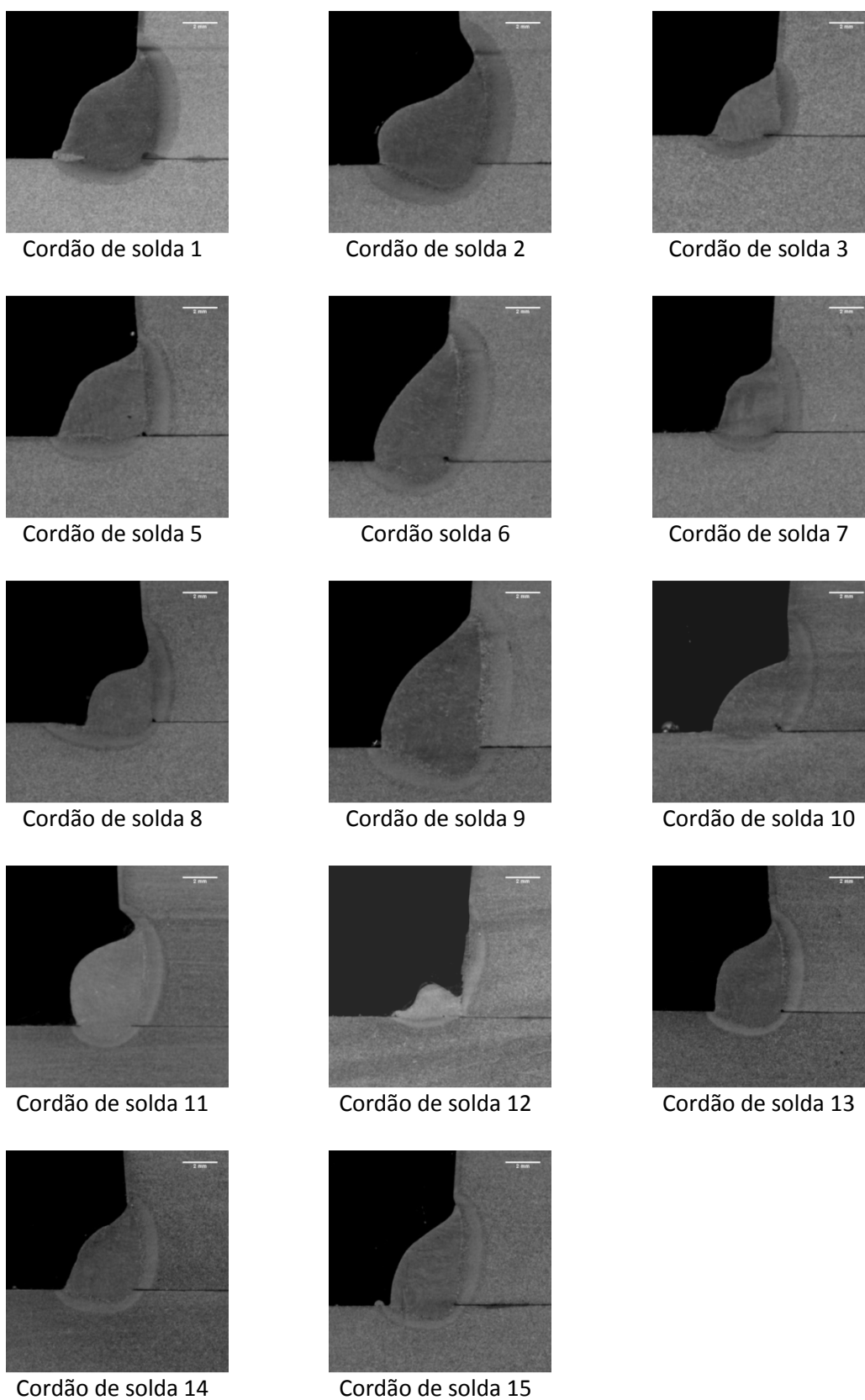


Figura III.1 – Macrografias dos cordões de solda na ordem experimental padrão.



## APÊNDICE IV – TABELAS PARA A ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA) DAS RESPOSTAS AVALIADAS

Tabela IV.1: Análise de variância (ANOVA) dos fatores *Ip*; *Tb* e *v* sobre o Índice de Qualidade Visual (IQV).

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para o IQV (unidades codificadas)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Significância
Regression	9	24,9833	24,9833	2,7759	18,51	0,003	Não Significativo
<b>Linear</b>	<b>3</b>	<b>15,7500</b>	<b>15,7500</b>	<b>5,2500</b>	<b>35,00</b>	<b>0,001</b>	<b>Significativo</b>
Ip (A)	1	0,1250	0,1250	0,1250	0,83	0,403	Não Significativo
<b>Tb (ms)</b>	<b>1</b>	<b>12,5000</b>	<b>12,5000</b>	<b>12,5000</b>	<b>83,33</b>	<b>0,000</b>	<b>Significativo</b>
<b>v (mm/s)</b>	<b>1</b>	<b>3,1250</b>	<b>3,1250</b>	<b>3,1250</b>	<b>20,83</b>	<b>0,006</b>	<b>Significativo</b>
<b>Square</b>	<b>3</b>	<b>2,9833</b>	<b>2,9833</b>	<b>0,9944</b>	<b>6,63</b>	<b>0,034</b>	<b>Significativo</b>
Ip (A)*Ip (A)	1	1,1440	1,4423	1,4423	9,62	0,027	Significativo
Tb (ms)*Tb (ms)	1	0,3970	0,5192	0,5192	3,46	0,122	Não Significativo
<b>v (mm/s)*v (mm/s)</b>	<b>1</b>	<b>1,4423</b>	<b>1,4423</b>	<b>1,4423</b>	<b>9,62</b>	<b>0,027</b>	<b>Significativo</b>
<b>Interaction</b>	<b>3</b>	<b>6,2500</b>	<b>6,2500</b>	<b>2,0833</b>	<b>13,89</b>	<b>0,007</b>	<b>Significativo</b>
Ip (A)*Tb (ms)	1	4,0000	4,0000	4,0000	26,67	0,004	Significativo
Ip (A)*v (mm/s)	1	2,2500	2,2500	2,2500	15,00	0,012	Significativo
Tb (ms)*v (mm/s)	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	1,000	Não Significativo
Residual Error	5	0,7500	0,7500	0,1500			
Lack-of-Fit	3	0,7500	0,7500	0,2500	*	*	
Pure Error	2	0,0000	0,0000	0,0000			
Total	14	25,7333					

$R^2 = 0,9709$

Tabela IV.2: Análise de variância (ANOVA) dos fatores *Ip*; *Tb* e *v* sobre Penetração (P-mm).

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para P (mm) (unidades codificadas)							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Significância
Regression	9	2,66131	2,66131	0,29570	3,92	0,073	
<b>Linear</b>	<b>3</b>	<b>2,08807</b>	<b>2,08807</b>	<b>0,69602</b>	<b>9,23</b>	<b>0,018</b>	<b>Significativo</b>
Ip (A)	1	0,03001	0,03001	0,03001	0,40	0,556	Não Significativo
<b>Tb (ms)</b>	<b>1</b>	<b>1,94045</b>	<b>1,94045</b>	<b>1,94045</b>	<b>25,73</b>	<b>0,004</b>	<b>Significativo</b>
v (mm/s)	1	0,11761	0,11761	0,11761	1,56	0,267	Não Significativo
Square	3	0,17909	0,17909	0,05970	0,79	0,549	Não Significativo
Ip (A)*Ip (A)	1	0,10098	0,08308	0,08308	1,10	0,342	Não Significativo
Tb (ms)*Tb (ms)	1	0,06002	0,06482	0,06482	0,86	0,396	Não Significativo
v (mm/s)*v (mm/s)	1	0,01809	0,01809	0,01809	0,24	0,645	Não Significativo
Interaction	3	0,39415	0,39415	0,13138	1,74	0,274	Não Significativo
Ip (A)*Tb (ms)	1	0,00203	0,00203	0,00203	0,03	0,876	Não Significativo
Ip (A)*v (mm/s)	1	0,07290	0,07290	0,07290	0,97	0,371	Não Significativo
<b>Tb (ms)*v (mm/s)</b>	<b>1</b>	<b>0,31923</b>	<b>0,31923</b>	<b>0,31923</b>	<b>4,23</b>	<b>0,095</b>	<b>Significativo</b>
Residual Error	5	0,37712	0,37712	0,07543			
<b>Lack-of-Fit</b>	<b>3</b>	<b>0,36093</b>	<b>0,36093</b>	<b>0,12031</b>	<b>14,85</b>	<b>0,064</b>	
Pure Error	2	0,01620	0,01620	0,00810			
Total	14	3,03844					

$R^2 = 0,8759$