

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO SOBRE A GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA OBTIDO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO  
TUBULAR

por

Alexandre Roberto Haas

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, dezembro de 2010



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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO SOBRE A GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA OBTIDO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO  
TUBULAR

por

Alexandre Roberto Haas

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. Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Prof. Ivan Guerra Machado

Prof. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2010.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é fruto da colaboração de diversas pessoas, às quais eu gostaria de agradecer.

Aos meus familiares e amigos que de alguma forma me ajudaram.

A minha mãe, Eloá, pelo apoio, paciência e compreensão.

A minha namorada, Caroline, pelo apoio, compreensão e amor.

Em especial a minha vó, Gertha, que infelizmente não está mais presente, pelo apoio, carinho e compreensão.

HAAS, A.R. **Análise da influência dos parâmetros de operação sobre a geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem por eletrodo tubular**. 2010. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## RESUMO

Este trabalho tem por finalidade a análise dos parâmetros de soldagem do processo com eletrodo tubular com proteção gasosa (FCAW-G – *Flux Cored Arc Welding Gas-Shielded*) sobre as características geométricas do cordão de solda (largura do cordão, altura do cordão e penetração). As variáveis do processo analisadas foram tensão, velocidade de alimentação do arame, ângulo de inclinação da tocha e velocidade de soldagem. Como características geométricas foram avaliadas a penetração do cordão de solda, a largura e altura do reforço do cordão de solda. Para tal finalidade utilizou-se técnicas estatísticas como ferramentas de análise sendo empregado o planejamento fatorial fracionário para a seleção dos parâmetros mais influentes. Dentre os parâmetros de soldagem estudados, em relação à altura do reforço do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciaram na soldagem foram, respectivamente, tensão de vazio e velocidade de alimentação do arame, em relação à largura do reforço do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciaram na soldagem foram, respectivamente, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e tensão de vazio e em relação à penetração do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciaram na soldagem foram, respectivamente, tensão de vazio, ângulo de deslocamento da tocha e velocidade de alimentação do arame.

**PALAVRAS-CHAVE:** Processo FCAW-G, eletrodo tubular, parâmetros de soldagem, macroestrutura.

HAAS, A.R. **Analysis of the influence of welding parameters on the geometry of the weld bead obtained by the process of welding tubular electrode.** 2010. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

## **ABSTRACT**

This work aims to analyse the influence of welding parameters on the geometric characteristics (bead width, bead height and penetration) of a weld bead applied in a Flux Cored Arc Welding (FCAW-G – Flux Cored Arc Welding Gas-Shielded). The process parameters investigated were welding voltage, electrode feed rate, travel (drag) angle, and welding speed. As geometric characteristics, it were evaluated the penetration of the weld bead, the width and the height of the reinforcement of the weld bead. For this purpose, statistical techniques were used to design the experiments runs and process the analysis. A Fractional Factorial was designed to select the most significant parameters influencing the process. Among the welding parameters studied, in relation to the reinforcement height, the parameters that most influenced, the welding were respectively, voltage and electrode feed rate, on the width of the reinforcement of the weld, the parameters that most influenced were, respectively, welding speed, wire feed speed, electrode feed rate and voltage, and relation to the penetration of the weld, the parameters that most influence the welding, were respectively, voltage, travel (drag) angle and electrode feed rate.

**KEYWORDS:** FCAW-G Process, tubular electrode, welding parameters, macrostructure.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODOS TUBULARES.....	2
3.2. VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	3
4. METODOLOGIA.....	4
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	7
5.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	9
5.2. ANÁLISE DA ALTURA DO REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA (Hcs).....	9
5.3. ANÁLISE DA LARGURA DO REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA (Lcs).....	10
5.4. ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA (Pcs).....	11
6. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICE.....	17

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as indústrias têm interesse na aplicação de processos de soldagem que combinem versatilidade, produtividade, qualidade aliados a custos competitivos.

No ambiente industrial, o processo de soldagem com eletrodo tubular tem ampla aplicação, decorrente da alta produtividade e qualidade dos cordões de solda conferidos por este processo, além da facilidade de automatização. A soldagem automatizada possibilita que vários ajustes sejam pré-fixados, tais como: parâmetros de soldagem (velocidade de soldagem, tensão de arco, velocidade de alimentação de arame, etc.), local exato para início e fim de solda e manutenção da mesma sequência de soldagem que influencia na distribuição de carga térmica da peça evitando empenamentos [Ribeiro e Costa, 2001].

A predeterminação de parâmetros de controle do processo pode ser benéfica à previsão, com razoável aproximação, da geometria mais adequada ao cordão de solda, conferindo reprodutibilidade ao processo produtivo, para uma aplicação específica. Contudo, em soldagem a arco elétrico geralmente os experimentos são conduzidos variando-se os parâmetros de processo, um de cada vez, até que as características da geometria do cordão de solda desejadas sejam obtidas.

Na prática industrial, devido a diversos fatores como custo de material, produtividade da mão-de-obra e capacidade de utilização das máquinas, ou a necessidade de cumprir prazos de entrega, nem sempre a realização desses experimentos são viáveis. Consequentemente, os processos de soldagem raramente operam em suas condições ótimas [Marinho et al, 2001].

Neste contexto, ferramentas estatísticas vêm sendo utilizadas na tentativa de elucidar certas particularidades deste tipo de processo de fabricação de modo a propiciar sua melhor utilização, em função da manipulação das variáveis envolvidas. Dentre estas ferramentas, o Planejamento de Experimentos tem se destacado por permitir a redução substancial de tempo e custos financeiros, fatores decisivos em época de acirrada competição [Marinho et al, 2001; Ribeiro e Costa, 2001].

Assim sendo, o processo de soldagem com eletrodo tubular no âmbito industrial tem potencial, porém, ainda com poucos dados sobre a influência dos parâmetros de ajuste do processo sobre a geometria do cordão de solda. A análise mais detalhada dos parâmetros do processo, mediante a utilização de um *software* adequado, permite buscar melhores condições de ajuste, otimizando assim suas respostas, do ponto de vista geométrico.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por finalidade o estudo dos parâmetros de soldagem, pelo processo de soldagem com eletrodo tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*), sobre a geometria do cordão de solda depositado, em chapas de aço. As variáveis do processo analisadas foram: tensão do arco elétrico, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e ângulo de inclinação da tocha ou ângulo de deslocamento da tocha. Como objetivos específicos, este trabalho teve o intuito de:

- Estudar o efeito dos parâmetros de controle do processo;
- Mediante a análise de variância, determinar a significância dos parâmetros de controle sobre a geometria do cordão de solda;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODOS TUBULARES

Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Tubular ou FCAW (*Flux Cored Arc welding*) é um processo de soldagem onde um arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico - cujo interior é preenchido por fluxo fusível - continuamente alimentado desde a bobina na qual está enrolado [Machado, 1996]. A soldagem com eletrodo tubular se assemelha ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) mais comumente conhecido como MIG/MAG, (*Metal Inert Gas/ Metal Active Gas*) no que se refere a equipamentos e princípios de funcionamento, diferindo-se deste pelo fato de possuir um arame com formato tubular, possuindo em seu interior um fluxo. Este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a alta taxa de deposição característica da soldagem GMAW. Por outro lado, no processo de soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo [Araújo, 2004].

A proteção do arco elétrico neste processo é feita pelo fluxo interno do eletrodo podendo ser, ou não, complementada por um gás auxiliar de proteção, conforme pode ser visto na Figura 3.1. De acordo com a existência ou não deste gás auxiliar de proteção, ele se classifica como “*gas-shielded*” (FCAW-G) – com proteção gasosa, apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de profunda penetração, ou “*self-shielded*” (FCAW-S) – sem a proteção gasosa auxiliar, onde os ingredientes do fluxo vaporizam e deslocam com o ar para os componentes da escória que cobrem a poça para protegê-la durante a soldagem [AWS, 2004].

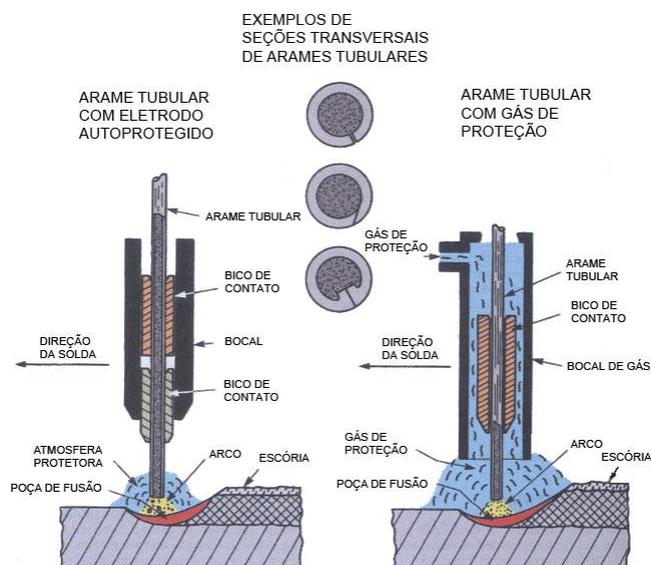


Figura 3.1 – Representação esquemática do processo Eletrodo Tubular auto protegido e com gás de proteção [adaptado AWS, 2004].

Machado (1996), Braga (1997) e Mota (1998) afirmam que, comparado com a soldagem com Eletrodo Revestido e MIG/MAG, o processo de soldagem com eletrodo tubular apresenta uma maior taxa de deposição e a possibilidade de redução nos chanfros, com a consequente vantagem econômica da redução no volume da massa de metal de adição necessário para o preenchimento total do chanfro.

Uma desvantagem do processo de soldagem com eletrodo tubular é o elevado custo relativo do metal de adição, que ocorre devido às dificuldades operacionais em seu

processo de fabricação e, também, devido à pequena demanda de mercado, para o produto. A elevada geração de fumos durante a operação de soldagem somada às necessidades de custos adicionais para a remoção de escória são fatores que ainda inibem o uso deste tipo de eletrodo tubular em relação aos arames maciços usados nos processos de soldagem MIG/MAG e Arco Submerso [Machado, 1996; Norrish, 1992].

O fluxo interno do eletrodo tubular é composto de materiais inorgânicos ou metálicos, que possuem diversas funções, tais como, melhoria das características do arco elétrico, da transferência do metal de solda, proteção da poça de fusão e também em alguns casos, quando necessário, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória. A escória formada por este processo, além de proteger a solda durante a solidificação, afeta diretamente as propriedades mecânicas, do resultado final.

### 3.2. VARIÁVEIS DO PROCESSO

Do mesmo modo que em outros processos de soldagem ao arco elétrico, o eletrodo tubular (FCAW) apresenta diferentes modos de transferência de metal, conforme os parâmetros são alterados. É necessário determinar o efeito das variáveis de procedimento sobre o cordão de solda produzido. Muitas variáveis afetam a geometria do cordão de solda, e neste trabalho, foram utilizadas tensão de vazio, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e ângulo de deslocamento da tocha.

A tensão do arco elétrico é um parâmetro importante, pois afeta tanto o modo de transferência metálica como a geometria do cordão de solda. A tensão é proporcional ao comprimento do arco elétrico, para um comprimento excessivamente longo a atmosfera pode contaminar a poça de fusão, afetar a geometria do cordão de solda e a quantidade de salpicos produzidos. Quando a tensão do arco diminui, a penetração aumenta, e quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras.

Existe uma faixa de tensão do arco elétrico (e corrente de soldagem) aplicável para cada diâmetro de eletrodo tubular, que fornece uma determinada taxa de deposição. Na ocasião da escolha do eletrodo tubular, é necessário fazer uma avaliação da faixa de corrente que será aplicada, dependendo da espessura do material a ser soldado.

A velocidade de soldagem influencia na energia de soldagem, ou seja, na quantidade de calor cedido à peça por unidade de comprimento do cordão de solda, e por sua vez na geometria do cordão de solda. Uma velocidade de soldagem muito baixa gera grandes aportes térmicos, podendo o material sofrer mudanças não desejadas em suas microestruturas. Quando se trata de soldagem com eletrodo tubular com fluxo não metálico, baixas velocidades de soldagem dificultam o controle da escória que pode passar à frente da poça de fusão e causar inclusões de escória [Araújo, 2004].

Em fontes de energia com característica de tensão constante (“plana”), variando a velocidade de alimentação do eletrodo a corrente de soldagem pode ser ajustada, ou seja, para um aumento na velocidade de alimentação do arame, a corrente (de soldagem) fornecida pela fonte será maior. Para valores elevados de velocidades de alimentação do arame, obtêm-se altos valores correntes de soldagem, o que pode causar mordeduras. Baixas velocidades de alimentação do arame podem gerar uma solda com falta de penetração, falta de fusão e formato irregular do cordão. Variações inesperadas ou controladas de forma inadequada da velocidade de alimentação do arame são causas frequentes de instabilidade do processo de soldagem.

A inclinação da tocha, ou ângulo de deslocamento da tocha, é o ângulo entre ao eixo do eletrodo e a linha normal ao eixo do cordão de solda, Figura 3.2, interfere no controle da escória e no perfil do depósito. O ângulo recomendado para juntas em ângulo e de topo é de 20° a 30°, na utilização na técnica “puxando” (ângulo positivo), ou seja, o eletrodo

apontando para o cordão já formado. Nesta técnica, a força do arco faz com que a escória não passe à frente da poça de fusão, reduzindo assim o risco da escória ficar presa. Neste caso temos maior penetração, menos salpicos, cordão mais estreito e mais convexo e um arco mais estável. Quando se utiliza a técnica “empurrando” (ângulo negativo), temos presentes diversas características tais como: menor penetração, mais salpicos, cordão mais plano e mais largo, menor visibilidade para o soldador. Esta técnica é empregada quando grandes valores de penetração não são requeridos. Quando se utiliza ângulo nulo ( $0^\circ$ ) têm-se características intermediárias aos dois casos citados anteriormente.

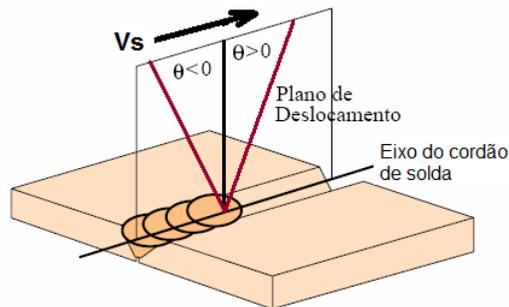


Figura 3.2 – Ângulo de deslocamento da tocha: ( $\theta < 0$ ) Negativo ou empurrando a tocha; ( $\theta > 0$ ) Positivo ou puxando a tocha [adaptado AWS, 2004].

#### 4. METODOLOGIA

Para a realização do experimento dos cordões de solda, utilizou-se uma fonte de soldagem Migtronic, modelo BDH 550, com comando digital. A tocha de soldagem foi acoplada a um dispositivo universal com ajuste de velocidade, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização dos cordões de solda nas condições especificadas. A medida do tempo do arco aberto foi feita utilizando um cronômetro. Utilizou-se, em todos os testes, um sistema de aquisição de dados para tensão do arco elétrico e corrente de soldagem com sensor *Hall*, mediante o *software* Labview 8.5, em que se obteve a corrente de soldagem e a tensão do arco elétrico em função do tempo.

Todos os testes foram realizados através de simples deposição sobre chapas (*bead-on-plate*) de aço AISI 1020 com dimensões de 6,3 mm ( $\frac{1}{4}$  pol.), 150 mm x 250 mm.

Como metal de adição foi utilizado o eletrodo AWS E71T-1 com diâmetro de 1,2 mm, fabricado pela Lincoln. Suas propriedades mecânicas e composição química, segundo fabricante, estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química e propriedades mecânicas do eletrodo AWS E71T-1 [catálogo *Lincoln Electric*].

AWS E71T-1				
DADOS TÉCNICOS				
Composição Química (%)				
Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Silício
0,05	1,45	0,01	0,02	0,40
Propriedades Mecânicas				
Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Impacto Charpy (J) -29°C	
600	560	23	95	

Vários parâmetros influenciam no processo de soldagem, de certa forma, tensão do arco elétrico, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da tocha, ou ângulo de deslocamento da tocha, e velocidade de alimentação do arame tem conhecida influência em maior ou menor grau nos processos de soldagem. Como o objetivo foi fazer uma análise mais ampla, foram utilizados todos os quatro parâmetros citados anteriormente. Onde os níveis analisados nesta fase foram cuidadosamente escolhidos, através da literatura disponível.

Como ponto exploratório definiu-se utilizar como resposta a geometria do cordão de solda, expressa em termos de Pcs: penetração, Lcs: largura, Hcs: altura do reforço do cordão de solda, Figura 4.1.

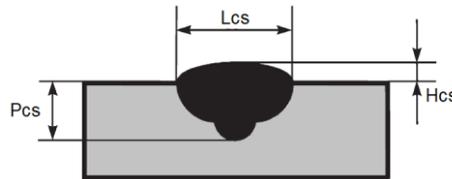


Figura 4.1 – Parâmetros da geometria do cordão de solda.

O processo, ou sistema, pode ser representado pelo modelo mostrado na Figura 4.2. Pode-se visualizar, nessa Figura, os parâmetros de controle (ou fatores de entrada), o processo FCAW-G e a saída com um ou mais parâmetros-resposta observadas. Alguns dos parâmetros do processo são controláveis, sendo outros não controláveis [Montgomery, 2001].

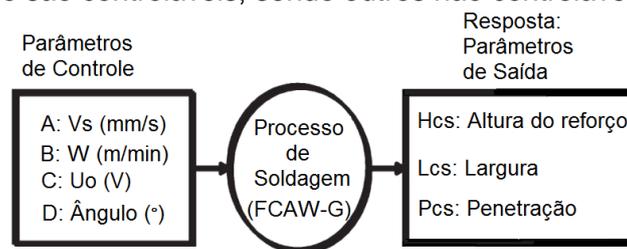


Figura 4.2 – Parâmetros de controle e Resposta: Hcs, Lcs e Pcs do cordão de solda.

Para efeito de determinação dos níveis dos parâmetros de controle e de análise, considerou-se que uma soldagem adequada é aquela avaliada quanto à qualidade visual, considerando como critérios de avaliação o aspecto, o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão de solda. Portanto, determinaram-se os parâmetros que seriam mantidos constantes e os valores máximo e mínimo dos parâmetros variáveis que serão analisados. As variáveis do processo mantidas constantes foram:

- Fonte de energia: curva característica tensão constante;
- Tocha conectada à CCEP (CC+);
- Ângulo de deslocamento da tocha: Empurrando;
- Eletrodo AWS E71T-1;
- Diâmetro do eletrodo tubular: 1,2 mm;
- Gás de proteção: CO<sub>2</sub>;
- Vazão de gás: 14 l/min;
- Distância do bico de contato peça: 20 mm;
- Material de base: Aço AISI 1020.

Foram utilizadas chapas de 6,3 mm (¼ pol.), 150 mm x 250 mm.

Utilizou-se, ainda, o planejamento fatorial em dois níveis, onde cada fator assume um valor máximo e um mínimo e quatro pontos centrais (“n<sub>c</sub>”). Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se (“n<sub>F</sub> = ”) 2<sup>k</sup> mais “n<sub>c</sub>” experimentos, onde k é o número de fatores analisados. Os valores adotados para os níveis máximos, mínimos e centrais encontram-se na Tabela 4.2. A sequência de realização dos ensaios foi gerada pelo *software*

Minitab em uma ordem aleatória padrão. Neste caso, têm-se  $k = 4 \rightarrow 2^4$  experimentos, ou seja,  $n_F = 16$  ensaios mais  $n_c = 4$  pontos centrais, o que totaliza em 20 ensaios.

Tabela 4.2 – Níveis máximos, mínimos e central dos fatores utilizados.

Parâmetro	Mínimo	Central	Máximo
A: [Vs] Velocidade de soldagem (mm/s)	4,5	5,0	5,5
B: [W] Velocidade de alimentação (m/min)	7,0	8,0	9,0
C: [Uo] Tensão de vazio (V)	30	32	34
D: [Ângulo] Ângulo de inclinação da tocha (°)	5	10	15

Técnicas de planejamento de experimentos vêm sendo utilizadas como uma ferramenta para verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo a melhorias destes, como a redução na variabilidade e conformidade próximas do resultado desejado, além de diminuição no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais. A utilização de planejamento de experimentos que estejam embasados em fundamentos estatísticos proporciona aos pesquisadores a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos ou ensaios [Neto et al. 2007].

O planejamento experimental, baseado nos fundamentos estatísticos, é sem dúvida alguma uma ferramenta poderosa para se chegar às condições otimizadas de um processo, desenvolvimento da formulação de produtos dentro das especificações desejadas ou simplesmente para avaliar efeitos ou impactos que os fatores têm nas respostas desejadas, como referências podem-se citar trabalhos [Mostafa et al. 2006, Kim et al. 2003 e Nagesh et al. 2007].

O planejamento fatorial de um experimento é um procedimento em que são variados sistematicamente os fatores controláveis de entrada, de modo que possam ser avaliadas as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações [Montgomery, 2001]. A Tabela 5.1 mostra planejamento fatorial  $2^4 + 4$  pontos centrais dos ensaios gerados pelo *software*. O uso potencial de planejamento fatorial de dois níveis é a hipótese de linearidade dos efeitos dos fatores. Naturalmente, não é necessária uma linearidade perfeita, e o sistema  $2^k$  funcionará muito bem mesmo quando a hipótese de linearidade se verificar apenas aproximadamente. De fato, observa-se que quando se acrescenta um termo de interação a um modelo de efeitos principais, introduz-se curvatura na superfície de resposta. Como o planejamento  $2^k$  suportará um modelo de efeitos principais mais interações, alguma proteção contra a curvatura já é inerente ao planejamento [Montgomery, 2004].

Há um método para acrescentar um ponto a um planejamento fatorial  $2^k$  que fornecerá alguma proteção contra efeitos quadráticos puros (no sentido de que se pode testar se os termos quadráticos são necessários). Além disso, se esse ponto for explicado, então, pode-se obter uma estimativa independente do erro experimental. O método consiste na adição de pontos centrais no planejamento  $2^k$ . Esses pontos centrais consistem em  $n_c$  replicações rodadas no ponto central ( $i = 0, 1, \dots, k$ ). Uma razão importante para se adicionar rodadas replicadas no centro do planejamento é que os pontos centrais não causam impacto nas estimativas usuais dos efeitos em um planejamento  $2^k$ . Admite-se que os  $k$  fatores sejam quantitativos; de outro modo, não haveria um nível central ou no “meio” para o fator. [Montgomery, 2004].

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A parte experimental deste trabalho, em sua totalidade, foi realizada no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Com o auxílio do sensor *Hall*, foram adquiridos os valores da tensão do arco elétrico e da corrente de soldagem, onde se utilizou a média para selecionar os respectivos valores, e assim, calculou-se o valor da energia de soldagem aplicando a equação 5.1.

$$E = \eta \frac{U \cdot I}{V_s} \quad (5.1)$$

Onde:  $\eta$  - eficiência térmica

U - tensão do arco elétrico (V)

I - corrente de soldagem (A)

$V_s$  - velocidade linear de soldagem (mm/s)

O rendimento do arco varia de acordo com o processo de soldagem, sendo  $\eta = 0,80$  para o processo Eletrodo Tubular [Quites, 2002], assim obteve-se os valores da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Planejamento fatorial do experimento e valores de tensão do arco elétrico, corrente, velocidade e energia de soldagem.

Planejamento Fatorial $2^4 + 4$ pontos centrais					Parâmetros medidos do processo		
Padrão (Aleatório)	$V_s$ (mm/s)	W (m/min)	$U_o$ (V)	Ângulo (°)	U (V)	I (A)	E (J/mm)
1	5	8	32	10	27	170	734,4
2	4,5	9	30	5	25	180	800,0
3	5,5	9	30	15	25	180	654,5
4	4,5	9	34	15	28	190	945,8
5	5,5	7	30	15	25	150	545,5
6	5,5	7	34	5	28	160	651,6
7	5,5	9	34	15	28	180	733,1
8	4,5	7	34	15	29	160	824,9
9	5,5	7	34	15	28	160	651,6
10	4,5	7	30	5	26	150	693,3
11	5,5	9	30	5	26	180	680,7
12	5,5	9	34	5	28	190	773,8
13	5,5	7	30	5	25	150	545,5
14	4,5	7	30	15	25	160	711,1
15	4,5	9	34	5	28	170	846,2
16	5	8	32	10	27	180	777,6
17	4,5	7	34	5	28	160	796,4
18	4,5	9	30	15	26	180	832,0
19	5	8	32	10	27	170	734,4
20	5	8	32	10	27	170	734,4

Como os valores das correntes de soldagem utilizadas foram inferiores a 200 A, as transferências metálicas no processo foram do tipo curto-circuito, caracterizada pelo constante processo de extinção e reabertura do arco elétrico e com o inconveniente de gerar uma grande quantidade de salpicos, [Quites, 2002], como pode ser observado na Figura 5.1. Neste modo de transferência, uma grande gota é formada na extremidade do eletrodo e é transferida no momento em que esta toca o metal-base.



Figura 5.1 – Salpicos gerados no cordão de solda.

Realizados os ensaios, os corpos de prova foram seccionados transversalmente ao cordão de solda, polidos e atacados quimicamente com nital 3%. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e aumento de 20X avaliou-se a altura do reforço (Hcs), a largura do reforço (Lcs) e a penetração do cordão de solda (Pcs). Os resultados obtidos na aplicação do projeto fatorial, penetração, altura e largura do reforço do cordão de solda, estão contidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Planejamento fatorial do experimento e resultados obtidos.

Planejamento Fatorial $2^4 + 4$ pontos centrais					Respostas		
Padrão (Aleatório)	Vs (mm/s)	W (m/min)	Uo (V)	Ângulo (°)	Hcs (mm)	Lcs (mm)	Pcs (mm)
1	5	8	32	10	2,813	11,576	0,972
2	4,5	9	30	5	3,517	11,677	1,074
3	5,5	9	30	15	3,369	10,416	0,897
4	4,5	9	34	15	2,862	12,434	0,930
5	5,5	7	30	15	2,618	9,163	0,834
6	5,5	7	34	5	2,412	10,587	1,121
7	5,5	9	34	15	2,758	12,453	1,010
8	4,5	7	34	15	2,589	12,125	0,980
9	5,5	7	34	15	2,543	10,566	0,916
10	4,5	7	30	5	3,064	10,209	0,837
11	5,5	9	30	5	3,192	10,034	1,068
12	5,5	9	34	5	2,600	10,947	1,023
13	5,5	7	30	5	2,897	9,557	0,735
14	4,5	7	30	15	3,065	10,660	0,666
15	4,5	9	34	5	2,619	12,917	1,311
16	5	8	32	10	3,019	11,933	1,014
17	4,5	7	34	5	2,645	11,343	1,135
18	4,5	9	30	15	2,902	12,990	0,824
19	5	8	32	10	2,911	11,454	1,222
20	5	8	32	10	2,846	10,887	1,174

## 5.1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores principais empregados e as interações de dois fatores sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o nível  $\alpha$  obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiança estatística de 95%.

Através do *software* Minitab, os dados da Tabela 5.2 foram processados, para então, realizar a análise de qual a influência dos fatores nas respostas. Para essa análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa ( $\alpha$ ) menores que 5%, admitiu-se que a variável de controle em questão, é significativa na resposta. Vale ressaltar que quanto menor for o valor de alfa, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

As Tabelas A1, A2 e A3 do apêndice, mostram, respectivamente, a análise da variância dos quatro fatores principais e interações de dois fatores (parâmetros de controle) sobre: a altura do reforço do cordão de solda (Hcs), a largura do cordão de solda (Lcs), a penetração do cordão de solda (Pcs).

## 5.2. ANÁLISE DA ALTURA DO REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA (Hcs)

Nas Figuras 5.2a e 5.2b, mostram os gráficos de pareto e da probabilidade normal, respectivamente, onde pode-se observar que os fatores tensão de vazio [Uo (V)] e velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] têm efeito significativo sobre a altura do cordão de solda [Hcs (mm)], enquanto que os demais parâmetros e interações não têm efeito significativo sobre a altura do cordão de solda.

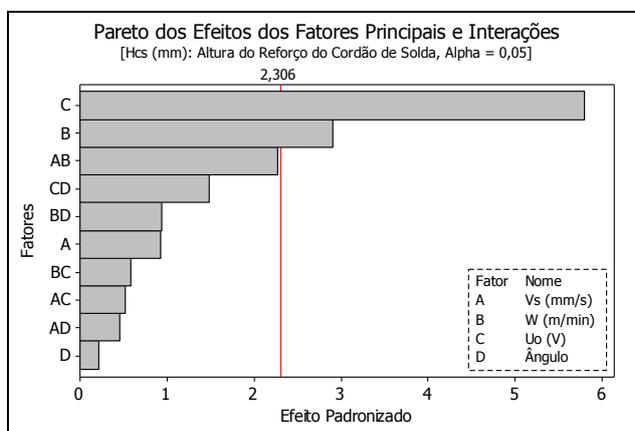


Figura 5.2a – Gráfico de pareto dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

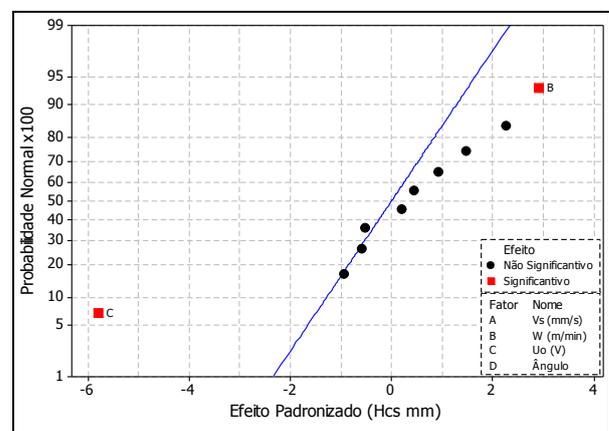


Figura 5.2b – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

Na Figura 5.3 observa-se o efeito dos fatores principais sobre a altura do reforço do cordão de solda. Um aumento na tensão de vazio [Uo (V)] causa uma diminuição na altura do reforço do cordão de solda, enquanto que, um aumento na velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] causa um aumento na altura do reforço do cordão de solda. O aumento da velocidade de alimentação do arame representa um aumento na taxa de deposição, sempre que o sistema esteja em equilíbrio, o volume de metal por unidade de tempo que entra na tocha é fundido e depositado sobre a chapa. Portanto, ocorrerá um aumento na altura do reforço do cordão de solda, mantendo os outros fatores constantes.

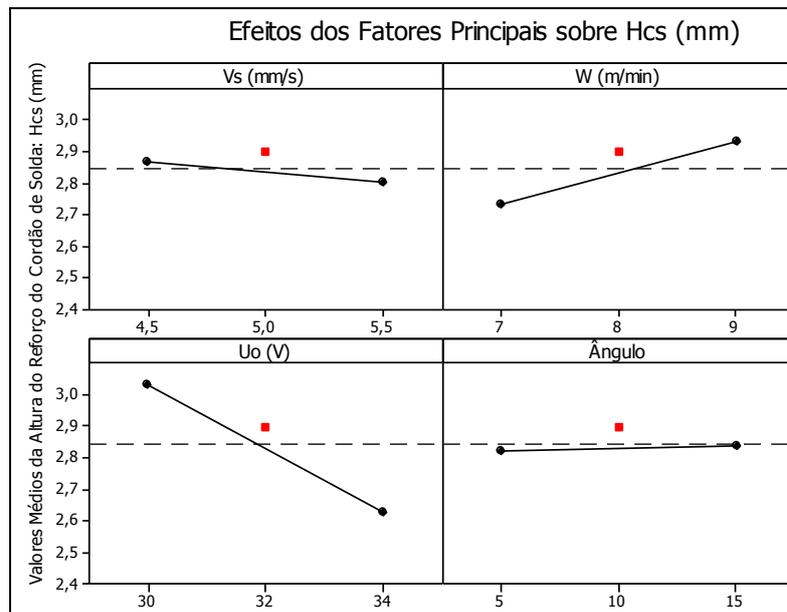


Figura 5.3 – Efeitos dos parâmetros principais sobre a altura do reforço do cordão de solda.

### 5.3. ANÁLISE DA LARGURA DO REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA (Lcs)

As Figuras 5.4a e 5.4b mostram os gráficos de pareto e da probabilidade normal, respectivamente, obtidos da análise de variância para identificar os efeitos dos fatores principais e as interações de dois fatores. Nessas Figuras, observa-se que os parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)], velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] e tensão de vazio [U<sub>o</sub> (V)] têm efeito significativo sobre a largura do cordão de solda [Lcs (mm)], enquanto que o parâmetro ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo (°)] e interações de dois fatores não tem efeito significativo sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 5.5 mostra o comportamento dos fatores principais na resposta largura do cordão de solda. Observa-se também que, para um aumento na velocidade de soldagem de 4,5 mm/s para 5,5 mm/s, causa uma diminuição na largura do cordão de solda. Para um aumento na velocidade de alimentação do arame e na tensão de vazio, o efeito sobre a largura é o mesmo, causa um aumento na largura do cordão de solda.

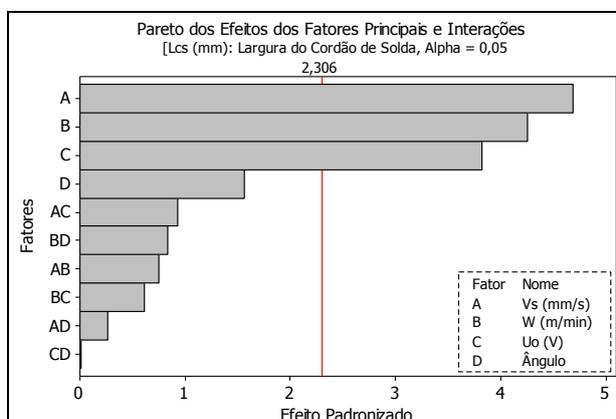


Figura 5.4a – Gráfico de pareto dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

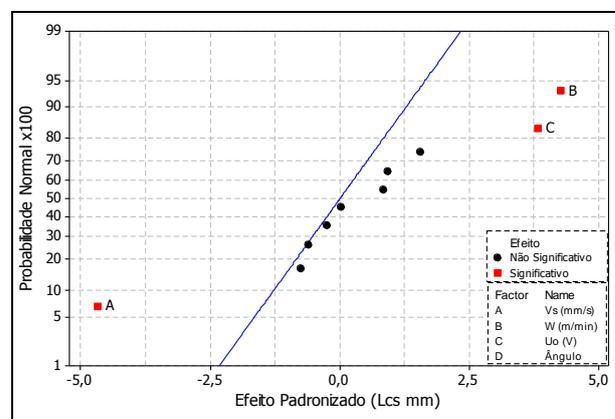


Figura 5.4b – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

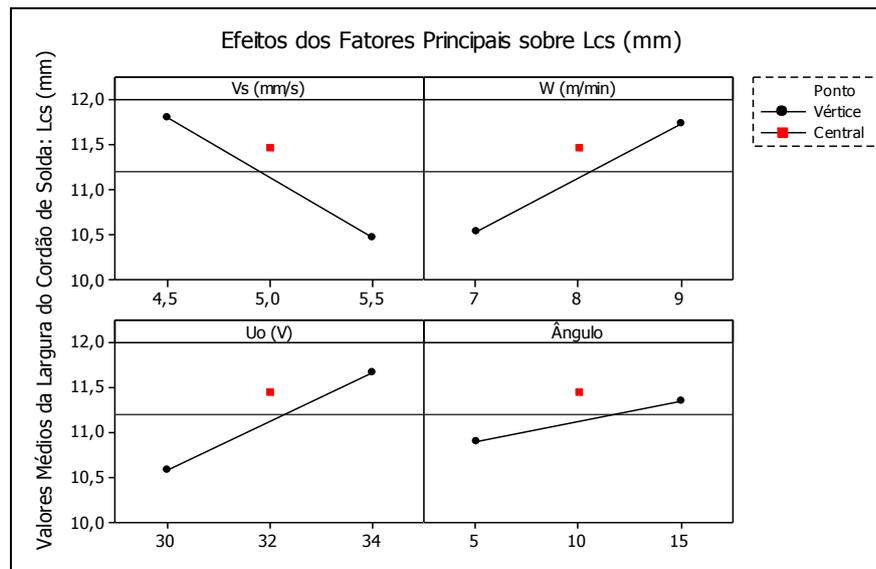


Figura 5.5 – Efeitos dos parâmetros principais sobre a largura do reforço do cordão de solda.

#### 5.4. ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA (Pcs)

As Figuras 5.6a e 5.6b mostram os gráficos de pareto e da probabilidade normal, respectivamente, obtidos da análise de variância para identificar os efeitos dos parâmetros principais e interações sobre a penetração do cordão de solda. Observa-se que os parâmetros tensão de vazio [ $U_o$  (V)], ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo ( $^\circ$ )] e velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] têm efeito significativo sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

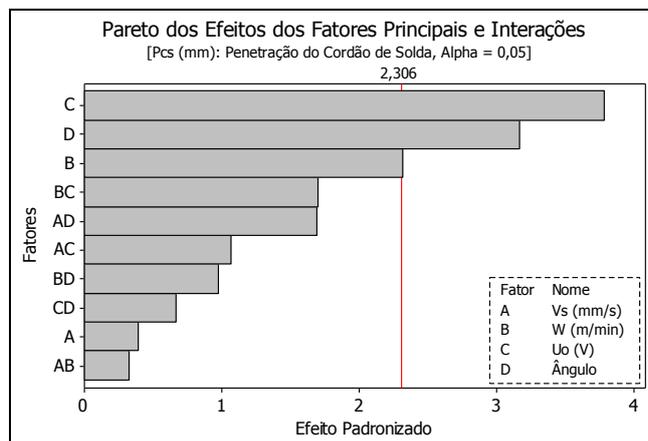


Figura 5.6a – Gráfico de pareto dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

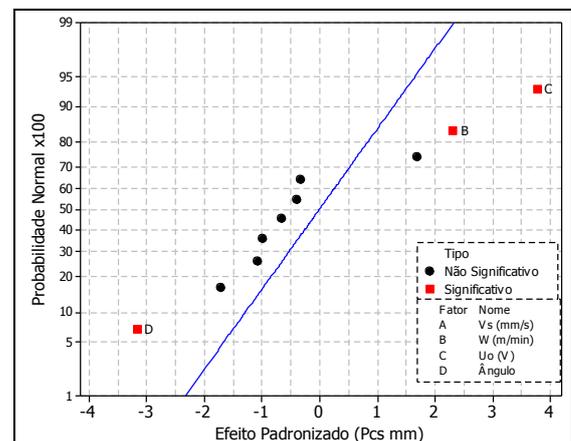


Figura 5.6b – Gráfico da probabilidade normal dos efeitos dos parâmetros principais e interações.

A Figura 5.7 apresenta os efeitos principais de cada fator analisado sobre a penetração. Nota-se, nessa Figura, que o aumento da tensão de vazio [ $U_o$  (V)], fator significativo na resposta em questão, causa o aumento de penetração. O ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo ( $^\circ$ )] tem efeito significativo sobre a penetração do cordão de solda, aumentando de  $5^\circ$  para  $15^\circ$  causa diminuição na penetração. E o terceiro fator significativo sobre a penetração é a velocidade de alimentação de arame [W (m/min)], que o

aumento da velocidade de alimentação do arame, causa um aumento de penetração sendo isto provavelmente ocasionado por uma diminuição do comprimento do arco e um aumento na corrente de soldagem. Isto pode ser observado na Tabela 5.1, nos valores dos parâmetros medidos do processo para o número padrão 10 e 2, respectivamente, aumentando de  $W = 7$  m/min (corrente de soldagem é de 150 A e tensão do arco elétrico de 26 V) para  $W = 9$  m/min (corrente de soldagem é de 180 A e tensão do arco elétrico de 25 V).

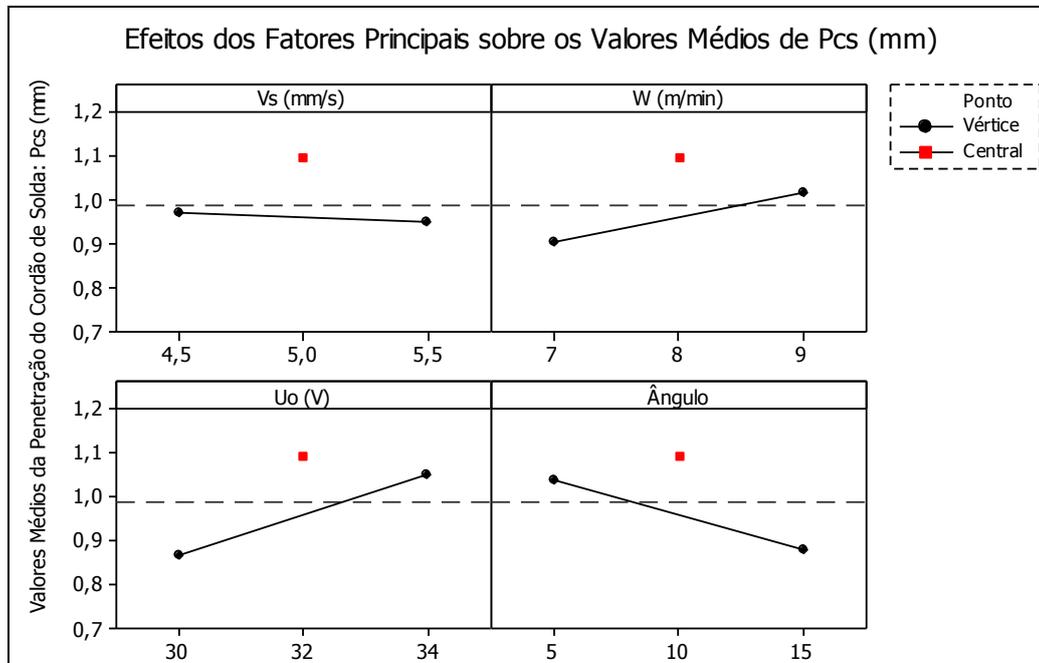


Figura 5.7 – Efeitos dos parâmetros principais sobre os valores médios da penetração do cordão de solda.

A Figura 5.7 mostra o comportamento dos fatores principais na resposta penetração do cordão de solda. Pode-se observar que os pontos centrais estão deslocados das retas referentes a cada fator principal. Se esse ponto estivesse no centro da reta, poder-se-ia dizer que a resposta analisada teve um comportamento linear, ou seja, se aumentasse ou diminuísse o valor de um parâmetro isoladamente, aumentaria ou diminuiria o valor da resposta linearmente, de acordo com a inclinação da reta. Mediante a análise de variância da Tabela A3 do apêndice é possível testar a curvatura quadrática pura (*Curvature*) utilizando-se o valor de  $P = 0,040$  e indica que há evidência de curvatura quadrática pura. A fonte (curvatura quadrática pura) é significativa já que o valor de  $P \leq 0,05$ .

As Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 mostram os efeitos das interações entre dois parâmetros sobre os valores médios da penetração [Pcs (mm)], apesar de não ser significativa (da análise de variância da Tabela A3) as interações entre estes parâmetros.

A Figura 5.8, efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)], observa-se que a variação da velocidade de soldagem, praticamente não causa efeito sobre a penetração, enquanto que, aumentando-se a velocidade de alimentação do arame, interagindo com a velocidade de soldagem, causa um pequeno aumento na penetração.

As Figuras 5.9 (efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e tensão de vazio [Uo (V)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)]) e 5.10 (efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo (°)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)]), mostram que as retas se cruzam, logo os dois parâmetros causam efeito na penetração, onde a velocidade de soldagem tem menor efeito nos dois casos.

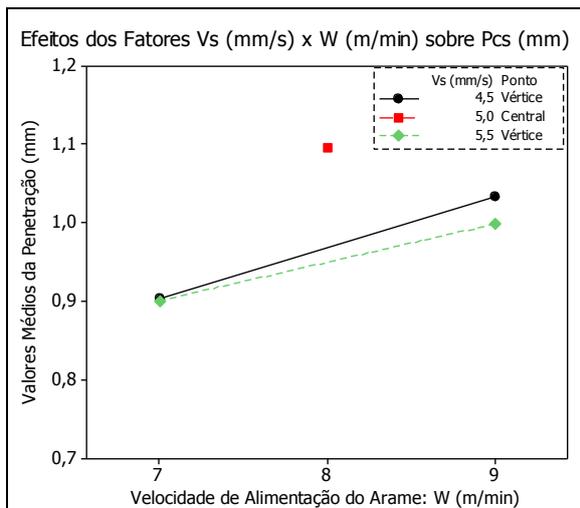


Figura 5.8 – Efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

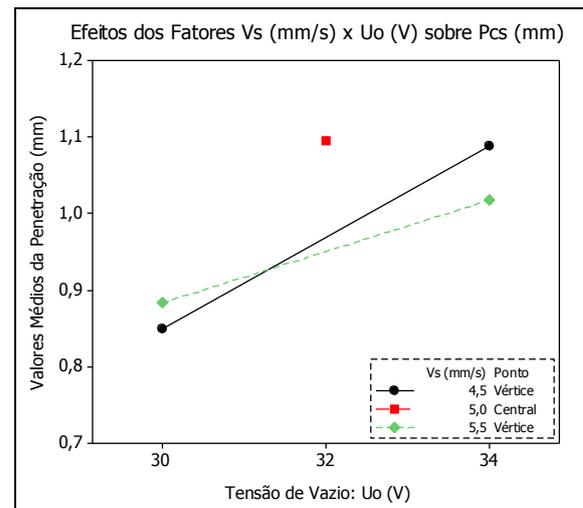


Figura 5.9 – Efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e tensão de vazio [Uo (V)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

Na Figura 5.11 observa-se o efeito dos parâmetros velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] e tensão de vazio [Uo (V)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)]. Nota-se quando  $W = 7$  m/min e se aumenta a tensão de 30 V para 34 V a penetração aumenta em maior proporção, se comparado ao aumento de tensão (de 30 V para 34 V) para  $W = 9$  m/min.

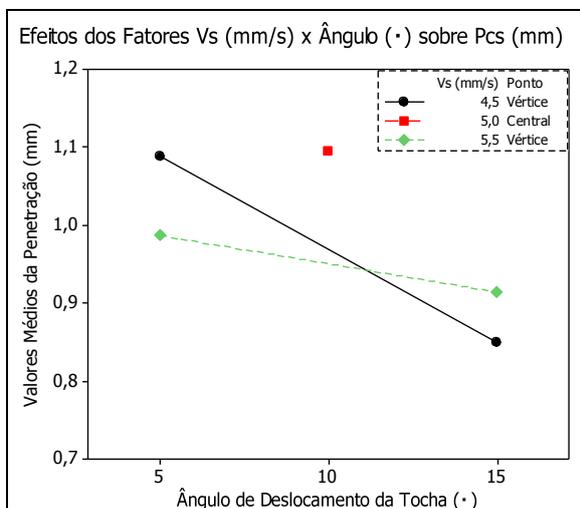


Figura 5.10 – Efeito dos parâmetros velocidade de soldagem [Vs (mm/s)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo (°)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

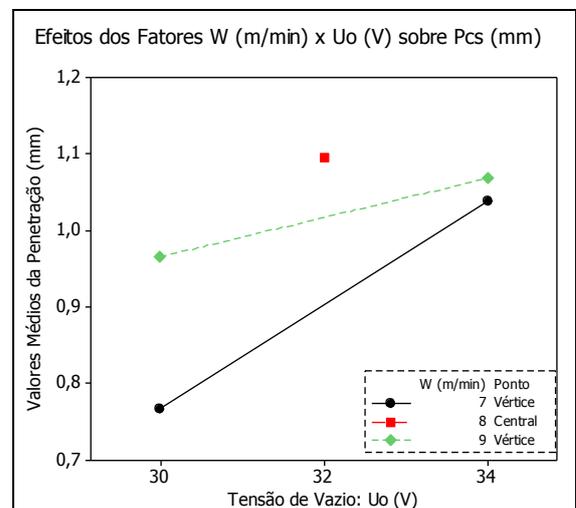


Figura 5.11 – Efeito dos parâmetros velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] e tensão de vazio [Uo (V)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

A Figura 5.12 mostra o efeito dos parâmetros velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo (°)] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)]. Quando há um aumento no ângulo de deslocamento da tocha de 5 ° para 15 °, observa-se uma diminuição na penetração do cordão de solda independente do valor da velocidade de alimentação do arame, nos níveis estudados.

Na Figura 5.13, efeito dos parâmetros tensão de vazio [ $U_0$  (V)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo ( $^\circ$ )] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)]. Quando há um aumento no ângulo de deslocamento da tocha de  $5^\circ$  para  $15^\circ$ , observa-se uma diminuição na penetração do cordão de solda independente do valor da tensão de vazio, nos níveis estudados.

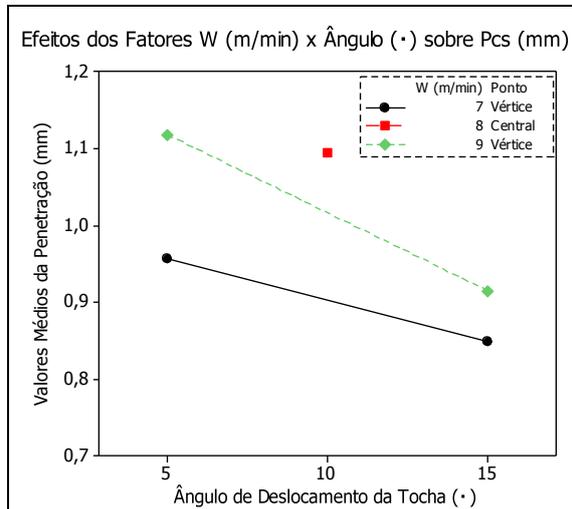


Figura 5.12 – Efeito dos parâmetros velocidade de alimentação do arame [W (m/min)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo ( $^\circ$ )] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

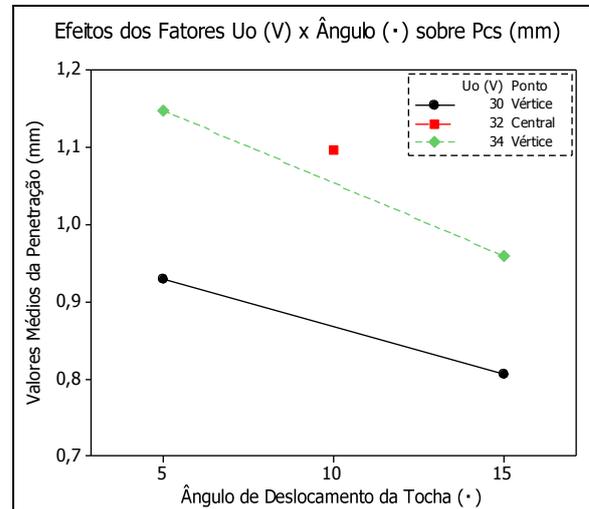


Figura 5.13 – Efeito dos parâmetros tensão de vazio [ $U_0$  (V)] e ângulo de deslocamento da tocha [Ângulo ( $^\circ$ )] sobre a penetração do cordão de solda [Pcs (mm)].

## 6. CONCLUSÃO

Considerando-se os objetivos deste trabalho de análise dos parâmetros na soldagem com eletrodo tubular com proteção gasosa (FCAW-G – *Flux Cored Arc Welding Gas-Shielded*), conclui-se que:

1 – Em relação à altura do reforço do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciam na soldagem com eletrodos tubulares são, respectivamente, tensão de vazio e velocidade de alimentação do arame, sendo o ângulo de deslocamento da tocha o parâmetro de menor influência.

2 – Em relação à largura do reforço do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciam na soldagem com eletrodos tubulares são, respectivamente, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e tensão de vazio, sendo o ângulo de deslocamento da tocha o parâmetro de menor influência.

3 – Em relação à penetração do cordão de solda, os parâmetros que mais influenciam na soldagem com eletrodos tubulares são, respectivamente, tensão de vazio, ângulo de deslocamento da tocha e velocidade de alimentação do arame, sendo a velocidade de soldagem o parâmetro de menor influência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS - Associação Brasileira de Soldagem, “**Soldagem e Inspeção**”, <http://www.abs-soldagem.org.br>, Acessado em 29/08/2010.

ARAUJO, W.R. “**Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger**”, UFMG, fevereiro, 2004.

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

BRAGA, E. M., “**Soldagem a arame tubular auto protegido em corrente pulsada**”, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, dezembro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 1997.

ESAB, “**Catálogo de consumíveis**”, <http://www.esab.com.br>, Acessado em 18/09/2010.

KIM, I.S.; Son, K.J.; YANG, Y.S.; YARAGADA P.K.D.V., “**Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method**”, Elsevier Science Ltd., International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 43, 2003. doi:10.1016/S0890-6955(03)00054-3.

LINCOLN ELECTRIC, “**Catálogo de consumíveis**”, <http://www.lincolnbrasil.com.br>, Acessado em 18/09/2010.

MACHADO, I. G. “**Soldagem e técnicas conexas: processos**”, editado pelo autor, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. “**Soldagem - fundamentos e tecnologia**”, 3. ed., UFMG, 2009.

MARINHO, L. C. D.; SILVA, S. S.; PARANHOS, R., “**Análise da Influência das Variáveis do Processo de Soldagem MIG/MAG Robotizado na Geometria do Cordão de Solda com Auxílio de Planejamento de Experimentos**”, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, novembro, 2001.

MONTGOMERY, D. C. “**Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**”, 4. ed., LTC, 2009.

MONTGOMERY, D. C. “**Introdução ao controle estatístico da qualidade**”, 4. ed., LTC, 2004.

MOSTAFA, N.B.; KHAJAVI, M.N. “**Optimisation of welding parameters for weld penetration in FCAW**”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, V. 16, 2006.

MOTA, C. A. M. “**Níquel e manganês como controladores da tenacidade na soldagem com arames tubulares auto protegidos**”, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

NAGESH, D. S.; DATTA, G. L., “**Modeling of fillet welded joint of GMAW process: integrated approach using DOE, ANN and GA**”, Springer, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), V. 2, 2008. doi: 10.1007/s12008-008-0042-8.

NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E., “**Como fazer experimentos**”, Campinas, SP, Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2007.

NORRISH, J., “**Advanced Welding Processes**”, Institute of Physics Publishing Bristol, Philadelphia and New York, 1992.

QUITES, A M. “**Introdução à soldagem a arco voltaico**”, Soldasoft, 2002.

RIBEIRO, L. G.; COSTA, S. C., “**Influência dos Parâmetros de Pulso no Processo MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda**”, 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Abril, 2001.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. de. “**Soldagem – processos e metalurgia**”, Edgard Blücher, 1995.

WIDGERY, D., “**Tubular wire welding**”, First published, England, Woodhead Publishing Limited, 1994.

## APÊNDICE

## A1. Análise da variância dos fatores sobre a Altura do Reforço do cordão de solda (Hcs)

A Figura A1 mostra o Planejamento fatorial  $2^4$  mais o ponto central e a resposta dos valores da altura do reforço do cordão de solda (Hcs) aparece nos vértices dos cubos e no ponto central, respectivamente.

Da Tabela A1, observa-se que o valor de  $P = 0,185$  indica que a falta de ajuste (*Lack of Fit*) não é significativo, indicando que nenhuma das interações de ordem superior (dois ou mais fatores) é importante. Para testar a curvatura quadrática pura (*Curvature*) utiliza-se o valor de  $P = 0,419$  e indica que não há evidência de curvatura quadrática pura.

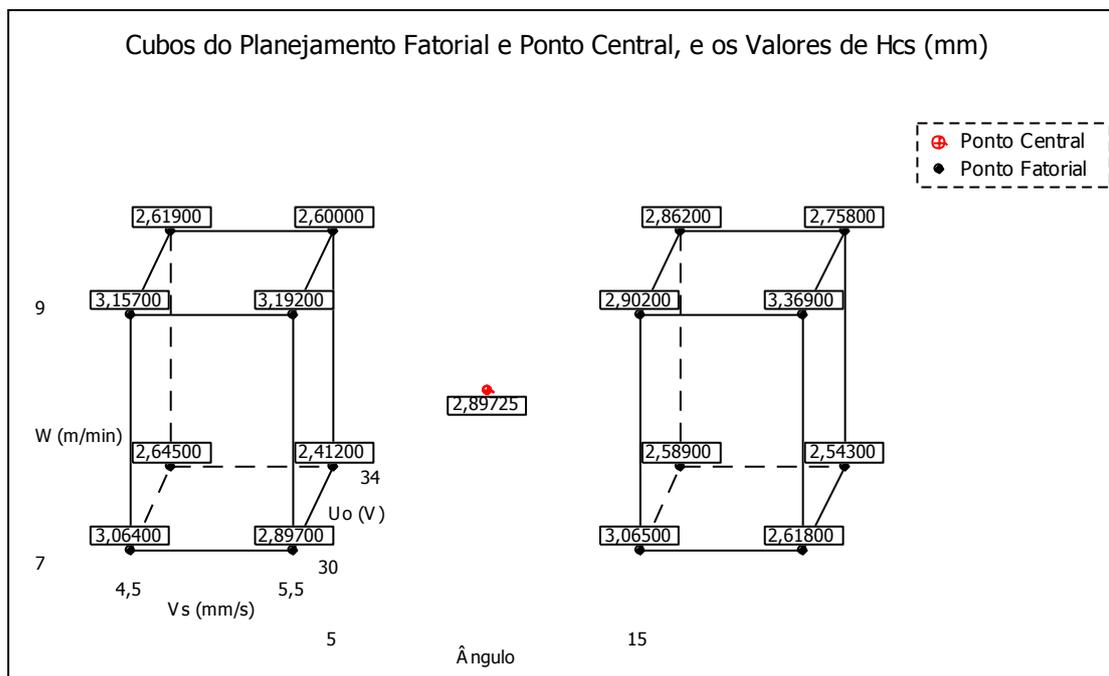


Figura A1: Planejamento fatorial  $2^4$ , o ponto central e a resposta dos valores da altura do reforço do cordão de solda (Hcs).

Tabela A1: Análise de variância (ANOVA) dos fatores Vs; W; Uo e Ângulo sobre Hcs (mm)

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para Hcs (mm) (unidades codificadas)

Fator	Efeitos	Coef.	SE Coef.	T	P
Constante		2,8308	0,03492	81,06	0,000
Vs (mm/s)	-0,0643	-0,0321	0,03492	-0,92	0,385
<b>W (m/min)</b>	<b>0,2033</b>	<b>0,1016</b>	<b>0,03492</b>	<b>2,91</b>	<b>0,020</b>
<b>Uo (V)</b>	<b>-0,4045</b>	<b>-0,2022</b>	<b>0,03492</b>	<b>-5,79</b>	<b>0,000</b>
Ângulo	0,0150	0,0075	0,03492	0,21	0,835
Vs (mm/s)*W (m/min)	0,1590	0,0795	0,03492	2,28	0,052
Vs (mm/s)*Uo (V)	-0,0362	-0,0181	0,03492	-0,52	0,618
Vs (mm/s)*Ângulo	0,0318	0,0159	0,03492	0,45	0,661
W (m/min)*Uo (V)	-0,0408	-0,0204	0,03492	-0,58	0,576
W (m/min)*Ângulo	0,0657	0,0329	0,03492	0,94	0,374
Uo (V)*Ângulo	0,1040	0,0520	0,03492	1,49	0,175
Ct Pt		0,0665	0,07809	0,85	0,419

Análise da Variância para Hcs (mm) (unidades codificadas)

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0,83714	0,83714	0,209284	10,73	0,003
2-Way Interactions	6	0,17761	0,17761	0,029602	1,52	0,285
<b>Curvature</b>	<b>1</b>	<b>0,01415</b>	<b>0,01415</b>	<b>0,014151</b>	<b>0,73</b>	<b>0,419</b>

Residual Error	8	0,15610	0,15610	0,019513		
<b>Lack of Fit</b>	<b>5</b>	<b>0,13136</b>	<b>0,13136</b>	<b>0,026273</b>	<b>3,19</b>	<b>0,185</b>
Pure Error	3	0,02474	0,02474	0,008246		
Total	19	1,18500				

## A2. Análise da variância dos fatores sobre a Largura do cordão de solda (Lcs)

A Figura A2 mostra o Planejamento fatorial  $2^4$  mais o ponto central e a resposta dos valores da largura do cordão de solda (Lcs) aparece nos vértices dos cubos e no ponto central, respectivamente.

Da Tabela A2, observa-se que o valor de  $P = 0,283$  indica que a falta de ajuste (*Lack of Fit*) não é significativo, indicando que nenhuma das interações de ordem superior (dois ou mais fatores) é importante. Para testar a curvatura quadrática pura (*Curvature*) utiliza-se o valor de  $P = 0,325$  e indica que não há evidência de curvatura quadrática pura. Para que a fonte (falta de ajuste ou curvatura quadrática pura) seja significativa é necessário que o valor de  $P \leq 0,05$ .

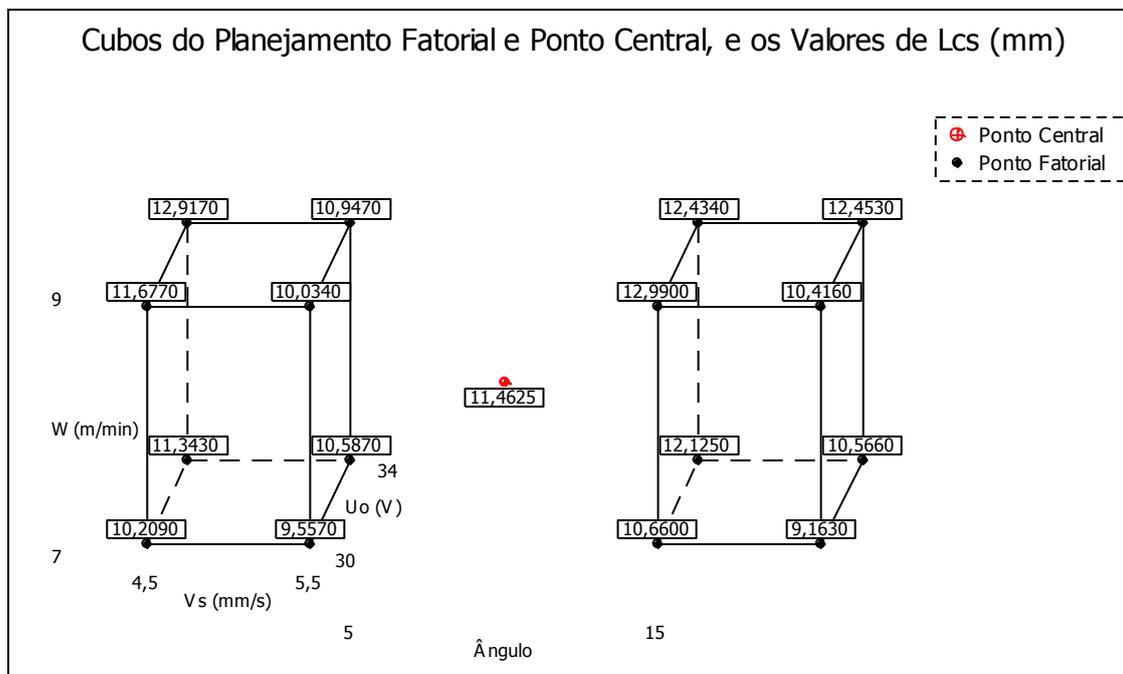


Figura A2 – Cubos do planejamento fatorial, ponto central e os valores de largura (Lcs).

Tabela A2: Análise de variância (ANOVA) dos fatores Vs; W; Uo e Ângulo sobre Lcs (mm)

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para Lcs (mm) (unidades codificadas)					
Fator	Efeitos	Coef	SE Coef	T	P
Constante		11,1299	0,1419	78,44	0,000
<b>Vs (mm/s)</b>	<b>-1,3290</b>	<b>-0,6645</b>	<b>0,1419</b>	<b>-4,68</b>	<b>0,002</b>
<b>W (m/min)</b>	<b>1,2072</b>	<b>0,6036</b>	<b>0,1419</b>	<b>4,25</b>	<b>0,003</b>
<b>Uo (V)</b>	<b>1,0832</b>	<b>0,5416</b>	<b>0,1419</b>	<b>3,82</b>	<b>0,005</b>
Ângulo	0,4420	0,2210	0,1419	1,56	0,158
Vs (mm/s)*W (m/min)	-0,2130	-0,1065	0,1419	-0,75	0,474
Vs (mm/s)*Uo (V)	0,2625	0,1312	0,1419	0,92	0,382
Vs (mm/s)*Ângulo	-0,0738	-0,0369	0,1419	-0,26	0,802
W (m/min)*Uo (V)	-0,1748	-0,0874	0,1419	-0,62	0,555
W (m/min)*Ângulo	0,2375	0,1187	0,1419	0,84	0,427
Uo (V)*Ângulo	0,0040	0,0020	0,1419	0,01	0,989
Ct Pt		0,3326	0,3173	1,05	0,325

S = 0,567582      PRESS = 21,7465  
 R-Sq = 88,35%      R-Sq(pred) = 1,72%      R-Sq(adj) = 72,34%

**Análise da Variância para Lcs (mm) (unidades codificadas)**

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Main Effects</b>	<b>4</b>	<b>18,3700</b>	<b>18,3700</b>	<b>4,5925</b>	<b>14,26</b>	<b>0,001</b>
2-Way Interactions	6	0,8267	0,8267	0,1378	0,43	0,842
<b>Curvature</b>	<b>1</b>	<b>0,3540</b>	<b>0,3540</b>	<b>0,3540</b>	<b>1,10</b>	<b>0,325</b>
Residual Error	8	2,5772	2,5772	0,3221		
<b>Lack of Fit</b>	<b>5</b>	<b>2,0117</b>	<b>2,0117</b>	<b>0,4023</b>	<b>2,13</b>	<b>0,283</b>
Pure Error	3	0,5655	0,5655	0,1885		
Total	19	22,1279				

**A3. Análise da variância dos fatores sobre a Penetração do Cordão de Solda (Pcs)**

A Figura A1 mostra o Planejamento fatorial  $2^4$  mais o ponto central e a resposta dos valores da penetração do cordão de solda (Pcs) aparece nos vértices dos cubos e no ponto central, respectivamente.

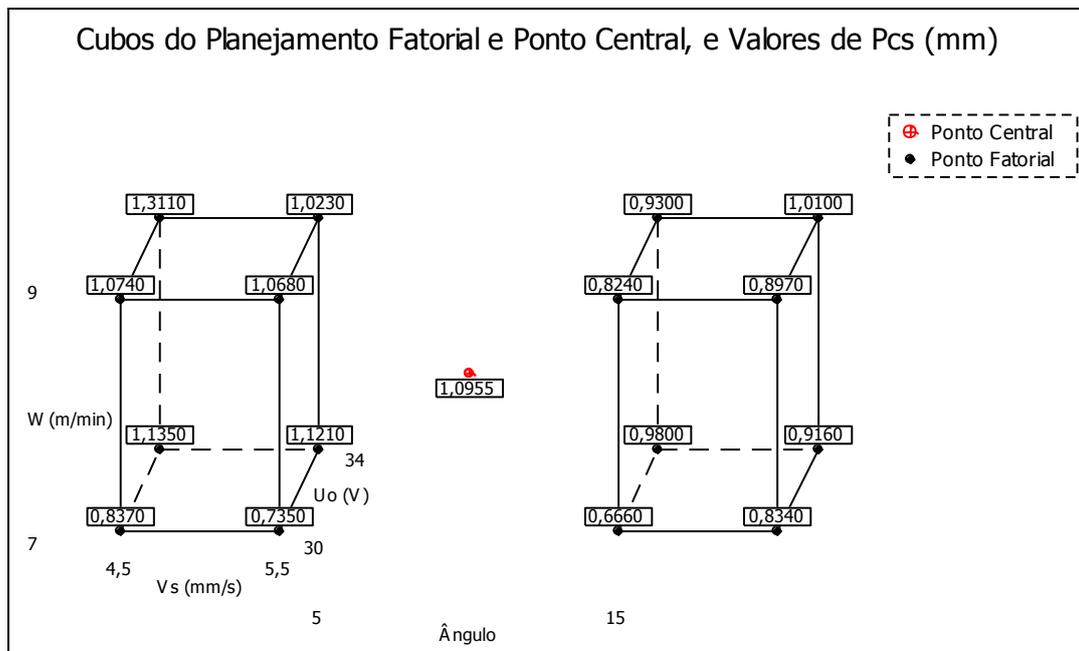


Figura A1: Planejamento fatorial  $2^4$ , o ponto central e a resposta dos valores da penetração do cordão de solda (Pcs).

Da Tabela A3, observa-se que o valor de P = 0,791 indica que a falta de ajuste (*Lack of Fit*) não é significativo, indicando que nenhuma das interações de ordem superior (dois ou mais fatores) é importante. Para testar a curvatura quadrática pura (*Curvature*) utiliza-se o valor de P = 0,040 e indica que há evidência de curvatura quadrática pura. A fonte (curvatura quadrática pura) é significativa já que o valor de P  $\leq$  0,05.

**Tabela A3: Análise de variância (ANOVA) dos fatores Vs; W; Uo e Ângulo sobre Pcs (mm)**

Estimativa dos Efeitos e Coeficientes para Pcs (mm) (unidades codificadas)					
Fator	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		0,96006	0,02465	38,94	0,000
Vs (mm/s)	-0,01912	-0,00956	0,02465	-0,39	0,708
<b>W (m/min)</b>	<b>0,11412</b>	<b>0,05706</b>	<b>0,02465</b>	<b>2,31</b>	<b>0,049</b>
<b>Uo (V)</b>	<b>0,18637</b>	<b>0,09319</b>	<b>0,02465</b>	<b>3,78</b>	<b>0,005</b>

<b>Ângulo</b>	<b>-0,15587</b>	<b>-0,07794</b>	<b>0,02465</b>	<b>-3,16</b>	<b>0,013</b>
Vs (mm/s)*W (m/min)	-0,01613	-0,00806	0,02465	-0,33	0,752
Vs (mm/s)*Uo (V)	-0,05237	-0,02619	0,02465	-1,06	0,319
Vs (mm/s)*Ângulo	0,08337	0,04169	0,02465	1,69	0,129
W (m/min)*Uo (V)	-0,08362	-0,04181	0,02465	-1,70	0,128
W (m/min)*Ângulo	-0,04787	-0,02394	0,02465	-0,97	0,360
Uo (V)*Ângulo	-0,03263	-0,01631	0,02465	-0,66	0,527
Ct Pt		0,13544	0,05513	2,46	0,040

S = 0,0986115    PRESS = 0,479056  
R-Sq = 84,67%    R-Sq(pred) = 5,59%    R-Sq(adj) = 63,59%

**Análise da Variância para Pcs (mm) (unidades codificadas)**

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Main Effects</b>	<b>4</b>	<b>0,28969</b>	<b>0,28969</b>	<b>0,072423</b>	<b>7,45</b>	<b>0,008</b>
2-Way Interactions	6	0,08122	0,08122	0,013536	1,39	0,324
<b>Curvature</b>	<b>1</b>	<b>0,05870</b>	<b>0,05870</b>	<b>0,058699</b>	<b>6,04</b>	<b>0,040</b>
Residual Error	8	0,07779	0,07779	0,009724		
<b>Lack of Fit</b>	<b>5</b>	<b>0,03373</b>	<b>0,03373</b>	<b>0,006747</b>	<b>0,46</b>	<b>0,791</b>
Pure Error	3	0,04406	0,04406	0,014686		
Total	19	0,50740				

---