

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM:  
ESTUDO DE CASO PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR  
NA HZM INDUSTRIAL LTDA.**

**ANDERSON CALIMAM PIMENTEL  
WALLACE ZANOTELLI**

**VITÓRIA – ES  
ABRIL/2004**

**ANDERSON CALIMAM PIMENTEL  
WALLACE ZANOTELLI**

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM:  
ESTUDO DE CASO PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR  
NA HZM INDUSTRIAL LTDA.**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Anderson Calimam Pimentel e Wallace Zanotelli, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
ABRIL/2004**

**ANDERSON CALIMAM  
WALLACE ZANOTELLI**

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM:  
ESTUDO DE CASO PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR  
NA HZM INDUSTRIAL LTDA.**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Davi Sampaio Correia  
Orientador**

---

**Prof. Dr. Osvaldo Cominelli  
Examinador**

---

**Prof. MsC Osvaldo Paiva Almeida Filho  
Examinador**

**Vitória - ES, 27 de Abril de 2004.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos este projeto a todos que ajudaram para que pudesse ser realizado, desde os professores, aos colegas de curso, aos responsáveis da empresa HZM Industrial Ltda e, principalmente, aos nossos familiares por todo o apoio e a Deus pela Benção sobre nós.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a empresa HZM Industrial Ltda pela oportunidade desta parceria e pela disposição de suas instalações e equipamentos para os testes além do apoio dado pelos professores Davi Sampaio Correia, Osvaldo Paiva e Cherlio Scandiam.

Agradecemos ao aluno graduando e monitor do Laboratório de Engenharia dos Materiais, Alexandre Picoli Scárdua.

Agradecemos ao Laboratório de Soldagem, Laboratório de Engenharia dos Materiais e o Laboratório de Tecnologia Mecânica.

Agradecemos a Tiago Couto (Engenheiro responsável da HZM), Valdemar Batista (Encarregado de soldagem da HZM) e Adélio Rodrigues de Souza (Soldador da HZM).

**LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de solda por arame tubular .....   | 12 |
| Figura 2 - Equipamento Básico para soldagem com arame tubular .....   | 13 |
| Figura 3 - Secções disponíveis para arame tubular.....  | 14 |
| Figura 4 - Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição.....   | 16 |
| Figura 5 - Apresenta a máquina de corte montada para soldagem .....   | 20 |
| Figura 6 - Apresenta o cabeçote utilizado para alimentação do arame .....   | 20 |
| Figura 7 - Corpo de prova utilizado pela empresa .....  | 21 |
| Figura 8 Esquema do corpo de prova .....  | 23 |
| Figura 9 - Fixação do corpo de prova .....  | 27 |
| Figura 10 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão dos corpos de provas com chanfro .....    | 32 |
| Figura 11 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame no reforço do cordão dos corpos de provas com chanfro .....    | 32 |
| Figura 12 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame na penetração do cordão dos corpos de provas com chanfro ..... | 33 |
| Figura 13 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame na largura do cordão dos corpos de provas sem chanfro .....    | 33 |
| Figura 14 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame no reforço do cordão dos corpos de provas sem chanfro .....    | 34 |
| Figura 15 - Influência da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação do arame na penetração do cordão dos corpos de provas sem chanfro ..... | 34 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Tabela de especificação inicial de soldagem da empresa.....   | 21 |
| Tabela 2 – Extraída do site <a href="http://www.lincolnelectric.com">www.lincolnelectric.com</a> , indicando as condições de soldagem do arame <i>INNERSHIELD NR-211-MP</i> . ..... | 22 |
| Tabela 3 - Matriz experimental para realização dos testes experimentais .....   | 24 |
| Tabela 4 - Matriz experimental com os dados obtidos em campo .....  | 26 |
| Tabela 5 - Tabela de medidas de cordão de soldagem dos corpos de provas .....   | 28 |
| Tabela 6 - Tabela de conclusão dos testes experimentais .....   | 29 |
| Tabela 7 - Matriz experimental dos testes de de comprovação .....   | 35 |
| Tabela 8 - Matriz experimental com os dados obtidos em campo dos testes de comprovação .....  | 36 |
| Tabela 9 - Tabela de medida do cordão de solda dos corpos de provas dos testes de comprovação .....   | 36 |
| Tabela 10 - Tabela de comprovaçãop dos testes de comprovação .....  | 37 |
| Tabela 11 - Tabela de comparação final .....  | 38 |

**SUMÁRIO**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>DEDICATÓRIA.....</b>                                | <b>4</b>  |
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                            | <b>5</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                          | <b>6</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                          | <b>7</b>  |
| <b>SUMÁRIO .....</b>                                   | <b>8</b>  |
| <b>1. RESUMO .....</b>                                 | <b>9</b>  |
| <b>2. OBJETIVO .....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>3. INTRODUÇÃO.....</b>                              | <b>11</b> |
| 3.1 Processo de Soldagem Arame Tubular: Histórico..... | 11        |
| 3.3 Equipamentos.....                                  | 13        |
| 3.4 Consumíveis.....                                   | 14        |
| 3.5 Fontes.....  | 15        |
| 3.6 Variáveis do processo .....                        | 16        |
| 3.6.1 Corrente .....                                   | 16        |
| 3.6.2 Tensão .....                                     | 17        |
| 3.6.3 Stick-out.....                                   | 17        |
| 3.6.4 Velocidade de Soldagem.....                      | 17        |
| 3.7 Limitações do Trabalho.....                        | 18        |
| <b>4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>               | <b>19</b> |
| 4.1 Primeira Visita Técnica.....                       | 19        |
| 4.2 Segunda Visita Técnica.....                        | 25        |
| 4.3 Terceira visita técnica .....                      | 36        |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>                              | <b>38</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>              | <b>40</b> |



## 1. RESUMO

A HZM Industrial Ltda (denominada doravante HZM), empresa do ramo de construção de estruturas metálicas pesadas, tem como atividade primária a fabricação de tubulações utilizadas pelas empresas de grande porte do estado do Espírito Santo. Muitas vezes, a montagem destas tubulações é feita em condições de “campo”, ou seja, ao ar livre, sujeita assim a correntes de ar. Esta condição impede (ou dificulta) o uso do processo de soldagem tradicional da empresa (MIG/MAG). No intuito de agilizar e otimizar a fabricação de tais estruturas, a empresa resolveu substituir o processo MIG/MAG por um que apresentasse os mesmos níveis de qualidade e produtividade, mas com maior robustez na soldagem em campo. E considerou-se que o processo que melhor atendia a estes requisitos seria o arame tubular.

A HZM comprou, além do equipamento e consumíveis necessários à soldagem por arame tubular, uma máquina de corte, conhecida popularmente por “tartaruga”, para mecanizar a soldagem, eliminando assim a necessidade do soldador. A empresa encontrou dificuldades na implementação deste novo processo e buscou uma parceria com o laboratório de soldagem da UFES (LASO), para encontrar parâmetros de soldagem otimizados para o arame tubular.

Sabendo da necessidade dos alunos em finalizar o curso de graduação de Engenharia Mecânica, o LASO ofereceu uma oportunidade de ser feito um projeto de final de curso envolvendo a otimização.

Esta parceria teve como objetivos, além das melhorias operacionais, procurar conhecer o método de soldagem do equipamento visando obter conhecimentos específicos e formar um início de parceria com a Universidade podendo proporcionar, em um futuro próximo, novos estudos em prol da melhor qualificação dos profissionais no estado.

Neste trabalho, além de ser apresentado o processo mecanizado de soldagem por arame tubular, estão indicadas as ações tomadas para otimizar e garantir uma qualidade na solda, bem como os parâmetros analisados.

## **2. OBJETIVO**

O principal objetivo deste trabalho foi a familiarização dos alunos graduandos envolvidos com as metodologias utilizadas na otimização de um processo de soldagem. Para tanto, os alunos fizeram uma revisão sobre o processo de soldagem arame tubular e aplicaram estes conhecimentos na otimização “in situ” do processo na sua forma mecanizada.

### **3. INTRODUÇÃO**

Nesta seção será feita uma breve revisão sobre os principais aspectos do processo de soldagem arame tubular. Os conhecimentos aqui expostos serão úteis ao leitor no posterior entendimento do processo de otimização.

#### **3.1 Processo de Soldagem Arame Tubular: Histórico**

Data da década de 30 o início da utilização de proteção gasosa nas operações de soldagem, para resolver problemas da contaminação atmosférica nas soldas de materiais reativos (alumínio, titânio e ligas de magnésio), tendo dado origem ao processo TIG (Tungsten Inert Gas). Utilizando o mesmo princípio de funcionamento do TIG, ou seja um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte, surge em 1948 o processo MIG, o qual difere do anterior por utilizar um eletrodo consumível de alimentação contínua.

Inicialmente, o MIG foi utilizado para ligas altamente reativas, pois a utilização de gases inertes tornava seu custo elevado para utilização em aços carbono e baixa liga. Após a introdução do CO<sub>2</sub> como gás de proteção, este se revelou um processo bem aceita para soldagem de aço carbono e baixa liga, uma vez que barateou o custo do processo.

No início apenas arame sólido era utilizado e por volta dos anos 50 foi introduzido o uso de arame tubular com proteção gasosa. Na década de 60, pesquisadores e engenheiros da empresa americana Lincoln Electric apresentaram o arame autoprottegido.

A utilização de arame tubular pode apresentar uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, e possibilidade de solda em todas as posições, além de diminuir o número de respingos. O arame tubular ganhou popularidade na soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessuras variadas. Muitas vezes, o processo é utilizado em grandes espessuras, onde a geometria de junta e posição de soldagem não permite a

aplicação de outros processos de alto rendimento, tais como arco submerso ou eletroescória.

O processo de soldagem por arame tubular tem duas variantes, podendo ser protegido por gás inerte, por gás ativo ou mistura destes ("dualshield") ou autoprottegido ("innershield"). Atualmente, a utilização de arames tubulares autoprottegidos tem tido grande interesse em consequência da sua versatilidade e possibilidade de aplicação em ambientes sujeitos a intempéries, como na fabricação de plataformas de prospeção de petróleo, estaleiros navais e locais de difícil acesso, onde, até então, era absoluto o domínio do processo de soldagem por eletrodos revestidos.

### 3.2 Definição

O processo de soldagem por arame tubular é definido como sendo um processo de soldagem por fusão, onde o calor necessário a ligação das partes é fornecido por um arco elétrico estabelecido entre a peça e um arame alimentado continuamente. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do processo.

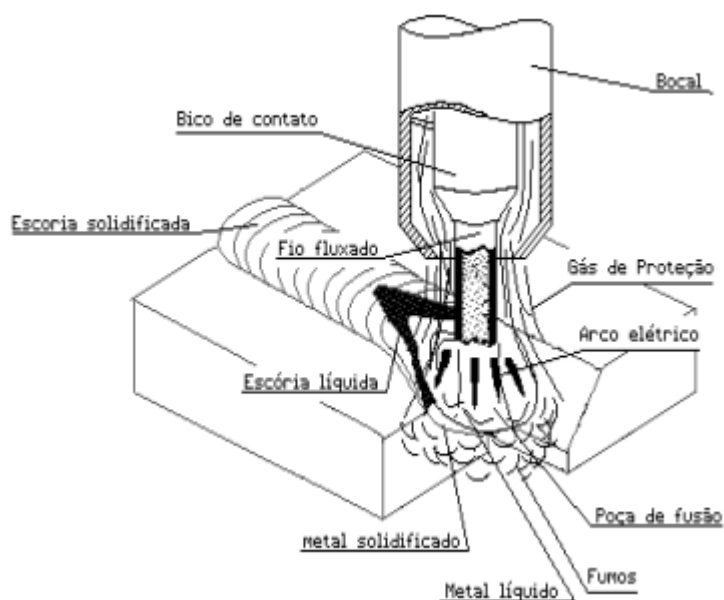


Figura 1- Esquema de solda por Arame Tubular

É um processo semelhante ao processo MIG/MAG, diferindo deste pelo fato do arame eletrodo não ser sólido e sim tubular, possuindo no seu interior uns fluxos compostos por materiais inorgânicos e metálicos com várias funções. Entre elas pode-se destacar a melhoria das características do arco elétrico, da transferência do metal de solda, da proteção do banho de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória. Este processo possui basicamente duas variantes: Arame Tubular com proteção gasosa e Arame Tubular autoprotegido

### 3.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para soldagem com arame tubular autoprotegido e com proteção gasosa são similares. A diferença básica reside no fato de o equipamento para soldagem com proteção gasosa possuir um sistema de envio e controle dos gases ao ponto de trabalho. A Figura 2 apresenta o esquema básico de um equipamento para soldagem com arames tubular\*.

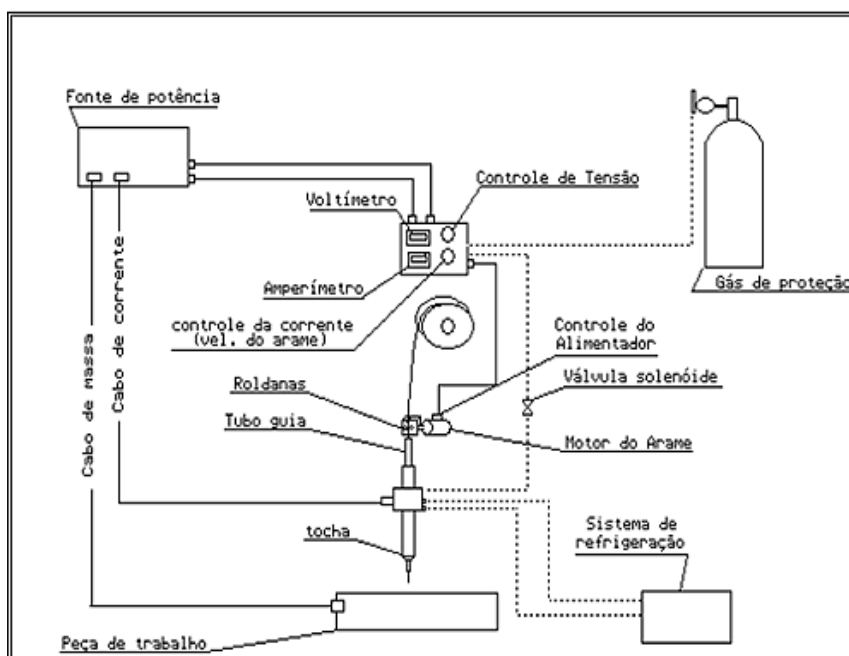


Figura 2- Equipamento básico para soldagem com arame tubular [AWS, 1991]

\* O equipamento esquematizado na Figura 2 pode ser utilizado para soldagem com e sem proteção gasosa.

### 3.4 Consumíveis

Os arames tubulares apresentam várias configurações de secção transversal, podendo ser simplesmente um tubo ou configurações mais complexas. A Figura 3 apresenta os principais tipos de configuração para secções transversais disponíveis atualmente no mercado.

O fluxo encontrado no interior do tubo metálico atua de maneira semelhante ao revestimento nos eletrodos revestidos. O fluxo pode ser composto tanto por óxidos inorgânicos (com funções desoxidantes, desgaseificantes, geradores de gases para proteção, desnitrificantes, formadores de escória e estabilizadores do arco elétrico) como também por elementos e ligas metálicas com funções de adição de elementos de liga, melhoria de propriedades químicas, mecânicas e elétricas do material depositado, estabilizadores do carbono e da matriz ferrítica.

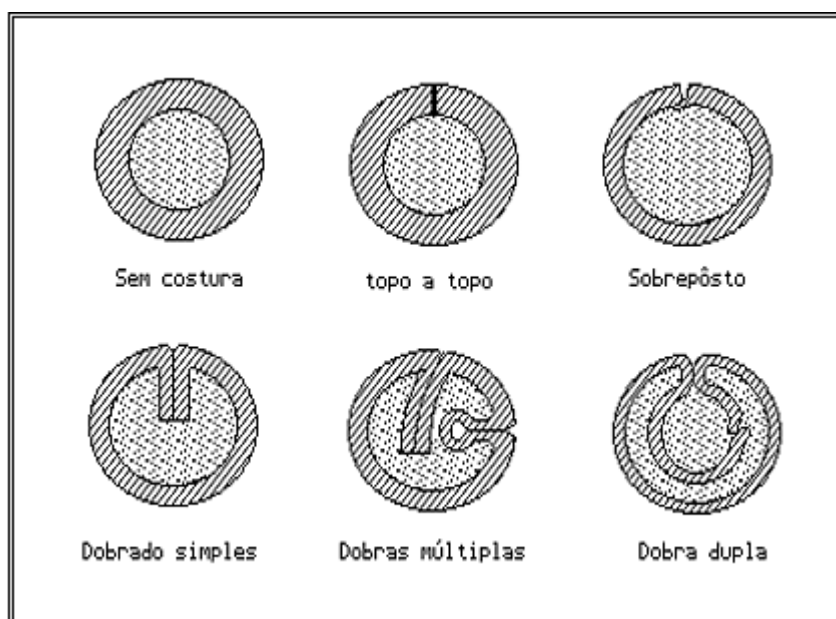


Figura 3 - Secções disponíveis para arame Tubular.

### **3.5 Fontes**

Para realização da soldagem pelo processo de arame tubular, pode-se utilizar fontes com característica estática de tensão ou corrente constante, sendo a mais utilizada a fonte de tensão constante.

Para a utilização da fonte de corrente constante deve-se utilizar um cabeçote de alimentação de arame com controle externo. O controle externo varia a velocidade de alimentação de acordo com a variação da tensão de trabalho. Tal cabeçote é de custo elevado, sendo este um dos fatores que afetam na escolha deste tipo de fonte.

Quando se utiliza a fonte de tensão constante, esta já possui, devido às suas características construtivas, o chamado controle interno. Este permite um auto-ajuste do comprimento do arco, através da variação da corrente de soldagem. Assim, estas fontes não necessitam de cabeçotes especiais, o que resulta em um equipamento de soldagem mais barato.

### 3.6 Variáveis do processo

A seguir serão apresentadas algumas variáveis importantes para a caracterização da soldagem por arame tubular.

#### 3.6.1 Corrente

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo, sendo que a taxa de deposição e penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem. Numa fonte de tensão constante, a corrente de soldagem está diretamente relacionada com a velocidade de alimentação.

A Figura 4 apresenta a influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição para alguns tipos de arame tubular.

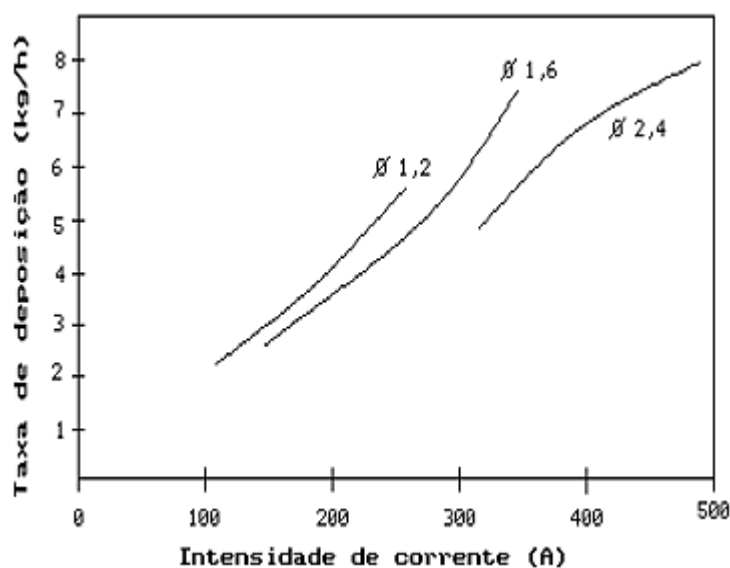


Figura 4 - Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição

Com o uso de correntes excessivamente altas, o cordão torna-se convexo e de morfologia deteriorada, enquanto que baixas intensidades de corrente tem como consequência uma transferência globular com gotas grandes e excessivos respingos.



### **3.6.2 Tensão**

A tensão de arco está diretamente relacionada com o comprimento do mesmo. Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos e irregularidade na morfologia do cordão, além da introdução de nitrogênio no banho (para arames autoprotetidos), enquanto que para pequenos comprimentos de arco há uma diminuição na tensão superficial do banho, originando cordões convexos de pouca penetração.

### **3.6.3 Stick-out**

O Stick-out (comprimento energizado do eletrodo) influencia na tensão do arco. A aparência, penetração e propriedades do cordão de solda obtido através do processo arame tubular podem ser afetadas pela tensão do arco. Altas tensões (comprimentos elevados) podem resultar em respingos excessivos e contorno irregular do cordão de solda. Em eletrodos autoprotetidos, o aumento da tensão pode provocar aumento na absorção de hidrogênio. Com eletrodo de aço baixo carbono podem causar porosidade. Em eletrodos de aço inoxidável podem originar trincas pela redução do teor de ferrita no metal depositado. Tensões baixas (arco menor) resultarão em uma superfície estreita, excesso de respingos e redução da penetração.

### **3.6.4 Velocidade de Soldagem**

A velocidade de soldagem influencia na penetração e contorno do cordão. Para altas velocidades de soldagem a penetração é baixa. Baixas velocidades e altas correntes podem resultar na ocorrência de inclusões de escórias e fusão do metal de base.

A velocidade de soldagem controla ainda a quantidade de metal depositado na solda por unidade de tempo (taxa de deposição), influenciando diretamente o custo e a produtividade da soldagem.

### **3.7 Limitações do trabalho**

A otimização do processo de soldagem na empresa foi desenvolvida somente na posição plana (1G). Contudo, a empresa realiza soldas também na posição vertical (2G). Esta limitação se deu em virtude do nível de recursos financeiros disponíveis e do tempo para realização dos experimentos.

Acredita-se que com os resultados obtidos neste projeto, a empresa HZM não encontrará maiores dificuldades para a transposição dos parâmetros de soldagem para a posição 2G.

Outra limitação deste trabalho foi a faixa de espessura estudada. Todos os testes foram feitos com chapas de aço ASTM – A36 (ABNT 1020), de espessura 9,52 mm (3/8”). Destaca-se que esta espessura é a mais utilizada nas aplicações comumente encontradas na empresa.

## **4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

A otimização do processo ocorreu em três etapas distintas (chamadas de visitas técnicas). Na primeira visita técnica, conheceram-se as instalações da empresa e foram realizados alguns pré-testes com o processo arame tubular. Na segunda visita técnica, de posse da matriz experimental elaborada com os dados oriundos dos pré-testes, foram realizados vários ensaios experimentais. Analisados os dados obtidos nos ensaios da segunda visita, foi feita uma terceira visita técnica para realização dos testes finais de confirmação do ponto ótimo.

### **4.1 Primeira Visita Técnica**

O objetivo desta primeira visita técnica foi a caracterização do processo de soldagem da empresa, ou seja, como os cordões de solda são depositados atualmente na empresa. Esta caracterização serviu posteriormente para uma comparação com a condição otimizada alcançada neste trabalho.

Inicialmente, constatou-se que a fonte utilizada na empresa não estava adequada, pois ela era de característica estática, corrente constante, mas o cabeçote de alimentação acoplado não permitia o controle externo. Ou seja, não permitia a variação da velocidade de alimentação do arame, de forma a manter o comprimento do arco constante (ver mais detalhes na descrição do processo apresentada no item 3.5). As soldas feitas com a fonte de corrente constante eram caracterizadas por instabilidade do arco, baixa velocidade de soldagem e baixa penetração.

O arame utilizado no processo de soldagem pela empresa é do tipo autoprotégido, com diâmetro de 2,0 mm, e sua referência normalizada é AWS A5.20-95: E71T-11. Já a especificação do fabricante Lincoln Electric é INNERSHIELD NR-211-MP.

A Figura 5 ilustra a máquina de corte utilizada para a translação da tocha e a Figura 6 ilustra o cabeçote de alimentação do arame.



Figura 5 – Apresenta a máquina de corte montada para a soldagem



Figura 6 – Apresenta o cabeçote utilizado para alimentação do arame

O procedimento de soldagem encontrado na empresa foi:

1. Esmerilhamento para abertura do chanfro  $\frac{1}{2}$  V, conforme Figura 7;
2. Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 8 cm/min;
3. Esmerilhamento oposto ao primeiro cordão até extrair parte de sua raiz;
4. Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 8 cm/min.

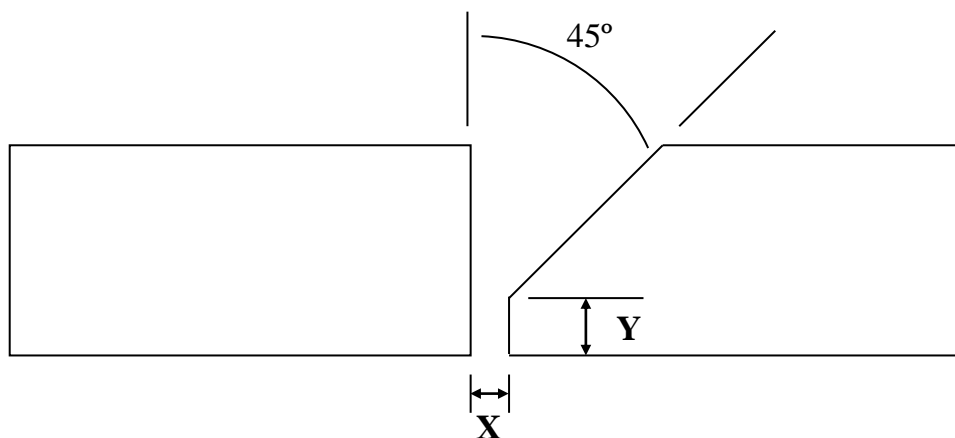


Figura 7 - Corpo de prova utilizado pela empresa

Os dados oriundos da Tabela 1 foram obtidos utilizando as seguintes condições de soldagem:

- Chapa: ( # ) 3/8, com chanfro em  $\frac{1}{2}$  V.
- Folga (X) : 2 a 3 mm.
- Nariz (Y) : 1,5 a 2 mm.
- Ângulo do chanfro: 45°.

Com este procedimento de soldagem foram obtidos os valores iniciais contidos na Tabela 1.

Tabela 1- Tabela de especificação inicial de soldagem da empresa.

| CORRENTE<br>(A) | VEL.ARAME<br>(in/min) | VEL.MÁQUINA<br>(cm/min) | STICK<br>OUT<br>(mm) |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| 120             | 100                   | 8,0                     | 20 a 25              |

Terminada a caracterização das condições de soldagem encontradas na empresa, partiu-se para a realização dos pré-testes. O primeiro passo foi a troca da fonte de soldagem por uma de tensão constante. Em seguida, buscou-se, junto ao fabricante do arame, dados para início dos pré-testes, conforme indica a Tabela 2.

Tabela 2 – Extraída do site [www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com), indicando as condições de soldagem do arame  
*INNERSHIELD NR-211-MP*.

| <i>Diâmetro do arame, polaridade, Stic-kout</i> | <i>Velocidade de Alimentação in/min (m/min)</i> | <i>Tensão (Volts)</i> | <i>Corrente (Amps)</i> | <i>Taxa de fusão (kg/r)</i> | <i>Taxa de deposição lbs/hr (kg/hr)</i> |
|---|---|-----------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| 5/64"   | 50 (1,3)  | 16                    | 180                    | 3,5 (1,6)                   | 2,9 (1,3)                               |
| DC-   | 75 (1,9)  | 18                    | 235                    | 5,3 (2,4)                   | 4,5 (2,0)                               |
| ½ - 1" (13 -                                    | 120 (3,0)                                       | 20                    | 290                    | 8,4 (3,8)                   | 7,4 (3,4)                               |
| 25mm)   | 160 (4,1)                                       | 22                    | 325                    | 11,2 (5,1)                  | 10,0 (4,5)                              |

Os pré-testes foram realizados no intuito de se delimitar uma região de investigação, na qual seria executada uma matriz experimental para identificação do ponto ótimo. A região encontrada foi:

- Velocidade de Alimentação do Arame: 125 a 225 in/min (317,5 a 571,5 cm/min)
- Velocidade de soldagem: 25 a 55 cm/min
- Junta de topo sem chanfro (e sem folga) e com preparação ½ V

As demais variáveis do processo arame tubular foram mantidas fixas. São elas:

- Stick-out: 25 mm;
- Tensão de soldagem: 22 a 23 V;
- Polaridade: negativa;
- Tocha perpendicular em relação à peça;

De acordo com os parâmetros a serem investigados, optou-se por adotar duas estratégias distintas, utilizando dois desenhos de juntas diferentes: uma já utilizada pela empresa - Figura 7; e outra configuração proposta pelos autores, composta de junta de topo sem chanfro e sem folga. O corpo de prova escolhido para os testes tem as seguintes dimensões: 50 mm de largura e 150 mm de comprimento, conforme Figura 8.

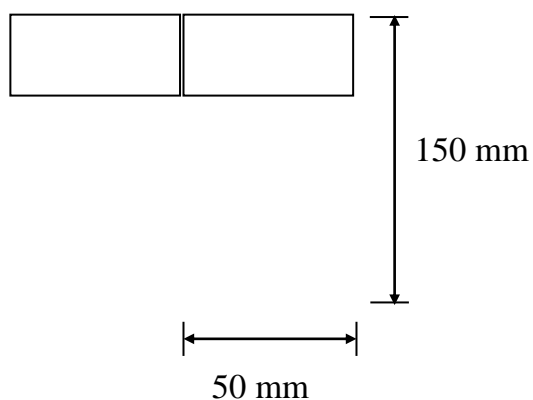


Figura 8 - Esquema do corpo de prova

Uma vez decidido às formas dos corpos de prova, foi elaborada uma matriz experimental, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz experimental para realização dos testes experimentais.

| <b>TESTES</b>  | <b>Valim.[in/min]</b>           | <b>Vsol. [cm/min]</b> | <b>Tipo de CP</b> |
|----------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|
| CHAPA 1        | 125                             | 25                    | Chanfro           |
| CHAPA 2        | 175                             | 25                    | Topo              |
| CHAPA 3        | 225                             | 55                    | Topo              |
| CHAPA 4        | 125                             | 40                    | Topo              |
| CHAPA 5        | 175                             | 40                    | Chanfro           |
| CHAPA 6        | 225                             | 25                    | Topo              |
| CHAPA 7        | 125                             | 55                    | Chanfro           |
| CHAPA 8        | 175                             | 55                    | Topo              |
| CHAPA 9        | 225                             | 40                    | Chanfro           |
| CHAPA 10       | 125                             | 25                    | Topo              |
| CHAPA 11       | 175                             | 55                    | Chanfro           |
| CHAPA 12       | 225                             | 25                    | Chanfro           |
| CHAPA 13       | 125                             | 40                    | Chanfro           |
| CHAPA 14       | 175                             | 40                    | Topo              |
| CHAPA 15       | 225                             | 55                    | Chanfro           |
| CHAPA 16       | 125                             | 55                    | Topo              |
| CHAPA 17       | 175                             | 25                    | Chanfro           |
| CHAPA 18       | 225                             | 40                    | Topo              |
| <b>LEGENDA</b> |                                 |                       |                   |
| Valim.         | Velocidade alimentação do arame |                       |                   |
| Vsol.          | Velocidade soldagem             |                       |                   |
| CP             | Corpo de Prova                  |                       |                   |



Baseado nos pré-testes, realizados na primeira visita técnica, e em uma reunião com a gerência da empresa, definiu-se que a qualidade dos cordões de solda seria avaliada pelas seguintes respostas: reforço, largura e penetração. Abaixo estão definidos os valores alvo considerados ótimos pela empresa:

- Reforço do cordão:  $2 \pm 1$  mm;
- Largura do cordão:  $11 \pm 2$  mm;
- Penetração:  $6 \pm 1$  mm (junta sem chanfro) e  $7 \pm 0,5$  mm (junta com chanfro);

#### **4.2 Segunda Visita Técnica**

Nesta segunda visita técnica foram realizados os testes da matriz experimental, sendo que foram medidos os valores de tensão e corrente fornecidos pela fonte de trabalho. Destaca-se que, antes da realização de qualquer teste, foi feita uma verificação da regulagem da velocidade de alimentação do arame, para constatação do valor fornecido pelo cabeçote. Os valores de tensão e corrente foram verificados com a ajuda de um alicate voltímetro-amperímetro.

Os testes experimentais foram realizados aleatoriamente, procurando não repetir nenhuma configuração, evitando assim a influência de fatores desconhecidos. As tensões e corrente encontradas nos testes podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz experimental com os dados obtidos em campo

| <b>TESTES</b>  | <b>Valim.<br/>(in/min)</b>         | <b>Vsol.<br/>(cm/min)</b> | <b>Tipo de CP</b> | <b>TENSÃO (V)</b> | <b>CORRENTE (A)</b> |
|----------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| CHAPA 1        | 125                                | 25                        | Chanfro           | 21,0              | 335                 |
| CHAPA 2        | 175                                | 25                        | Topo              | 19,0              | 370                 |
| CHAPA 3        | 225                                | 55                        | Topo              | 22,8              | 425                 |
| CHAPA 4        | 125                                | 40                        | Topo              | 20,8              | 345                 |
| CHAPA 5        | 175                                | 40                        | Chanfro           | 21,5              | 315                 |
| CHAPA 6        | 225                                | 25                        | Topo              | 22,6              | 445                 |
| CHAPA 7        | 125                                | 55                        | Chanfro           | 25,0              | 340                 |
| CHAPA 8        | 175                                | 55                        | Topo              | 20,0              | 375                 |
| CHAPA 9        | 225                                | 40                        | Chanfro           | 23,2              | 437                 |
| CHAPA 10       | 125                                | 25                        | Topo              | 20,7              | 346                 |
| CHAPA 11       | 175                                | 55                        | Chanfro           | 24,0              | 375                 |
| CHAPA 12       | 225                                | 25                        | Chanfro           | 19,0              | 305                 |
| CHAPA 13       | 125                                | 40                        | Chanfro           | 20,6              | 336                 |
| CHAPA 14       | 175                                | 40                        | Topo              | 21,0              | 375                 |
| CHAPA 15       | 225                                | 55                        | Chanfro           | 22,8              | 452                 |
| CHAPA 16       | 125                                | 55                        | Topo              | 25,4              | 322                 |
| CHAPA 17       | 175                                | 25                        | Chanfro           | 21,0              | 290                 |
| CHAPA 18       | 225                                | 40                        | Topo              | 23,3              | 426                 |
| <b>LEGENDA</b> |                                    |                           |                   |                   |                     |
| Valim.         | Velocidade de alimentação do arame |                           |                   |                   |                     |
| Vsol.          | Velocidade de soldagem             |                           |                   |                   |                     |

Na Figura 9 encontra-se a configuração adotada para fixação do corpo de prova, tencionando evitar o empenamento do corpo de prova durante a soldagem.



Figura 9 - Fixação dos corpos de provas.

Feitos os testes experimentais e cortados os corpos de prova, foram feitas medidas espaçadas e tiradas uma média dos valores do reforço do cordão, largura do cordão e penetração, de acordo com a Tabela 5, e foi feito uma inspeção visual do cordão e relacionado conforme Tabela 6.

Tabela 5 - Tabela de medidas do cordão de solda dos corpos de provas.

| <b>Nº DO CP</b> | <b>REFORÇO DO CORDÃO SOLDA (mm)</b> | <b>LARGURA DO CORDÃO SOLDA (mm)</b> |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>1</i>        | 3,0                                 | 6,4                                 |
| <i>2</i>        | 5,6                                 | 10,4                                |
| <i>3</i>        | 4,9                                 | 7,3                                 |
| <i>4</i>        | 3,5                                 | 7,7                                 |
| <i>5</i>        | 1,4                                 | 5,9                                 |
| <i>6</i>        | 6,4                                 | 10,3                                |
| <i>7</i>        | 0,0                                 | 6,3                                 |
| <i>8</i>        | 2,3                                 | 5,8                                 |
| <i>9</i>        | 3,4                                 | 7,2                                 |
| <i>10</i>       | 4,4                                 | 10,4                                |
| <i>11</i>       | 1,3                                 | 6,6                                 |
| <i>12</i>       | 5,3                                 | 9,4                                 |
| <i>13</i>       | 1,5                                 | 5,0                                 |
| <i>14</i>       | 4,1                                 | 7,6                                 |
| <i>15</i>       | 3,0                                 | 6,4                                 |
| <i>16</i>       | 1,6                                 | 10,2                                |
| <i>17</i>       | 0,0                                 | 5,0                                 |
| <i>18</i>       | 5,3                                 | 8,6                                 |

Pode-se verificar a penetração obtida em cada corpo de prova e os valores encontrados estão contidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Tabela de conclusão dos testes experimentais.

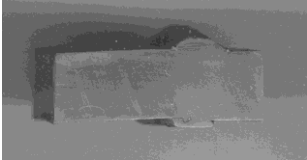
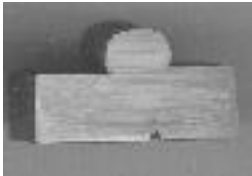
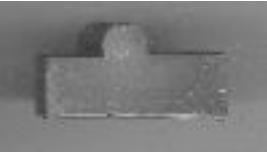
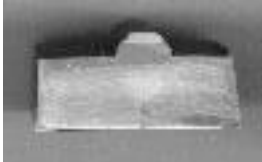


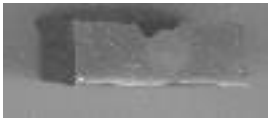
| FOTO DO CORPO DE PROVA  | Nº CORPO DE PROVA | PENETRAÇÃO (mm) | CARACTERÍSTICA DA SOLDA   |
|---|-------------------|-----------------|---|
|    | 1                 | 10              | Cordão muito instável e com aparência muito ruim. Muitos defeitos.              |
|    | 2                 | 7               | Reforço excessivo e má aparência do cordão.                                     |
|   | 3                 | 7,3             | Reforço excessivo.  |
|  | 4                 | 6,3             | Aparência ruim do cordão, existência de reforço excessivo.                      |
|  | 5                 | 5,8             | O cordão não preencheu todo o chanfro, sendo muito fino e houve muito respingo. |
|  | 6                 | 10              | Reforço excessivo e aparência do cordão muito ruim                              |
|  | 7                 | 9,3             | Sem preenchimento total do chanfro, boa aparência do cordão.                    |

Tabela 6 - Tabela de conclusão dos testes experimentais.

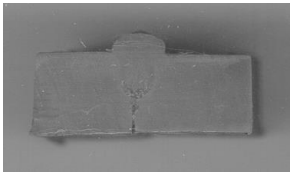
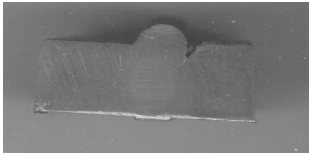

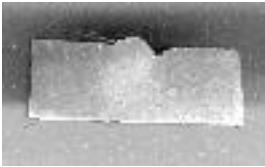
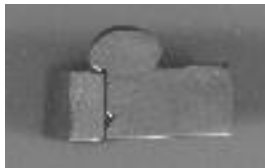
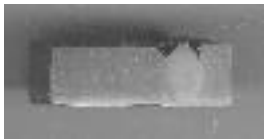
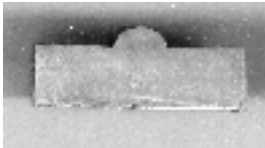
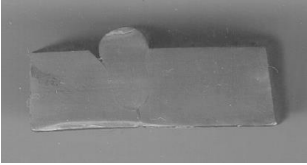
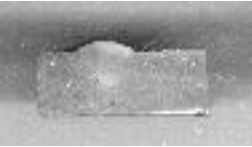
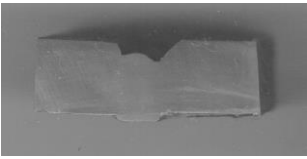
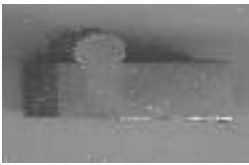
| <b>FOTO DO CORPO DE PROVA</b>   | <b>Nº CORPO DE PROVA</b> | <b>PENETRAÇÃO (mm)</b> | <b>CARACTERÍSTICA DA SOLDA</b>   |
|---|--------------------------|------------------------|--|
|    | <b>8</b>                 | <b>5,4</b>             | Cordão instável com aparência ruim.  |
|    | <b>9</b>                 | <b>8</b>               | Não houve deposição do material uniforme, ficando um vazio nas pontas.                             |
|   | <b>10</b>                | <b>5,1</b>             | Cordão com reforço excessivo.  |
|  | <b>11</b>                | <b>7,0</b>             | Não houve deposição do material uniforme, ficando um vazio nas pontas.                             |
|  | <b>12</b>                | <b>6</b>               | Cordão muito instável e com falhas, tendo um reforço excessivo. Ocorreu muitos respingos.          |
|  | <b>13</b>                | <b>10</b>              | Não houve deposição do material uniforme, ficando um vazio nas pontas e cordão com aparência ruim. |
|  | <b>14</b>                | <b>5,2</b>             | Má aparência do cordão.  |

Tabela 6 - Tabela de conclusão dos testes experimentais.

| <b>FOTO DO CORPO DE PROVA</b>   | <b>Nº CORPO DE PROVA</b> | <b>PENETRAÇÃO (mm)</b> | <b>CARACTERÍSTICA DA SOLDA</b>  |
|---|--------------------------|------------------------|---|
|    | <b>15</b>                | <b>6,7</b>             | Não houve deposição do material uniforme, ficando um vazio nas pontas. Cordão muito instável e aparência péssima. |
|    | <b>16</b>                | <b>5,2</b>             | Boa penetração e reforço ideal com boa aparência do cordão.   |
|    | <b>17</b>                | <b>8,0</b>             | Sem preenchimento total do chanfro.   |
|  | <b>18</b>                | <b>8,2</b>             | Reforço excessivo.  |

Analisando a Tabela 6, pôde-se verificar que os corpos de prova 7 e 16 foram os melhores, mas não os ideais. Para tanto, será necessário a realização de mais testes, para uma perfeita identificação da condição ótima. A escolha dos novos parâmetros utilizados para a melhor identificação do ponto ótimo foi baseada na análise das condições de soldagem empregadas nos testes 7 e 16, bem como na interpretação dos gráficos apresentados nas Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

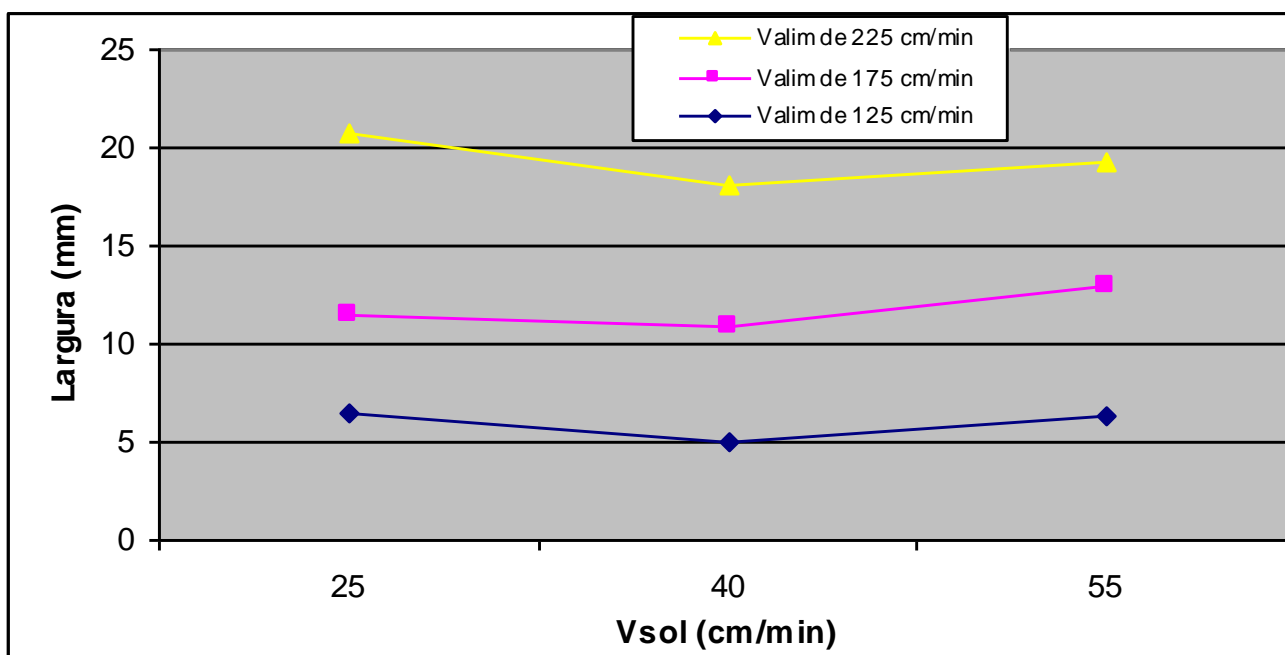


Figura 10 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação na largura do cordão dos corpos de provas com chanfro.

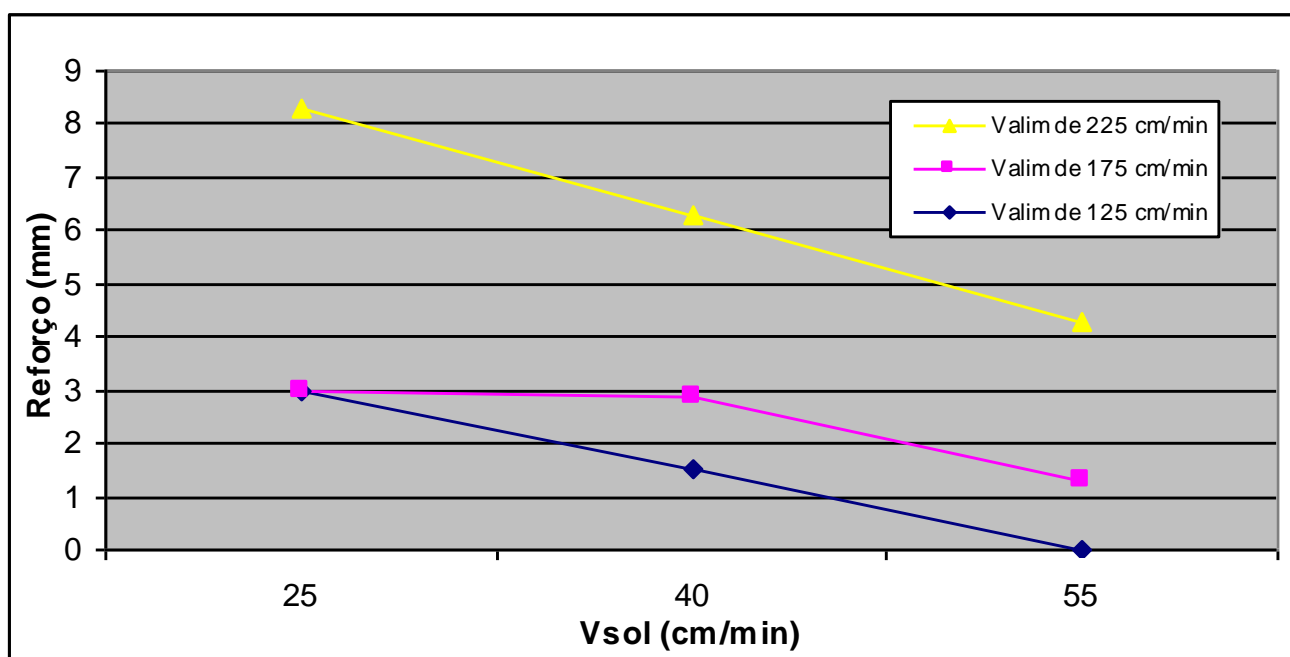


Figura 11 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação no reforço do cordão dos corpos de provas com chanfro.



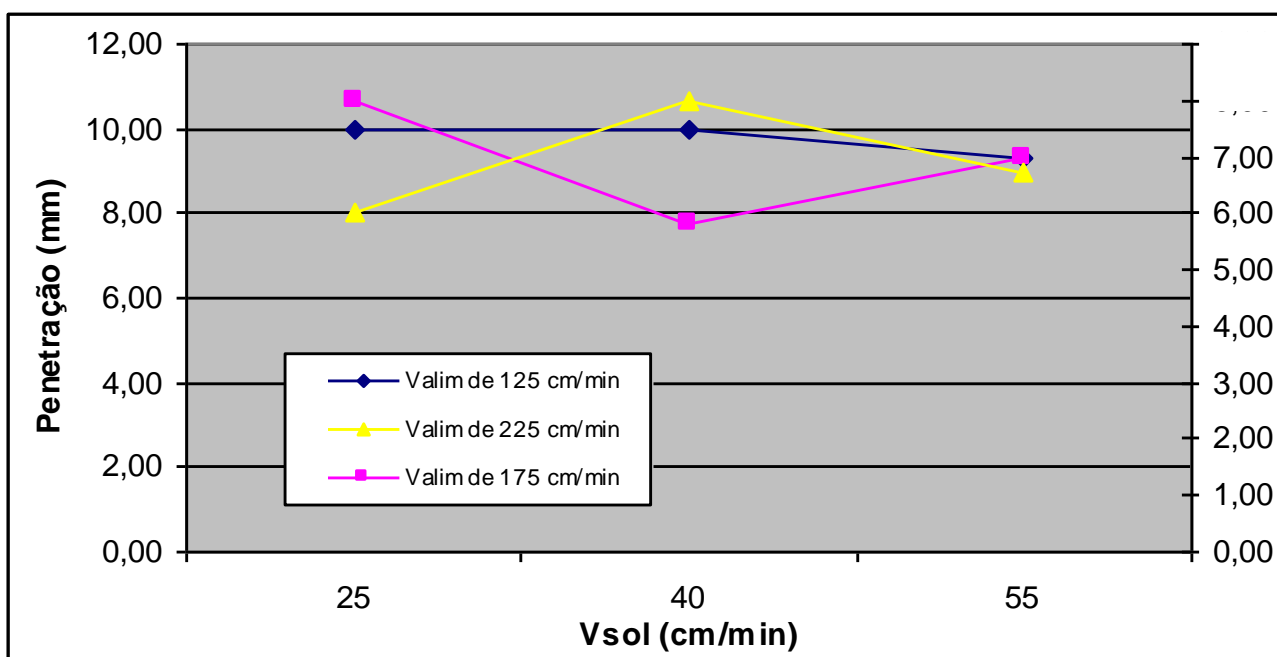


Figura 12 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação na penetração do cordão dos corpos de provas com chanfro.

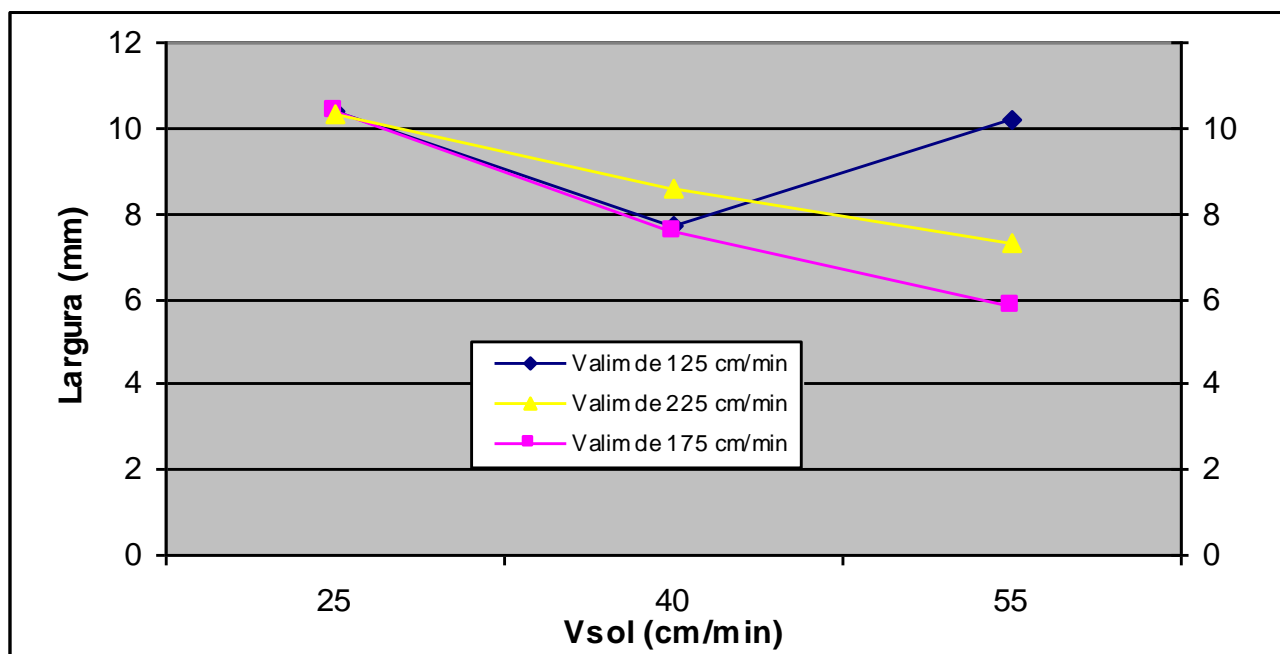


Figura 13 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação na largura do cordão dos corpos de provas sem chanfro.

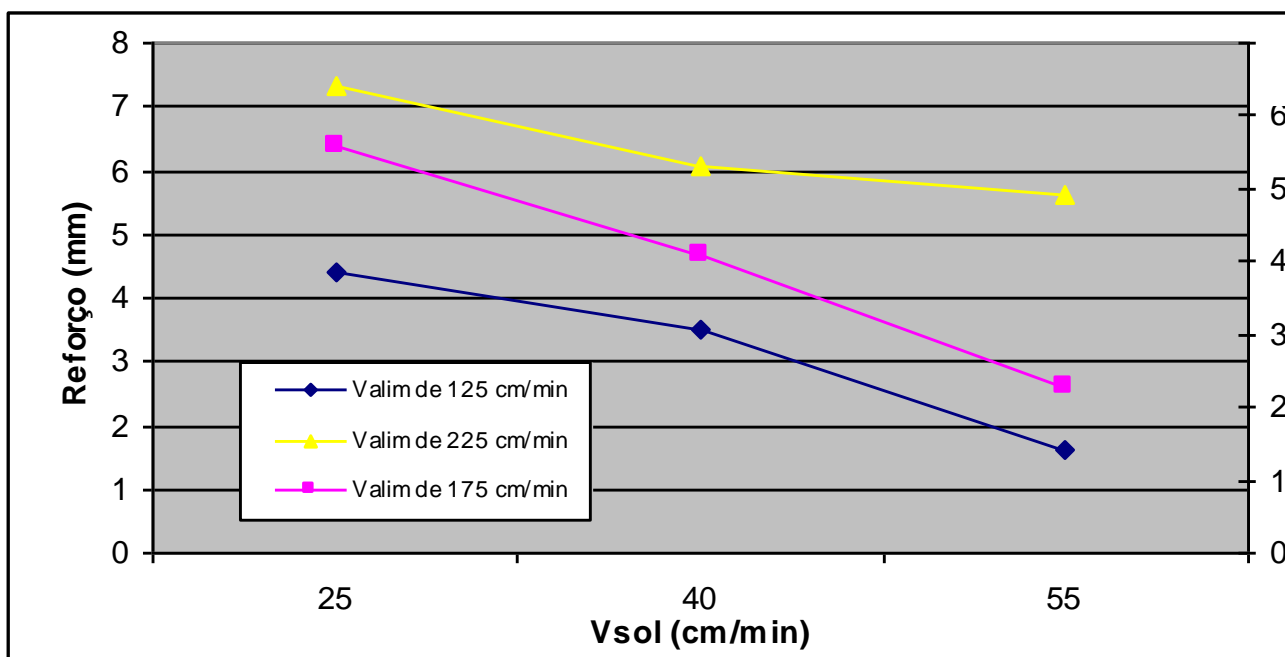


Figura 14 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação no reforço do cordão dos corpos de provas sem chanfro.

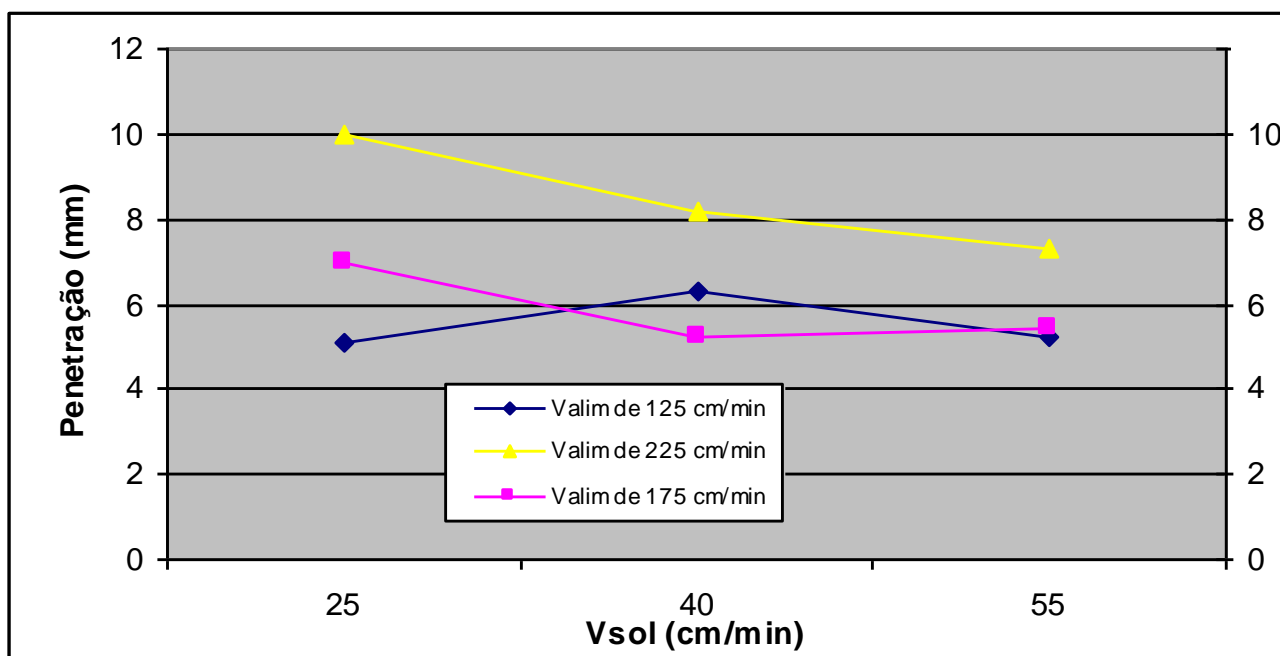


Figura 15 - Influência da velocidade de soldagem e velocidade de alimentação na penetração do cordão dos corpos de provas sem chanfro.

Com base na análise das Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15, escolheram-se novas condições de soldagem, de forma que as respostas analisadas se aproximem mais dos alvos escolhidos. A idéia é apresentar à empresa duas opções de junta, com as mesmas condições de qualidade, para que ela escolha a que achar mais interessante.

As alterações escolhidas envolveram a mudança do ângulo da tocha em 15° (sentido “puxando”) para o corpo de prova sem chanfro, e para a soldagem com chanfro utilizou-se a tocha em 90° com a peça a ser soldada, variando-se a velocidade de soldagem e de alimentação do arame. Para a realização destes testes de comprovação foi utilizado o stick-out de 15 mm. Todas estas modificações visaram basicamente o aumento da penetração (no caso da juntas sem chanfro) e um melhor preenchimento do chanfro. As configurações utilizadas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Matriz experimental do teste de comprovação.

| <b>Teste</b> | <b>Valim.<br/>(in/min)</b> | <b>Vsol.<br/>(cm/min)</b> | <b>Tipo de CP</b> | <b>Ângulo de inclinação<br/>da tocha</b> |
|--------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|--|
| CHAPA 1      | 125                        | 50                        | Topo              | 15°                                      |
| CHAPA 2      | 125                        | 50                        | Topo              | --                                       |
| CHAPA 3      | 150                        | 35                        | Chanfro           | --                                       |

### 4.3 Terceira visita técnica

Foram realizados os testes de comprovação em três novos corpos de provas, e os resultados deste teste de comprovação pode ser visualizado na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz experimental com os dados obtidos em campo do teste de comprovação.

| <b>Teste</b> | <b>Valim.<br/>(in/min)</b> | <b>Vsol.<br/>(cm/min)</b> | <b>Tipo de<br/>CP</b> | <b>Ângulo de<br/>inclinação da<br/>tocha</b> | <b>Tensão<br/>(V)</b> | <b>Corrente (A)</b> |
|--------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|--|-----------------------|---------------------|
| CHAPA 1      | 125                        | 50                        | Topo                  | 15°  | 23,2                  | 332                 |
| CHAPA 2      | 125                        | 50                        | Topo                  | --   | 24,6                  | 340                 |
| CHAPA 3      | 150                        | 35                        | Chanfro               | --   | 24,3                  | 345                 |

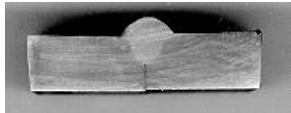
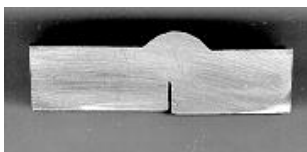
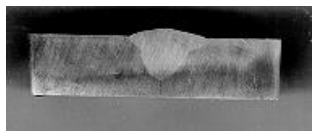
Os valores referentes a largura e reforço do cordão obtidos nos testes de comprovação estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela de medidas do cordão de solda dos corpos de provas do teste de comprovação.

| <b>Nº DO<br/>CP</b> | <b>REFORÇO DO CORDÃO<br/>SOLDA (mm)</b> | <b>LARGURA DO CORDÃO SOLDA<br/>(mm)</b> |
|---------------------|---|---|
| 1                   | 2,9                                     | 9,0                                     |
| 2                   | 2,3                                     | 9,8                                     |
| 3                   | 1,8                                     | 11,8                                    |

Pode-se encontrar na Tabela 10 os valores da penetração das soldas dos testes de comprovação, bem como as características das soldas.

Tabela 10 - Tabela de conclusão do teste de comprovação.

| <b>FOTO DO CORPO DE PROVA</b>   | <b>Nº CORPO DE PROVA</b> | <b>PENETRAÇÃO (mm)</b> | <b>CARACTERÍSTICA DA SOLDA</b>   |
|---|--------------------------|------------------------|--|
|  | <b>1</b>                 | <b>5,1</b>             | Bom acabamento do cordão, mas a largura foi um pouco abaixo do ideal (largura fina). |
|  | <b>2</b>                 | <b>5,9</b>             | Solda muito boa, com cordão muito bom em todos os parâmetros.                        |
|  | <b>3</b>                 | <b>6,8</b>             | Solda excelente, com cordão muito bom em todos os parâmetros. Não ocorreu vazamento. |

Com as características de cordão obtidas para este terceiro experimento, considera-se que foram alcançados os alvos estabelecidos pela empresa, ou seja, em todos os três experimentos houve penetração, reforço largura do cordão dentro da margem estipulada em conjunto com a empresa.

## 5. CONCLUSÃO

A Tabela 11 apresenta uma comparação entre o procedimento atualmente utilizado na empresa para soldagem com arame tubular e as duas sugestões de procedimento encontradas neste trabalho.

Tabela 11 - Tabela de comparação final.

| <b>Empresa</b>   | <b>1ª Sugestão: sem chanfro*</b>  | <b>2ª Sugestão: com chanfro</b>   |
|--|---|---|
| 1) Esmerilhamento para abertura do chanfro ½ V.  | 1) Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 50 cm/min.  | 1) Esmerilhamento para abertura do chanfro ½ V.   |
| 2) Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 8 cm/min.                              | 2) Soldagem da parte posterior ao primeiro cordão, sem esmerilhamento, com velocidade de soldagem de 50 cm/min. | 2) Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 35 cm/min.  |
| 3) Esmerilhamento oposto ao primeiro cordão até extrair parte de sua raiz (intermediário). |   | 3) Soldagem da parte posterior ao primeiro cordão, sem esmerilhamento, com velocidade de soldagem de 50 cm/min. |
| 4) Confeção do cordão com velocidade de soldagem de 8 cm/min.                              |   |   |

\*Na primeira sugestão, as penetrações obtidas já seriam suficientes para uma boa sobreposição de cordões. Mas pode-se aumentar a segurança da junta através de um esmerilhamento da parte posterior ao primeiro cordão.

Traçando um comparativo entre a primeira opção proposta com os valores utilizados pela empresa HZM, podemos constatar que a velocidade de soldagem aumentou em aproximadamente 6 vezes, e pode-se eliminar o tempo perdido com esmerilhamento para a abertura do chanfro.

Levando em consideração a segunda opção proposta, pode-se constatar que houve um aumento na velocidade de soldagem em 5 vezes, em relação as condições de soldagem utilizadas pela empresa HZM, e pode-se eliminar o esmerilhamento intermediário.

Como a velocidade de soldagem é um bom indicativo de produtividade, pode-se constatar que as configurações propostas oferecem um salto quantitativo na forma que as soldagens são feitas na empresa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Site da Lincoln Electric: [www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com)
- [2] Site da InforSolda : [www.inforsolda.com.br](http://www.inforsolda.com.br)
- [3] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Guia para normalização de referências bibliográficas: NBR 6023**. 2. ed. Vitória, 1997.