

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONRADO EMERICK ALBINO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO DE
SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO DE TUBOS DE CALDEIRA VIA MIG/MAG
CMT, UTILIZANDO INCONEL 625 COMO METAL DE ADIÇÃO**

FLORIANÓPOLIS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONRADO EMERICK ALBINO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO DE
SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO DE TUBOS DE CALDEIRA VIA MIG/MAG
CMT, UTILIZANDO INCONEL 625 COMO METAL DE ADIÇÃO**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia de Mecânica da Universidade
Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Jair Dutra, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONRADO EMERICK ALBINO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO AUTOMATIZADO DE
SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO DE TUBOS DE CALDEIRA VIA MIG/MAG
CMT, UTILIZANDO INCONEL 625 COMO METAL DE ADIÇÃO.**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Carlos Enrique Niño, Dr. Eng.

Coordenador do Curso

Jonny Carlos da Silva, Dr.Eng.

Professor da disciplina

Comissão Examinadora:

Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

Orientador

Cleber Marques, M. Eng.

Raul Gohr Junior, Dr. Eng.

Emerick Albino, Conrado, 1987-
Desenvolvimento de um procedimento automatizado de soldagem para o revestimento de tubos de caldeira via MIG/MAG CMT, utilizando Inconel 625 como metal de adição/Conrado Albino

38 f.: Il color.

Orientador: Dr. Eng. Jair Carlos Dutra

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, 2014.

1. Soldagem de Revestimento. 2. MIG/MAG CMT. 3. Análise experimental.

.

I. Dutra, Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Engenharia Mecânica.

Dedicado ao meu pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao LABSOLDA, pela oportunidade de estágio e possibilidade de desenvolver o presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra, por abrir as portas do LABSOLDA, orientar este trabalho e por ensinamentos diversos ao longo do estágio.

Ao Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pela coorientação no trabalho e experiência repassada durante o estágio.

Ao M. Eng. Cleber Marques, por conselhos diversos referentes à pesquisa realizada neste trabalho.

À toda equipe do LABSOLDA, pela amizade e aprendizado.

Ao CNPQ e à SPS, pela concessão de bolsas de estudo.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional durante todo o período da faculdade.

À minha banda, Kauê, André e Paulo, pela amizade e conselhos.

Ao Marcos, pela amizade que começou no ensino médio e se estendeu por toda a graduação.

À Jessica, pelo apoio, paciência, carinho e ajuda direta com o texto, revisando e dando sugestões.

“Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.”

Marie Curie

RESUMO

A busca por soluções para amenizar o problema da corrosão e erosão sofrida nos tubos de caldeira de usinas termoelétricas tem sido o foco de contínuas investigações científicas. Nesse contexto, o revestimento por soldagem tem se mostrado a melhor alternativa em termos de economia e qualidade alcançada. Bastante utilizado fora do Brasil, sabe-se que o Inconel 625 possui uma excelente resistência à corrosão em diversos meios, porém seu custo é muito elevado. Neste trabalho é desenvolvido um procedimento automatizado para a deposição de Inconel 625 pelo processo MIG/MAG CMT, com o feixe de tubos na posição plana, por sua facilidade de posicionamento. Nessa posição, o desafio está na soldagem dos cordões na lateral do tubo, onde há tendência de escorrimento da solda por ação da gravidade. Para o procedimento, utilizou-se em um primeiro momento arame com 1,0 mm de diâmetro e, posteriormente, testou-se a bitola de 1,2 mm. Por fim, foram realizados ensaios para análise do revestimento, no que diz respeito a ocorrência de defeitos, ao gasto de material e à diluição atingida. Verificou-se que o melhor procedimento desenvolvido é aquele com arame de 1,2 mm, que é estável e gera revestimentos de boa qualidade, porém espessos demais, o que resulta num alto custo de aplicação.

Palavras-chave: Desgaste em paredes d'água, Soldagem mecanizada, Cladding, MIG/MAG CMT, Inconel 625

ABSTRACT

Recently, scientific research has been devoted to the issue of boiler tubes which, in certain environments, grow deteriorated due to erosion and corrosion and need to be changed. In this context, overlay welding has been regarded as the better solution considering both cost and quality to attain an increase in the tubes lifetime. However, companies have shown great concern with the time dispended in repairing and the money spent in the process. Vastly used as filler metal for coating in such applications, the nickel super alloy Inconel 625 is known for its excellent corrosion resistance in hostile environments but it's very expensive. Thus, the aim of this work concerns the development of an automated welding procedure using Inconel 625 as filler metal, through CMT-GMAW, which allegedly welds with low dilution. Lastly, some essays were made aiming the analysis of the coating regarding the existence of welding defects, the amount of filler metal spent and the dilution of the weld.

Keywords: Boiler Tubes, Erosive Wear, Automated Welding, Overlay Welding, CMT-GMAW, Inconel 625.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1– Exemplo de tubos deteriorados devido a erosão e corrosão [13]..... | 01 |
| Figura 2– Soldagem automatizada para o revestimento de paredes de caldeiras | 02 |
| Figura 3– Vista esquemática da seção transversal de depósito em chapa plana para análise da diluição | 06 |
| Figura 4– Retração do arame após o contato com a poça de fusão no modo CMT | 07 |
| Figura 5– Curvas características no modo CMT | 08 |
| Figura 6– Corpo de prova utilizado nos ensaios | 12 |
| Figura 7– Bancada de soldagem. 1) Fonte de Soldagem CMT Advanced FRONIUS; 2) Manipulador Robótico UP-6 da MOTOMAN 3) Peça 4) Unidade de Refrigeração IMC UPR7500 5) Misturador de 5 Gases WITT KM-30 | 13 |
| Figura 8– Fonte FRONIUS 4000R CMT Advanced; 2) Tocha; 3) Buffer de arame..... | 14 |
| Figura 9– 1) Misturador de Gases WITT KM 30-5; 2) Cilindro contendo Argônio puro; 3) Cilindro contendo Hélio Puro; 4) Cilindro contendo Dióxido de Carbono..... | 15 |
| Figura 10– Analisador de misturas binárias da empresa THERMCO, modelo 6900..... | 17 |
| Figura 11– Sistema de medição dos parâmetros de tecimento do robô: em (A) Vista geral da bancada e em (B) detalhe do transdutor em contato com chapa de alumínio acoplada à tocha..... | 18 |
| Figura 12– Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem (SAP), com maleta e sensores..... | 18 |
| Figura 13– Parametrização para a soldagem das paredes d’água na posição plana fornecida pela Fronius (18)..... | 19 |
| Figura 14– Sobreposição defeituosa..... | 20 |
| Figura 15– Sobreposição satisfatória após alterações no gás de proteção | 20 |
| Figura 16– Esquema com a sequência de deposição dos cordões. 1) ‘Membrana’; 2) ‘Junção’; 3) ‘Lateral 1’; 4) ‘Lateral 2’; 5) ‘Topo’ | 21 |
| Figura 17– Esquema com ângulo de trabalho (em preto) e de tecimento (em vermelho), respectivamente, utilizados na soldagem de cordão para o arame de 1,0 mm: em (A) Ambos 0° para o ‘Membrana’; (B) 35° e 30° para o ‘Junção’; em (B) 30° e 30° para o ‘Lateral 1’; em (D) 30° e 30° para o ‘Lateral 2’; e em (E) ambos 0° para o ‘Topo’ | 22 |
| Figura 18– Revestimento resultante do procedimento desenvolvido com arame de 1,0 mm .. | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 19– Esquema representando ângulo de trabalho (em preto) e de tecimento (em vermelho), respectivamente, utilizados na soldagem de cada cordão para o arame de 1,2 mm: em (A) ambos 0° para o ‘Membrana’; em (B) 35° e 30° para o ‘Junção’; em (C) 35° e 30° para o ‘Lateral 1’; em (D) 35° e 30° para o ‘Lateral 2’; e em (E) ambos 0° para o ‘Topo’26 | 26 |
| Figura 20– Revestimento constando apenas do cordão ‘Membrana’26 | 26 |
| Figura 21– Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’ e ‘Junção’27 | 27 |
| Figura 22– Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’, ‘Junção’ e ‘Lateral 1’27 | 27 |
| Figura 23– Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’, ‘Junção’ e ‘Lateral 1’ e ‘Lateral 2’ 27 | 27 |
| Figura 24– Revestimento finalizado, constando de todos os cordões em ambos os lados do tubo.....28 | 28 |
| Figura 25– Manchas de oxidação na superfície do cordão de topo.....30 | 30 |
| Figura 26– Colisão da tocha com o revestimento durante tecimento.....30 | 30 |
| Figura 27– Oscilogramas de (A) corrente e (B) tensão para o arame de 1,0 mm.....31 | 31 |
| Figura 28– Oscilogramas de (A) corrente e (B) tensão para o arame de 1,2 mm.....32 | 32 |
| Figura 29– Macrografia do revestimento realizado com arame de 1,0 mm em região compreendendo tubo e membranas vizinhas: em (A) a região de maior espessura e em (B) a região de menor espessura.....33 | 33 |
| Figura 30– Macrografia do revestimento realizado com arame de 1,2 mm em região compreendendo tubo e membranas vizinhas: em (A) a região de maior espessura e em (B) a região de menor espessura.....33 | 33 |
| Figura 31– Macrografia do revestimento feito com arame de 1,0 mm, com linha traçada para cálculo da diluição.....34 | 34 |
| Figura 32– Macrografia do revestimento feito com arame de 1,2 mm, com linha traçada para cálculo da diluição.....34 | 34 |
| Figura 33– Revestimento com dois cordões de topo36 | 36 |
| Figura 34– Rotação da peça para realização da soldagem na posição plana.....36 | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1– Composição química nominal do Inconel 625 | 9 |
| Tabela 2– Composição química nominal do 16Mo3..... | 11 |
| Tabela 3– Parâmetros de soldagem para o procedimento com arame de 1,0 mm..... | 23 |
| Tabela 4– Parâmetros para soldagem em chapa plana utilizando arame de 1,2 mm [20]..... | 25 |
| Tabela 5– Parâmetros de soldagem para o procedimento com arame de 1,2 mm..... | 28 |
| Tabela 6– Valores médios medidos pelo SAP para as duas bitolas..... | 31 |

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

f , frequência, [Hz]

V_a , Velocidade de alimentação do arame, [m/min]

V_s , Velocidade de soldagem, [cm/min]

a , Amplitude de tecimento, [mm]

I_m , Corrente média de soldagem, [A]

U_m , Tensão média de soldagem, [V]

α_{tocha} , Ângulo de ataque da tocha, [graus]

P , Potência de soldagem, [W]

ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG/MAG - Metal Inert Gas/Metal Active Gas

TIG – Tungsten Inert Gas

CMT - Cold Metal Transfer

DBCP - Distância bico de contato/peça

LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina

SAP – Sistema de Aquisição Portátil

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

H₂ - Hidrogênio

He – Hélio

Ar – Argônio

CO₂ – Dióxido de Carbono

SUMÁRIO

| | |
|---|--------------------------------------|
| 1- INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos e Motivação..... | 4 |
| 1.2 Estrutura do documento..... | 4 |
| 2-FUNDAMENTOS..... | 5 |
| 2.1 Soldagem de revestimento..... | 5 |
| 2.2 MIG/MAG CMT..... | 6 |
| 2.3 Inconel 625..... | 9 |
| 3- MATERIAIS E MÉTODOS..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.1 Materiais..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.1.1 Metal de base..... | 11 |
| 3.1.1 Metal da adição..... | 12 |
| 3.2 Equipamentos de soldagem..... | 12 |
| 3.3 Procedimento de soldagem..... | 18 |
| 3.2.1 Ensaios com arame de 1,0 mm..... | 18 |
| 3.2.2 Ensaios com arame de 1,2 mm..... | 24 |
| 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 29 |
| 4.1 Análise superficial dos depósitos..... | 29 |
| 4.1.1 Revestimento com arame de 1,0 mm..... | 29 |
| 4.1.2 Revestimento com arame de 1,2 mm..... | 29 |
| 4.2 Análise do processo via SAP..... | 30 |
| 4.3 Análise macrográfica..... | 32 |
| 4.3.1 Revestimento com arame de 1,0 mm..... | 32 |
| 4.3.2 Revestimento com arame de 1,2 mm..... | 33 |
| 4.4 Análise da diluição..... | 33 |
| 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 35 |
| 5.1 Conclusões..... | 35 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros..... | 35 |
| REFERÊNCIAS..... | 37 |

1- INTRODUÇÃO

Necessidades produtivas advindas de um estado de crescimento econômico, como o que atravessa o Brasil, demandam um crescente consumo de energia elétrica. Em virtude deste cenário, e buscando conciliar oferta e demanda energética, há uma preocupação com a ampliação de parques energéticos e, em curto prazo, com a melhora de parques já existentes.

Nesse contexto, a importância da geração de energia termoelétrica no Brasil é tal que, hoje, corresponde a 26,2% da geração total de energia elétrica no país. Essa importância é ampliada ao se levar em conta períodos de estiagem, uma vez que, diferentemente de hidrelétricas, de onde provém a maior fração (69%), fornecem energia de forma constante durante o ano todo [1]. No entanto, um problema recorrente na geração térmica diz respeito à paradas na produção para manutenção preventiva e corretiva, devido a redução de espessura sofrida por tubos de caldeira pela ação combinada de erosão (causada pelo impacto com partículas sólidas resultantes da queima do carvão) e corrosão à alta temperatura (Figura 1). Esse desgaste aumenta até o ponto onde a produção precisa ser interrompida para que se efetue o reparo, o que causa considerável prejuízo econômico durante o tempo no qual a caldeira permanece inativa.



Figura 1 – Exemplo de tubos deteriorados devido a erosão e corrosão [2]

Buscando aumentar a vida útil dos tubos e, conseqüentemente, o intervalo entre paradas para manutenção preventiva, tem se tornado prática comum o revestimento por soldagem com ligas nobres, mais resistentes à erosão e corrosão, tanto na recuperação a ser realizada *in loco* quanto em tubos novos, que substituem tubos deteriorados. Especificamente, tem-se optado

pela soldagem robotizada, por proporcionar maior repetitividade, qualidade e produtividade ao processo.



Figura 2 - Soldagem automatizada para o revestimento de paredes de caldeiras

Nesse contexto, o LABSOLDA busca em conjunto com empresa parceira do setor energético soluções que visam prolongar a vida útil dos tubos, a fim de reduzir gastos com manutenção e aumentar o intervalo entre paradas. Especificamente, este Trabalho de Curso propõe o desenvolvimento de um procedimento automatizado para o recobrimento de paredes novas, que devem substituir paredes já desgastadas. Soma-se, portanto, a inúmeros projetos de PD&I do laboratório que atacam a problemática tanto desenvolvendo equipamentos para a recuperação no local, como manipuladores robóticos, quanto desenvolvendo procedimentos para o revestimento prévio.

Trata-se, portanto, de uma investigação cujo interesse científico está na análise de um caso específico para que se alcance uma visão mais abrangente e geral sobre a problemática, e elucide alguns pontos para pesquisas futuras. Isso, no entanto, não significa que os elementos que constituem o procedimento foram escolhidos de maneira arbitrária e cabe, portanto, justificar brevemente como se deu a opção por cada um. A escolha pela automatização do procedimento justifica-se por aumentar a produtividade e conferir uniformidade ao revestimento. Já a opção pela variante CMT (Cold Metal Transfer) do processo MIG MAG se dá pela estabilidade do processo e por conferir baixa diluição à solda, fator altamente desejável em soldagens de revestimento. O uso do Inconel 625 é motivado por possuir excelentes propriedades de resistência à corrosão a alta temperatura e à fadiga térmica. Por fim, optou-se pela posição plana como uma alternativa para os procedimentos até então desenvolvidos no laboratório, pois há grande dificuldade de posicionamento dos tubos na

posição vertical, tendo em vista sua disposição na forma de paredes d'água que podem chegar a vários metros de comprimento. Isso dificulta o manejo da peça e acarreta em perda de produtividade, pois aumenta o tempo gasto com a preparação. Com a peça na horizontal há maior facilidade operacional, mas como trata-se de uma superfície irregular, a soldagem nessa posição apresenta algumas dificuldades relacionadas ao escoamento da poça nas regiões laterais do tubo, devido ao efeito da gravidade, sendo esse o principal desafio na obtenção do procedimento.

1.1 Objetivos e Motivação

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um procedimento de soldagem automatizado para o revestimento prévio de tubos de caldeira na posição plana através da variante CMT do processo MIG/MAG, utilizando Inconel 625 como metal de adição. Objetiva-se que o revestimento obtido apresente baixa diluição entre metal de adição e substrato, para que conserve boas propriedades de resistência a corrosão. Outro fator importante a se atentar é a espessura de camada, que não deve ser muito espessa pois indicará um alto gasto de material e, portanto, um alto custo para a aplicação. A intenção é que o desenvolvimento seja posteriormente comparado com outros que utilizam diferentes processos e metais de adição.

Em sentido amplo, o presente trabalho busca contribuir com ganhos em qualidade e produtividade no setor energético através do revestimento automatizado de tubos de caldeira.

1.2 Estrutura do documento

No primeiro capítulo, buscou-se contextualizar o trabalho e, de maneira resumida, introduzir seus objetivos. No segundo capítulo, é realizada a fundamentação teórica de elementos inerentes à problemática, de maneira mais abrangente àquela mencionada na introdução. No terceiro capítulo, são apresentadas a bancada e a metodologia por meio da qual se realizaram os ensaios. No quarto capítulo, os resultados são apresentados e discutidos. Por fim, o último capítulo sumariza as conclusões e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2–FUNDAMENTOS

2.1 Soldagem de Revestimento

Apesar de considerada tradicionalmente como um processo de união, verifica-se cada vez mais em meios industriais a utilização de processos de soldagem na deposição de certos materiais sobre substratos, objetivando a recuperação de peças desgastadas ou a formação de um revestimento com características especiais. Revestimentos realizados deste modo são feitos de forma rápida e econômica, e diferentes processos de soldagem competem entre si para que se descubra qual o mais adequado para cada situação.

Dentro da problemática do combate ao desgaste dos tubos de caldeira, o revestimento por soldagem apresenta melhor desempenho quando comparado àquele obtido por meio da aspersão térmica (alternativa inicialmente testada), pois promove a ligação metalúrgica entre revestimento e substrato, ao passo que este último promove apenas adesão mecânica. Segundo Blogg e Rezakhani, citados por Silva [4], a união via soldagem previne falhas locais de adesão que, no caso da aspersão térmica, podem levar ao destacamento de parte do revestimento por fadiga térmica. Isso se dá pois metal de base e de adição são constituídos de materiais distintos, com diferentes coeficientes de dilatação térmica, e expostos a situações de ciclo térmico. KIM, também citado por Silva [4], afirma que depósitos por aspersão térmica também pecam pela presença de porosidade, facilitando o contato de elementos corrosivos com o substrato.

No entanto, apesar de ser uma excelente opção para o revestimento dos tubos, a soldagem de revestimento apresenta um inconveniente relacionado à união metalúrgica, que se dá por meio de fenômenos complexos como fusão e solidificação de um volume de material composto por ligas distintas. Trata-se de variações quanto à composição química, estrutura cristalina e microestrutura na região da solda composta de metais dissimilares, decorrentes da diluição do metal de base no metal de solda, como investigado por Silva [5]. Tais variações estão estreitamente relacionadas a propriedades físicas e químicas de interesse do revestimento, como a resistência a corrosão, e, embora inerentes ao processo, almeja-se que essas variações sejam tão pequenas quanto possível para que o revestimento conserve-se puro e mantenha as propriedades pretendidas.

Estudos conduzidos por Gittos e Gooch [6] investigam o efeito da diluição do ferro na resistência à corrosão de revestimentos compostos por ligas de níquel da família Ni-Cr-Mo, e

estabelecem 5% como o percentual ótimo, embora afirmem não ser a presença do ferro em si o fator prejudicial à resistência, e sim a carência de elementos de liga, principalmente Cr e Mo, na solda após a solidificação.

Já Kumar et al. [7] mostram que, para o mesmo aporte térmico, pode haver grande variação na diluição a depender do processo e dos parâmetros de soldagem, e confirmam como 5% o grau de diluição do ferro abaixo do qual não há perda significativa na resistência a corrosão.

Uma maneira de se analisar a diluição é através do corte transversal da região de interesse no cordão e, após preparação metalográfica, no cálculo do percentual da solda que penetra no metal de base em relação à área completa do cordão. O esquema é ilustrado na Figura 3, que representa a seção transversal de um depósito em chapa plana:

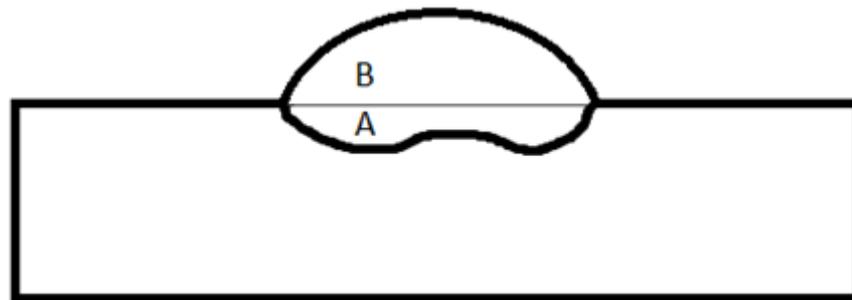


Figura 3 – Vista esquemática da seção transversal de depósito em chapa plana para análise da diluição

$$Diluição (\%) = \frac{\text{Área A}}{\text{Área A+B}} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Dessa forma, para que se aprimore o processo e se atinja condições de soldagem otimizadas, com fins industriais, é necessário buscar soluções de compromisso, balanceando fatores como diluição, baixa ocorrência de defeitos e bons índices de produtividade.

2.2 MIG/MAG CMT

Desde seu surgimento na década de 1940, o processo de soldagem MIG/MAG foi amplamente utilizado devido a alta produtividade que se atinge por meio de sua alta taxa de deposição, facilidade de manuseio por parte do soldador e sua adequação à automação da operação de soldagem. No entanto, quando a aplicação exigia soldas de melhor qualidade, a

opção frequentemente era pelo processo TIG, que gera soldas livres de respingos, com melhores propriedades mecânicas e menos defeitos.

Com o passar do tempo, desenvolvimentos tecnológicos e na eletrônica de potência aplicada às fontes de soldagem possibilitaram o advento de fontes que permitem uma maior atuação nos parâmetros de soldagem, através do controle do formato das ondas de corrente e tensão. Tais desenvolvimentos possibilitaram o surgimento de diversas variantes do processo MIG/MAG, que surgiram como métodos de controle destinados a aplicações específicas.

Uma dessas variantes a se sobressair no âmbito dos revestimentos foi o MIG/MAG pulsado que, segundo Rappl [8], propicia altas velocidades de soldagem sem que a solda seja prejudicada. Isso se dá porque o processo ocorre mediante uma quantidade pequena de calor, o que mantém a diluição em níveis baixos e, conseqüentemente, o teor de cromo e a resistência a corrosão em patamares aceitáveis. A explicação está na forma de onda de corrente imposta pela fonte, que alterna picos onde a gota é transferida à poça por vôo livre, e baixas correntes de base, com intensidade suficiente apenas para manter a abertura do arco.

Lançada pela empresa austríaca FRONIUS em 2004, o CMT (Cold Metal Transfer) é outra dessas variantes. Ele proporciona arcos mais estáveis e livres de respingos através de uma pulsação dinâmica do arame, que retrai quando da ocorrência de curtos-circuitos (Figura 4), enquanto ocorre, simultaneamente, uma redução na corrente de soldagem. Ou seja, o processo acrescentou o movimento de recuo para suavizar a constricção da gota, a fim de possibilitar a transferência metálica com curto-circuito sem a dependência de altos níveis de corrente (responsáveis pelo efeito pinch).

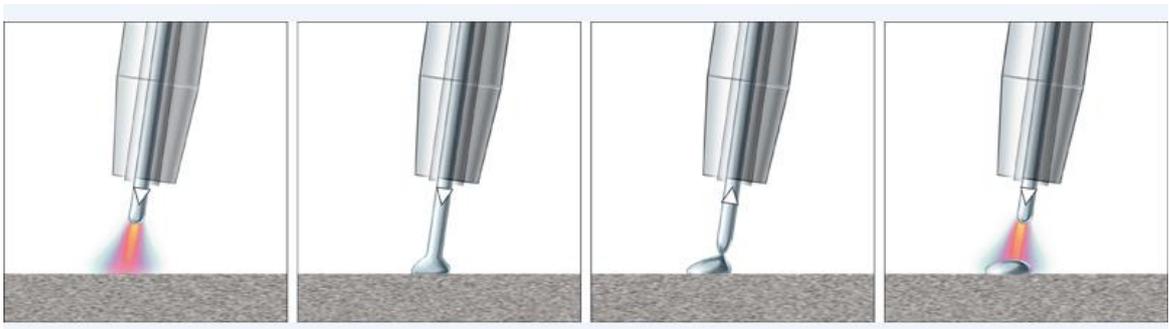


Figura 4 – Retração do arame após contato com a poça de fusão no modo CMT

A Figura 5 representa uma visão geral de curvas características associadas ao processo, conforme informações concedidas pelo fabricante [9]. O ciclo, a começar pelo curto-circuito, pode ser descrito da seguinte maneira: Após o curto, o arame inicia o movimento de recuo e

há a reabertura do arco. Então, um pulso de corrente fornece a energia para que se forme a gota metálica na extremidade do arame-eletrodo, enquanto o arame é alimentado. Para que se evite a formação de respingos, a corrente é em seguida reduzida para níveis baixos, para que o curto seguinte ocorra de maneira estável e sem maiores turbulências. Após o contato entre gota e poça, a tensão cai a um valor próximo de zero e ocorre a desaceleração do movimento do arame.

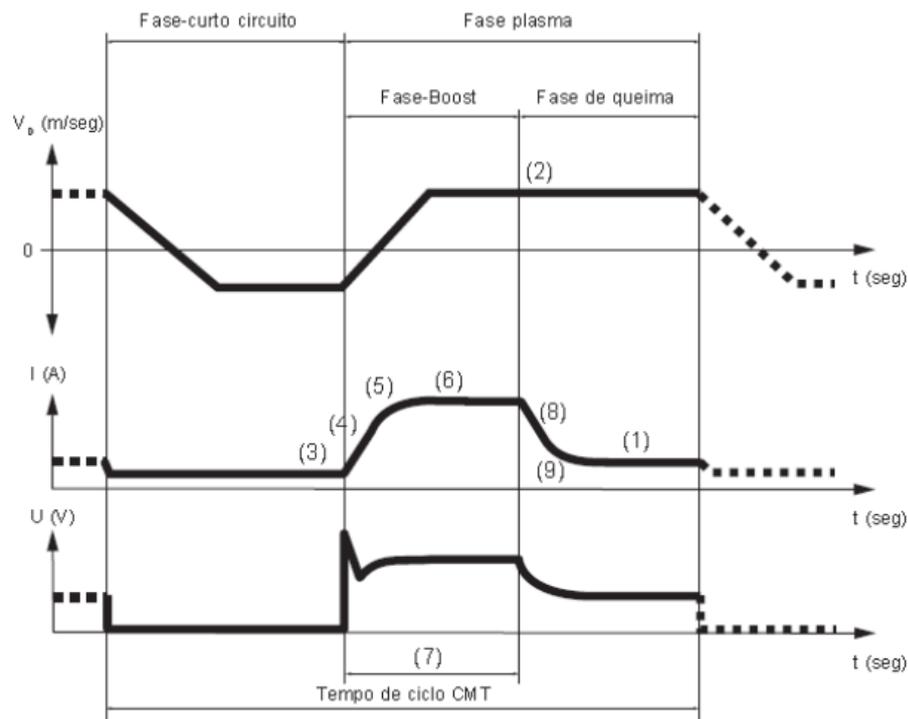


Figura 5 – Curvas características do modo CMT [9]

Embora o objetivo original tenha sido a soldagem de chapas finas e de união de aço com alumínio, a versatilidade do processo sido comprovada desde então ao demonstrar-se eficiente adicionalmente em soldagens de revestimento [10, 12] e de passe de raiz [13, 14]. No âmbito das soldagens de revestimento, a característica chave pela qual o CMT se destaca é a baixa diluição atingida. Outra característica importante é o reduzido volume de salpicos, já que os momentos de início e fim do curto-circuito, onde eles tendem a se formar, ocorrem de forma suave em baixos níveis de corrente. Ou seja, apesar de vários trabalhos utilizarem o fato de ser um processo “frio” como justificativa pela boa performance da variante, segundo Marques [11], o CMT apresenta maior potência quando comparado ao MIG convencional, e os bons resultados se devem principalmente ao seu controle na transferência metálica, sua estabilidade e perfeita cadência entre as fases de alta e baixa energia.

Vale notar que a Fronius, para determinados pares de metal de adição e gás de proteção, oferece curvas sinérgicas em sua fonte que possibilitam o ajuste automático de corrente e tensão médias de soldagem para uma dada velocidade de arame definida pelo usuário, com base em testes experimentais. Isso proporciona uma rapidez maior nas pesquisas, pois reduz a quantidade de parâmetros a serem regulados na busca por um cordão estável, principalmente ao se levar em conta a complexidade inerente a um processo controlado. Além da velocidade de arame, há ainda um fator de correção controlável pela fonte, responsável pelo controle da altura de arco.

Dentre as variantes do CMT, o CMT Pulse combina ciclos de CMT com ciclos de pulsação de corrente, fazendo com que a transferência metálica alterne entre curto-circuito e destacamento de gotas por voo livre. O CMT Advanced explora a inversão de polaridade, que alterna com ciclos CMT, tendo por intenção reduzir o aporte térmico enquanto se aumenta a taxa de fusão. Misturando características das variantes anteriores, o CMT Pulse Advanced combina ciclos de CMT na polaridade negativa com ciclos de pulsação de corrente na polaridade positiva. Maiores detalhes sobre cada uma das variantes citadas fogem do escopo deste trabalho e não serão abordados aqui.

2.3 Inconel 625

Desenvolvido em 1964, o Inconel 625 é uma liga a base de níquel, da família Ni-Cr-Mo, que se destaca por possuir elevada resistência mecânica à alta temperatura, boa soldabilidade e excelente resistência a oxidação [15]. Sua composição pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química nominal do Inconel 625

| | %Ni | %Cr | %Mo | %Nb+Ta | %Fe |
|-------------|-----|-------|------|-----------|-----|
| Inconel 625 | 58 | 20-23 | 8-10 | 3,15-4,15 | 5 |

Outra propriedade importante é a elevada resistência a corrosão em vários meios, que tem tornado a liga aplicável a vários setores industriais, notadamente na indústria petroquímica, nuclear e, tema do presente trabalho, de geração térmica. Essa alta resistência decorre da formação de um filme passivo de óxido de cromo sobre a superfície da liga, que protege o material contra o meio corrosivo.

Segundo Silva [5], entre os fatores que destacam o Inconel 625 perante outras ligas à base de níquel estão a adição de Mo e o alto teor de Cr, que aumentam a resistência a alta

temperatura em variados meios corrosivos. Adicionalmente, há o baixo teor de ferro e carbono, cuja intenção principal é minimizar a precipitação nos contornos de grão após a solidificação.

Visando o estudo das mudanças microestruturais e microquímicas durante a solidificação do Inconel 625 para compreender a relação entre aspectos metalúrgicos e propriedades da solda, Silva [5] investigou ensaios utilizando o processo TIG Hot Wire com depósito de Inconel 625 em substratos de aço C-Mn, e identificou a formação de fases secundárias ricas em Nb, as quais relacionou à tendência à ocorrência de trincas de solidificação. Adicionalmente, Silva [5] também indicou a segregação do Mo (relacionado à formação da camada apassivadora) como fortemente responsável pela queda na resistência à corrosão da zona fundida.

Pesquisas conduzidas por Dooley envolvendo simulações em laboratório [17] mostram que o Inconel 625 possui propriedades superiores ao aço 309, principal alternativa no revestimento dos tubos de caldeira, tanto quanto à resistência à corrosão quanto à erosão. No entanto, o alto preço do material constitui-se num fator limitante ao seu emprego, o que estabelece medidas que visam desenvolver um procedimento que evite o gasto excessivo do material durante a aplicação do recobrimento, como o controle da espessura de camada e da sobreposição entre cordões.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado na obtenção do procedimento foi a obtenção dos parâmetros preliminarmente em chapas planas, e posteriormente a aplicação nos tubos, fazendo adaptações conforme necessário. Mais detalhes serão dados mais à frente no texto, na descrição detalhada sobre os procedimentos com arame de 1,0 mm e 1,2 mm de diâmetro.

3.1 Materiais

3.1.1 Metal de base

As chapas planas utilizadas para obtenção inicial dos parâmetros, onde se realizaram testes diversos, consistem de aço ABNT 1020. Foram usadas várias e de dimensões variáveis ao longo dos testes, uma vez que não se exigiu rigor quanto à sua espessura. Antes dos ensaios, todas foram esmerilhadas previamente para remoção de oxidações.

Já o corpo de prova que emula a parede d'água consiste do aço resistente à fluência 16Mo3, cuja composição química nominal está na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química nominal do aço 16Mo3

| | %C | %Si | %Mn | %P | S | Cu | Cr | Ni | Mo |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 16Mo3 | 0,16 | 0,35 | 0,65 | 0,02 | 0,01 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |

O mesmo feixe de tubos de 80 cm de comprimento foi usado nos ensaios de arame de 1,0 mm e 1,2 mm, constando de tubos de 38 mm de diâmetro externo e 5,5 mm de espessura de parede previamente soldados via MIG/MAG manual às membranas (Figura 6).



Figura 6 – Corpo de prova utilizado nos ensaios

Durante a limpeza da peça a solda que une tubo e membranas precisou ser desbastada, devido a sua geometria irregular decorrente da soldagem manual, a fim de que se obtivesse certa suavidade na interface tubo-membrana. Este procedimento é importante pois irregularidades geométricas afetam em grande medida a estabilidade da poça na soldagem com Inconel 625, devido a sua alta tensão superficial.

3.1.2 Metal de adição

Para a deposição da camada de revestimento inicialmente foi utilizado o arame maciço AWS ER-NiCrMo-3 com 1,0 mm de diâmetro, o qual corresponde à liga Inconel 625. Posteriormente, mudou-se para a bitola de 1,2 mm.

3.2 Equipamentos de soldagem

A Figura 7 ilustra a bancada onde os experimentos foram realizados.

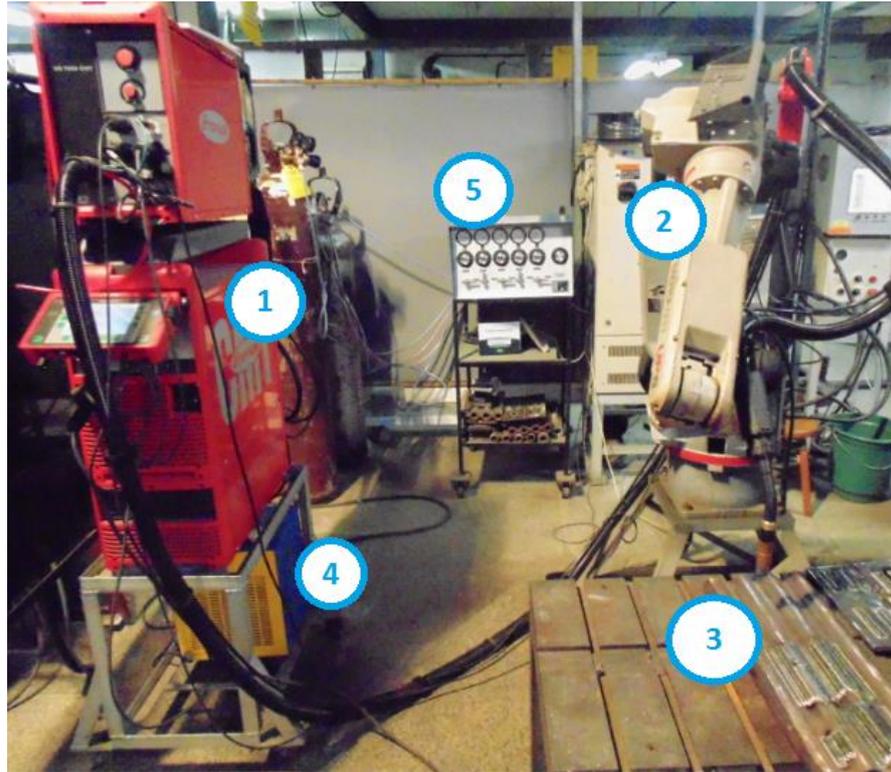


Figura 7 – Bancada de soldagem. 1) Fonte de Soldagem CMT Advanced FRONIUS; 2) Manipulador Robótico UP-6 da MOTOMAN 3) Peça 4) Unidade de Refrigeração IMC UPR7500 5) Misturador de 5 Gases WITT KM-30

O manipulador utilizado no desenvolvimento dos procedimentos automatizados foi o robô antropomórfico UP-6 MOTOMAN (Figura 7-2), devido à robustez na execução de movimentos. Como o sistema aceita conexões com periféricos, é possível programar os comandos de início e fim da soldagem na respectiva seqüência de programação do robô com a execução de trajetórias. Alguns ensaios instrumentados foram realizados para verificar a precisão dos movimentos, se os valores programados coincidem com a movimentação real, e serão tratados mais à frente.

A fonte de soldagem utilizada foi a CMT Advanced 4000R da FRONIUS. A Figura 8 ilustra a fonte e apresenta alguns de seus componentes em detalhes.



Figura 8 – 1) Fonte FRONIUS 4000R CMT Advanced; 2) Tocha; 3) Buffer de arame

Na tocha (Figura 8-2) há um motor complementar ao presente no cabeçote alimentador. Enquanto o motor do cabeçote alimenta o arame de maneira linear, o motor da tocha é responsável pelos movimentos em alta frequência de avanço e recuo do arame, inerentes ao processo CMT. Para que isso ocorra, acontece no buffer (Figura 8-3) a compensação do arame, onde é absorvido o movimento de recuo e suprido o motor da tocha.

Durante os ensaios, foram usadas misturas diversas envolvendo os gases Hélio, Argônio e Dióxido de Carbono. Para isso, utilizou-se o misturador de 5 gases da WITT, modelo KM 30-5 (Figura 9).



Figura 9 – 1) Misturador de Gases WITT KM 30-5; 2) Cilindro contendo Argônio puro; 3) Cilindro contendo Hélio puro; 4) Cilindro contendo Dióxido de Carbono

Dado o número de parâmetros envolvidos nos ensaios, é de extrema importância em soldagem a constante verificação de cada item da bancada, pois pequenos desvios podem levar a resultados distantes do almejado. Além disso, a certeza nos parâmetros regulados garante uma maior repetitividade para o procedimento. Para este fim, alguns ensaios instrumentados foram realizados para que se verificassem imprecisões na movimentação do robô e na composição do gás de proteção, e se tivesse ciência dos valores reais.

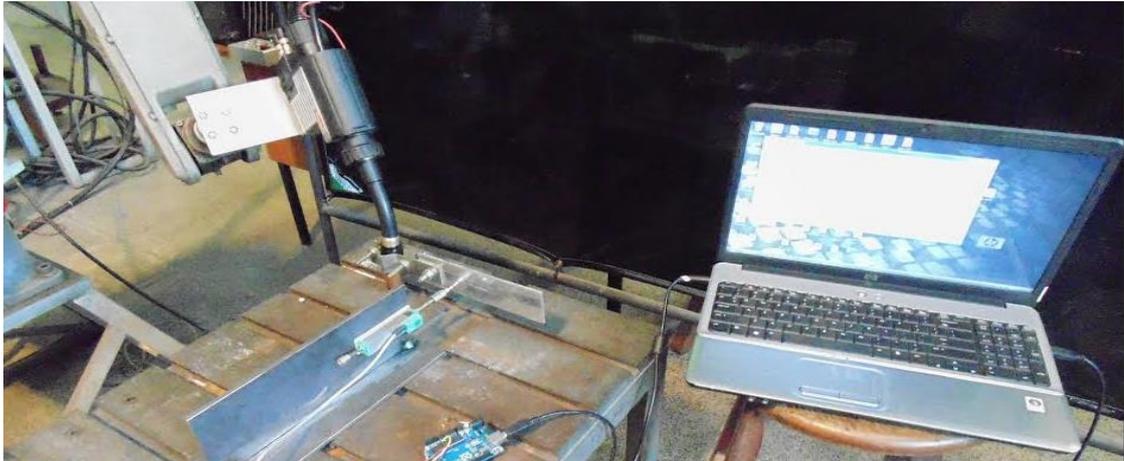
Visando verificar se a composição do gás de saída do misturador corresponde à definida, foi utilizado um analisador de gás da empresa THERMCO, modelo 6900 (Figura 10).



Figura 10 – Analisador de misturas binárias da empresa THERMCO, modelo 6900

Segundo o fabricante [18], o analisador funciona através da comparação entre a condutividade térmica da mistura a qual se deseja saber a composição (neste caso, Ar + He) com a de um gás de referência (neste caso, Ar puro). A diferença entre elas é relacionada à composição do gás secundário (presente em menor quantidade), seguindo valores previamente calculados experimentalmente para algumas misturas binárias. Aquisição e leitura são feitas através do fluxo dos gases em seu interior, que trocam calor com resistências associadas em pontes de wheatstone.

Já a calibração dos movimentos do robô foi realizada utilizando-se um dispositivo desenvolvido no LABSOLDA. Trata-se de um sistema de medição consistindo de um transdutor resistivo cuja movimentação quando estimulado longitudinalmente (Figura 11) envia sinais ao software e gera uma curva de Posição x Tempo. Desta forma, pôde-se analisar os parâmetros de tecimento do robô (frequência e amplitude) em diversas regiões da mesa, uma vez que efeitos mecânicos podem fazer com que a movimentação do manipulador sofra pequenas variações a depender da configuração de suas juntas, e procedeu-se com os ensaios em uma região onde os parâmetros utilizados no revestimento foram testados e eram conhecidos. Na Tabelas 3 e 5, há a indicação dos valores reais de amplitude e frequência, conforme leitura realizada por este dispositivo na mesma posição da mesa onde realizaram-se os testes nos tubos.



A



B

Figura 11 – Sistema de medição dos parâmetros de tecimento do robô: em (A) Vista geral da bancada e em (B) detalhe do transdutor em contato com chapa de alumínio acoplada à tocha

A aquisição dos parâmetros de soldagem foi feita por meio do Sistema de Aquisição Portátil (SAP), da empresa IMC Soldagem (Figura 12). Por meio de sensores ele permite a monitoração do processo, determinando valores de corrente, tensão elétrica e velocidade de arame com uma taxa de aquisição de 5KHz, na forma de oscilogramas. O dispositivo consiste de uma maleta, um software e diversos sensores, e necessita de um laptop externo para que a leitura seja realizada.



Figura 12 – Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem (SAP), com maleta e sensores

3.3 Procedimento de soldagem

O desenvolvimento do procedimento se deu em duas etapas principais: uma utilizando arame de 1,0 mm e outra com arame de 1,2 mm. Durante os ensaios, não foram feitas as aquisições de dados, e constam nas tabelas com os procedimentos resultantes apenas o valor regulado na fonte para a V_a . Posteriormente, realizou-se a aquisição e dados e há na seção 4.2 uma comparação entre os valores medidos de I_m , U_m , V_a e P , obtidos para os dois arames.

3.3.1 Ensaios com arame de 1,0 mm

Inicialmente foram realizados ensaios em chapa plana, tomando por base parâmetros fornecidos pela Fronius para esta aplicação (Figura 13).

**Schweißparameter**

Schweißgeschwindigkeit: ca 30 cm/min (von Naht zu Naht verschieden) zb. Fin ca.23cm/min
Drahtdurchmesser: 1,0mm

Drahtvorschub: 8,0m /min (von Naht zu Naht verschieden)
Ampere: 147
Volt: 14,2

Gas

Ar Rest / He 30 / CO² 0,12 / H² 2%

Position

PA

Vorteile:

Bereits bei der 1. Lage unter 5% Fe. Gehalt
Auftragshöhe 2,2 – 2,7mm

Figura 13 – Parametrização para a soldagem das paredes d'água na posição plana fornecida pela Fronius (19)

No entanto, foram necessárias algumas adaptações que desviaram em alguma medida o procedimento daquele documentado. Uma delas diz respeito ao gás de proteção, já que a utilização do H² estava impossibilitada por problemas no mostrador desse gás no misturador do laboratório. Dessa forma, em vez da mistura composta por 67,3% Ar, 30% He, 0,12% CO² e 2% H², como no procedimento da Fronius, utilizou-se inicialmente 67,5% Ar, 30 He e 2,5% CO². Alguns ensaios em chapa plana revelaram que essa mistura, aliada à alta tensão superficial do Inconel 625, conferia baixa molhabilidade à poça (Figura 14), e progressivamente aumentou-se a porcentagem de He (em detrimento do Ar) para compensar a ausência do H². Com 50% de He, chegou-se em uma molhabilidade satisfatória, cujos cordões foram sobrepostos de maneira estável (Figura 15).

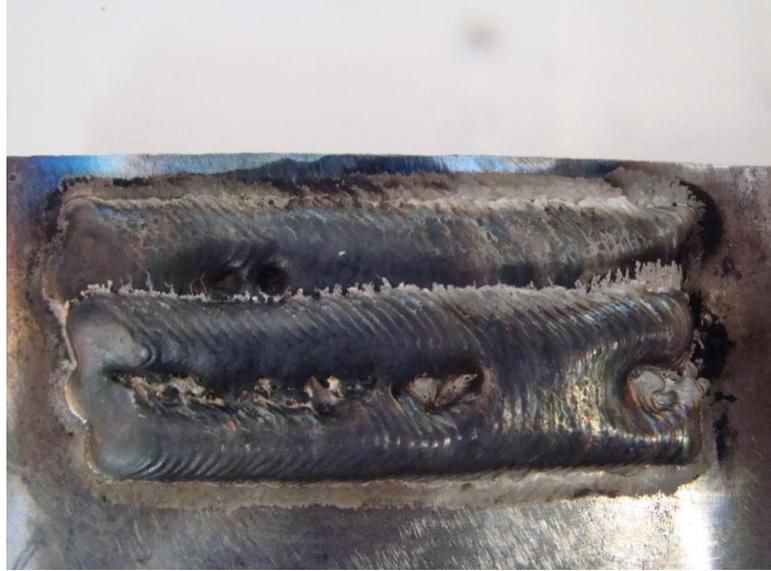


Figura 14 – Sobreposição defeituosa

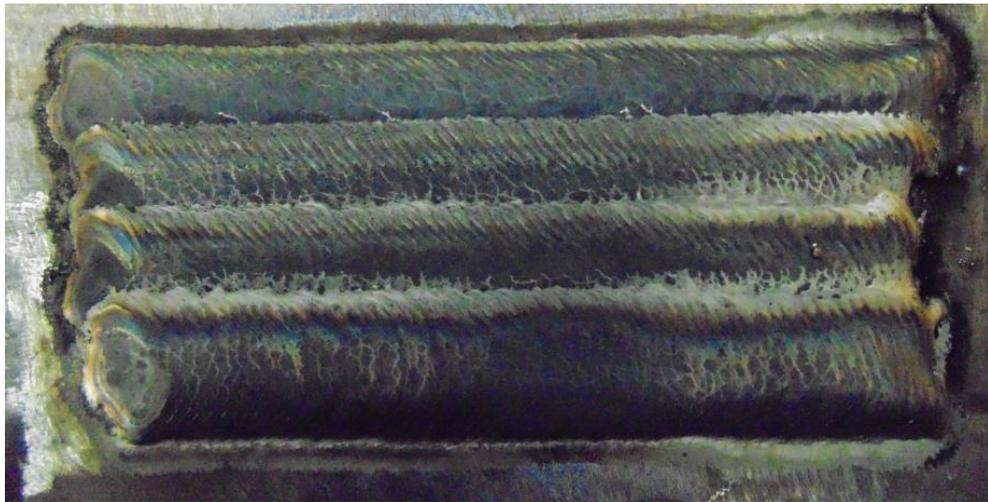


Figura 15 – Sobreposição satisfatória após alterações na composição do gás de proteção

Também não foram fornecidos os parâmetros de tecimento, frequência e amplitude de soldagem, e estes também foram obtidos mediante ensaios em chapas planas. A amplitude do cordão que cobre a membrana foi obtida instintivamente após simulação do tecimento do robô sobre o corpo de prova. A partir daí, em chapa plana, aumentou-se a V_s até que se conseguisse um cordão estável, para esta amplitude.

Partiu-se então para ensaios no feixe de tubos em escala real. Primeiramente foi preciso adotar uma estratégia quanto à ordem de deposição dos cordões, uma vez que no procedimento consultado não constava informação nesse sentido. Optou-se por começar na membrana e “escalar” a superfície do tubo de forma a fazer com que cada cordão se ampare no anterior e minimize o escorrimento. Isso é feito em ambos os lados de cada tubo e por fim

o revestimento é unido por um cordão de topo. A Figura 16 apresenta um esquema com a sequência de deposições, e cada cordão foi nomeado para facilitar sua identificação durante a explicação.

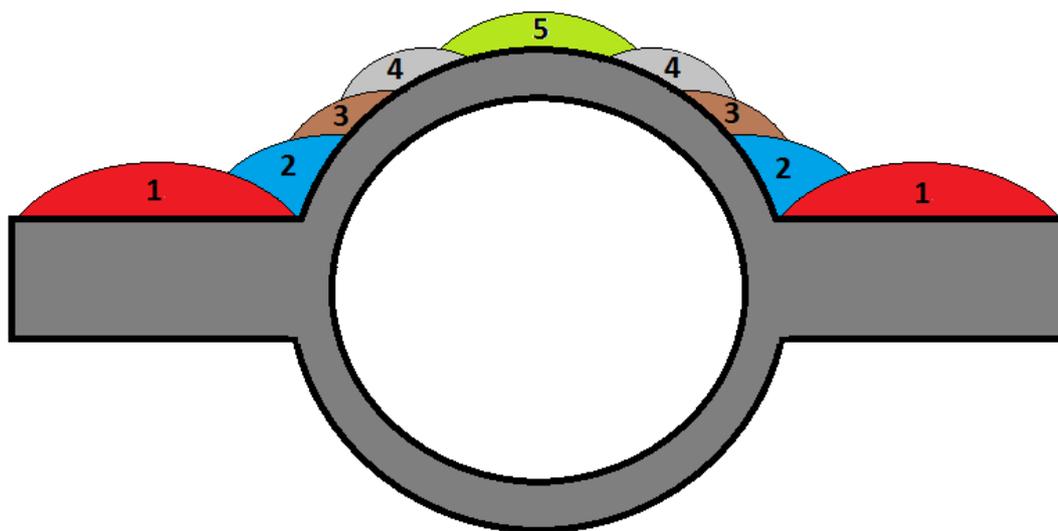


Figura 16 – Esquema com a sequência de deposição dos cordões. 1) ‘Membrana’; 2) ‘Junção’; 3) ‘Lateral 1’; 4) ‘Lateral 2’; 5) ‘Topo’

O primeiro cordão obtido foi o ‘Membrana’. A parametrização foi semelhante a dos ensaios em chapa plana, tendo sido necessário apenas diminuir a velocidade de soldagem para que se mantivesse a estabilidade por longos comprimentos. Os cordões subsequentes foram obtidos controlando-se a amplitude de cada um de maneira gradual, que foram reduzidas conforme os cordões “subiam” no corpo de prova, o que demandou um aumento nas respectivas velocidades de soldagem para que se evitasse o escorrimento. A programação das trajetórias foi feita manualmente, de forma que durante o posicionamento de cada novo cordão a ponta do arame distasse 2 mm da extremidade do cordão anterior.

Vale ressaltar que a deposição de cada cordão foi feita após o resfriamento da peça e que todos os ensaios foram realizados mediante um ângulo de ataque de 25°, empurrando. Ainda, para todos os casos não-planos (‘Junção’, ‘Lateral 1’ e ‘Lateral 2’) o ângulo de tecimento é distinto do ângulo de trabalho, como esquematizado na Figura 17.

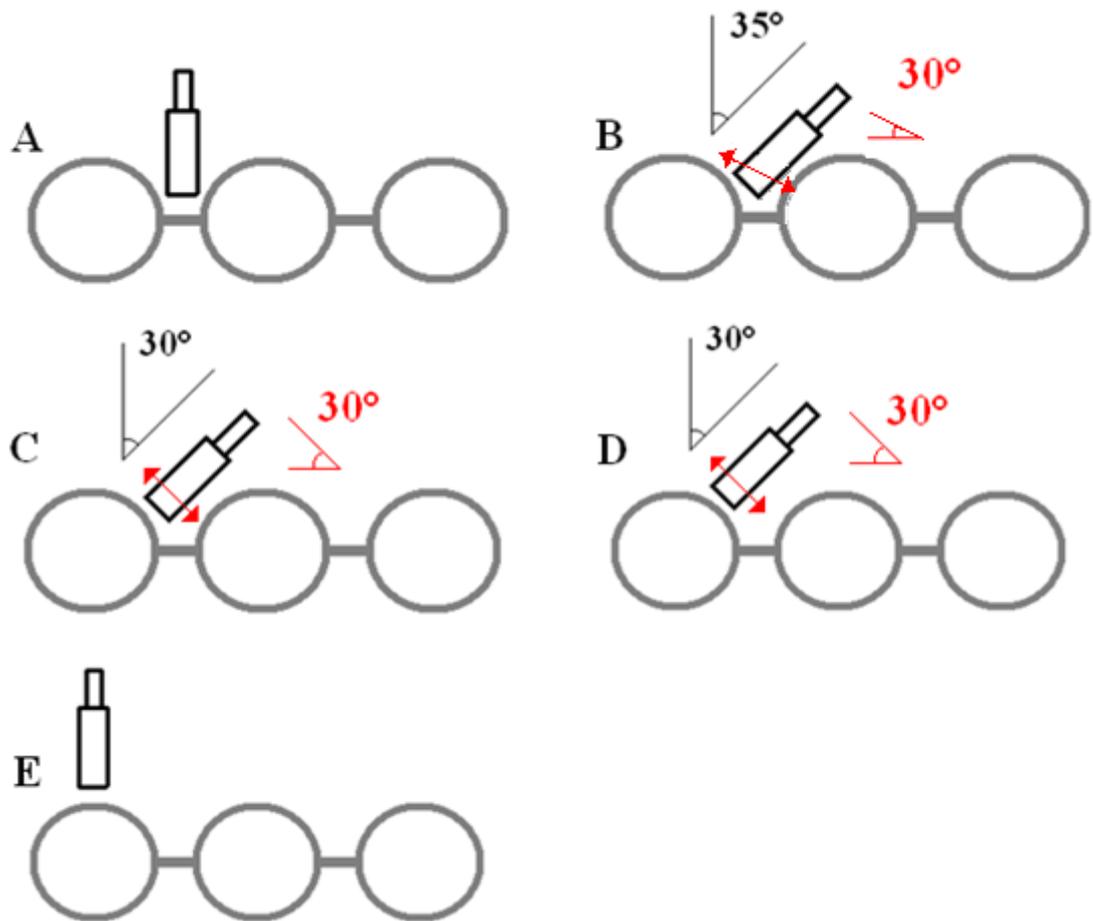


Figura 17 – Esquema com ângulo de trabalho (em preto) e de tecimento (em vermelho), respectivamente, utilizados na soldagem de cordão para o arame de 1,0 mm: em (A) Ambos 0° para o ‘Membrana’; (B) 35° e 30° para o ‘Junção’; em (C) 30° e 30° para o ‘Lateral 1’; em (D) 30° e 30° para o ‘Lateral 2’; e em (E) ambos 0° para o ‘Topo’. O ângulo de trabalho implica em inclinação do eixo da tocha em relação ao plano de tecimento, acarretando numa configuração “puxando” e “empurrando” na direção transversal.

Por fim, a Tabela 3, apresenta a parametrização completa do procedimento, para os 5 cordões, e o revestimento obtido é mostrado na Figura 18.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem para o procedimento com arame de 1,0 mm de diâmetro

| Arame de INCONEL 625 com 1,0 mm | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Programa sinérgico FRONIUS CMT CrNi 0877 2,5%CO2 + Ar | | | | | |
| Cordões | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Va regulada (m/min) | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| Vs regulada e lida (cm/min) | 26 | 40 | 48 | 45 | 16 |
| Frequência de tecimento regulada (Hz) | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 |
| Frequência de tecimento medida (Hz) | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Amplitude de tecimento regulada (mm) | 12 | 6 | 4 | 2 | 20 |
| Amplitude de tecimento medida (mm) | | 5 | 4 | 2 | 14 |
| DBCP (mm) | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Gás e vazão (l/min) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Ângulo de ataque (graus) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Ângulo de trabalho (graus) | 0 | 35 | 30 | 30 | 0 |
| Ângulo de tecimento (graus) | 0 | 30 | 30 | 30 | 0 |



Figura 18 – Revestimento resultante do procedimento desenvolvido com arame de 1,0 mm

3.3.2 Ensaio com arame de 1,2 mm

Para o arame de 1,2 mm de diâmetro há um procedimento documentado em uma publicação da Fronius [20], o qual procurou-se replicar para posteriormente adaptar visando aplicação na parede d'água (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros para a soldagem em chapa plana utilizando arame de 1,2 mm [20]

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Programa Sinérgico | Nibas 625 |
| Gás utilizado | 30% Hélio e 70% Argônio |
| Ângulo de ataque (graus) | 0 |
| Vs (cm/min) | 50 |
| Va (m/min) | 8,5 |
| Amplitude de tecimento (mm) | 5 |
| Frequência de tecimento (mm) | 3,5 |
| DBCP | 14 |
| Im (A) | 173 |
| Um (V) | 13,4 |

Inicialmente houve dificuldades, pois os cordões apresentavam furos e mordeduras. Eventualmente descobriu-se que a fonte de erros estava na composição do gás, pois o hélio apresentava composição inferior à regulada. Esta verificação foi realizada por meio do analisador de gases mostrado na Figura 9 e, após a compensação, os ensaios apresentaram cordões satisfatórios.

De maneira geral, este procedimento difere do anterior quanto a) à DBCP, que diminuiu de 17 para 14 mm; b) ao ângulo de ataque, que foi removido; e c) ao programa sinérgico da fonte, que passou a ser aquele específico para Inconel 625, o NIBAS 625 2,5%CO₂ + Ar. De resto, o número de cordões foi mantido, bem como a sequência de deposições (Figura 15). Quanto aos parâmetros mecânicos, apenas mudanças pontuais em alguns cordões foram feitas, visando otimizar os cordões que ainda apresentavam alguma instabilidade. Entre elas, destacam-se pequenas alterações na Vs e nos ângulos de trabalho (Figura 19). As Figuras 20-24 ilustram passo a passo como se deu a deposição dos cordões e a formação do revestimento, e a parametrização completa pode ser vista na Tabela 5.

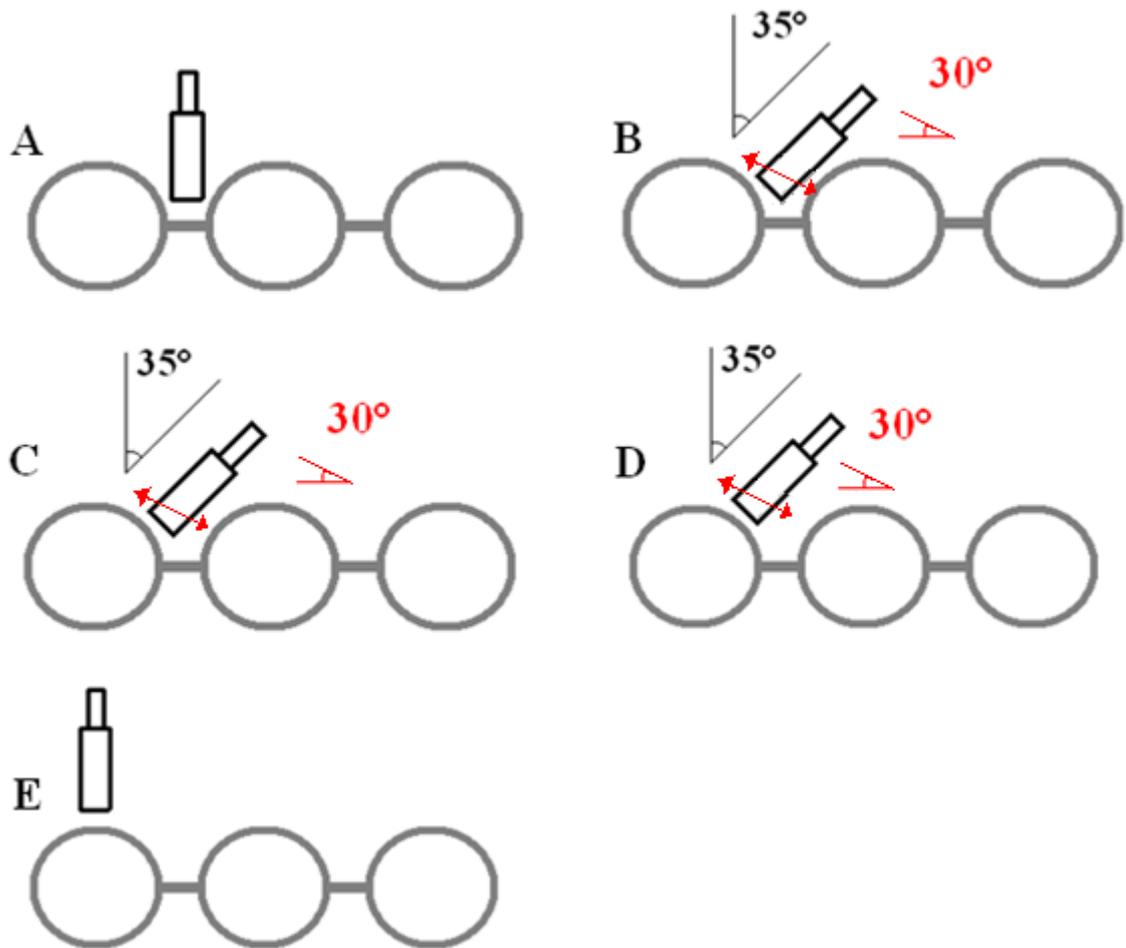


Figura 19 – Esquema representando ângulo de trabalho (em preto) e de tecimento (em vermelho), respectivamente, utilizados na soldagem de cada cordão para o arame de 1,2 mm: em (A) ambos 0° para o ‘Membrana’; em (B) 35° e 30° para o ‘Junção’; em (C) 35° e 30° para o ‘Lateral 1’; em (D) 35° e 30° para o ‘Lateral 2’; e em (E) ambos 0° para o ‘Topo’. O ângulo de trabalho implica em inclinação do eixo da tocha em relação ao plano de tecimento, acarretando numa configuração “puxando” e “empurrando” na direção transversal.

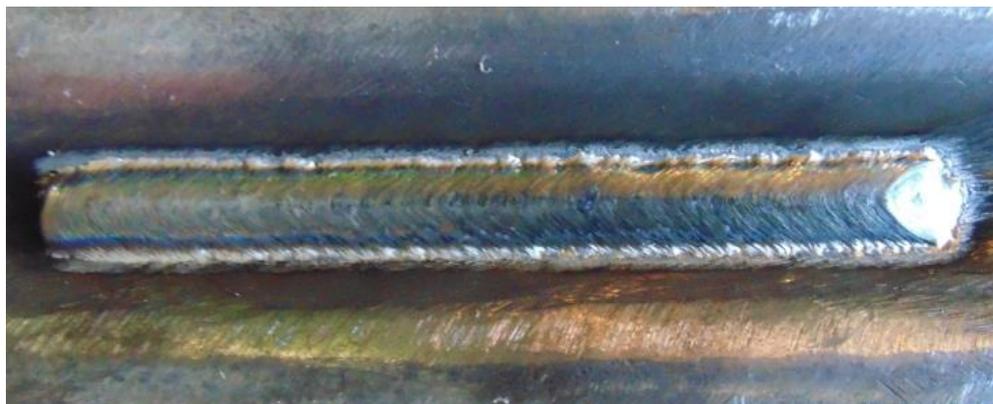


Figura 20 – Revestimento constando apenas do cordão ‘Membrana’



Figura 21 – Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’ e ‘Junção’



Figura 22 – Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’, ‘Junção’ e ‘Lateral 1’

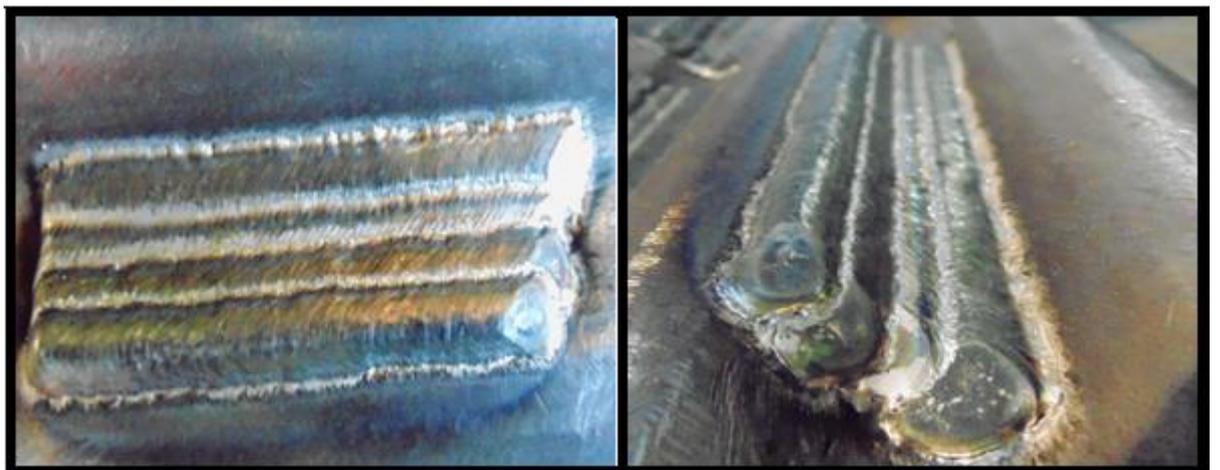


Figura 23 – Revestimento constando dos cordões ‘Membrana’, ‘Junção’, ‘Lateral 1’ e ‘Lateral 2’



Figura 24– Revestimento finalizado, constando de todos os cordões em ambos os lados do tubo

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem de cada cordão

| Arame de INCONEL 625 com 1,2 mm | | | | | |
|---|-----|-----|------|-----|-----|
| Programa sinérgico FRONIUS CMT NIBAS 625 2,5%CO ₂ + Ar | | | | | |
| Cordões | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Va regulada (m/min) * | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| Vs regulada e medida (cm/min) | 26 | 40 | 44,5 | 45 | 16 |
| Frequência de tecimento regulada (Hz) | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 |
| Frequência de tecimento medida (Hz) | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Amplitude de tecimento regulada (mm) | 12 | 6 | 4 | 2 | 26 |
| Amplitude de tecimento medida (mm) | 10 | 5 | 4 | 2 | 20 |
| DBCP (mm) | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Vazão do gás regulada (l/min) | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Vazão de gás medida (l/min) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Ângulo de trabalho | 0° | 35° | 35° | 35° | 0° |
| Ângulo de tecimento | 0° | 30° | 30° | 30° | 0° |

*A aparente discrepância comparativa entre as Va's para os diâmetros de 1 e 1,2 mm é comentada no item 4.2.

4–RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise superficial dos depósitos

4.1.1 Revestimento com arame de 1,0 mm

Por inspeção visual da superfície percebeu-se no resultado final (Figura 17) boas características quanto à sobreposição dos cordões, mas a dificuldade de se posicionar a tocha com precisão em algumas posições prejudicou a repetibilidade do processo, já que cordões supostamente com a mesma parametrização apresentaram algumas características distintas. Por exemplo, algumas falhas ocorreram nas sobreposições entre os cordões apenas em um lado do tubo, e não nos cordões correspondentes no lado oposto. De um modo geral, houve pouca tendência ao escorrimento, mesmo nos cordões de posição mais difíceis, e estes apresentam-se livres de respingos. Percebeu-se também no revestimento uma cor escurecida. É importante notar que o programa sinérgico utilizado foi aquele referente a aços inoxidáveis, o que pode explicar possíveis desvios.

4.1.1 Revestimento com arame de 1,2 mm

O revestimento obtido com arame de 1,2 mm (Figura 23) mostra uma tendência à robustez em aplicação industrial, pois nenhum dos cordões, que chegam a 15 cm de comprimento, apresentou sinais de tendência a escorrer ou a apresentar furos em decorrência de eventuais instabilidades na poça. Nota-se também que todos aderiram com suavidade no cordão anterior e a superfície do revestimento apresenta-se de maneira contínua, sem vales nas junções entre os cordões.

Para o procedimento com arame de 1,2 mm percebeu-se uma cor mais prateada, menos queimada, bem como cordões com “escamação” mais evidente. Estes são fatores que numa análise estética superficial depõem comercialmente a favor da aceitação do revestimento, pois denotam um procedimento mais robusto e confiável. Estima-se que a menor porcentagem de He pode ter contribuído para tal, já que a mistura mais rica em Ar apresenta maior densidade e confere uma proteção maior à poça, para o mesmo fluxo.

O cordão de topo apresentou-se como o mais problemático, pois sua alta amplitude demandou uma velocidade baixa demais, o que concentrou a atuação do arco e levou à oxidação. Tal pode ser verificado pelas manchas na superfície do cordão (Figura 23).

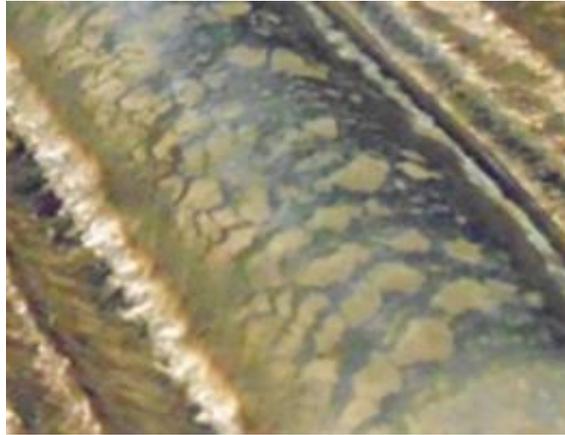


Figura 25 – Manchas de oxidação na superfície do cordão de topo

Uma outra dificuldade foi a soldagem de uma das paredes do tubo quando o tubo oposto já havia sido revestido (Figura 24). Isso fez com que num certo momento a tocha batesse na superfície revestida e o tecimento fosse prejudicado, causando uma irregularidade pontual em um dos cordões.

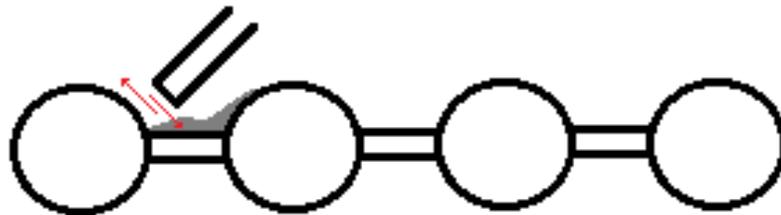


Figura 26 – Colisão da tocha com o revestimento durante tecimento

4.2 Análise do processo via SAP

Foi feita a aquisição de dados para depósitos filetados em chapas planas com a V_a regulada no revestimento realizado por cada bitola, bem como os respectivos gases, DBCPs e programas sinérgicos. A V_s regulada para ambos os casos foi de 60 cm/min. Na tabela 6 podem ser conferidos os valores médios lidos.

Tabela 6 – Valores médios medidos pelo SAP para as duas bitolas

| | Arame de 1,0 mm | Arame de 1,2 mm |
|------------|-----------------|-----------------|
| Um (V) | 18 | 17,7 |
| Im (A) | 138 | 178 |
| Va (m/min) | 7,9 | 6,6 |

Nota-se que para a mesma V_s , a V_a do arame de 1,2 mm é inferior à do arame de 1,0 mm, contrariando os valores regulados (8,0 m/min para o arame de 1,0 mm e 8,5 m/min para o arame de 1,2 mm). De fato, é coerente que um arame de menor diâmetro seja alimentado com mais velocidade, para uma mesma produtividade. Conjectura-se que a redução da V_a para o diâmetro de 1,2 mm deve-se ao sistema de controle da fonte de soldagem, que busca a manutenção da altura do arco, e à diferença entre as DBCP's de cada procedimento.

Os oscilogramas de tensão e corrente das aquisições realizadas são ilustrados na Figura 27 (para o arame de 1,0 mm) e na Figura 28 (para o arame de 1,2 mm). Nota-se que a diferença nos programas sinérgicos (CrNi 0877 para o arame de 1,0 mm e NIBAS 625 para o arame de 1,2 mm) gera curvas geometricamente distintas.

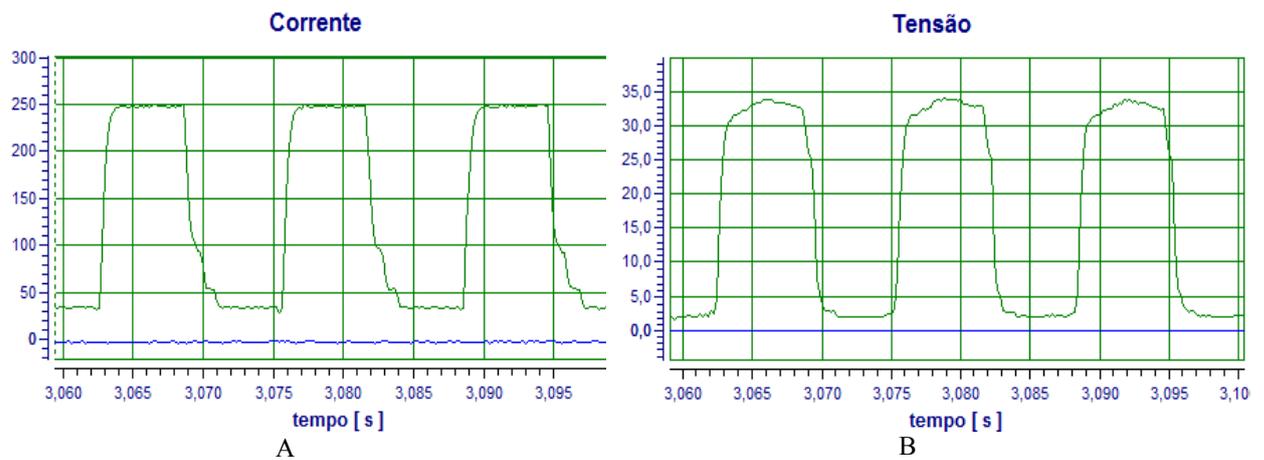


Figura 27 – Oscilogramas de (A) corrente e (B) tensão para o arame de 1,0 mm

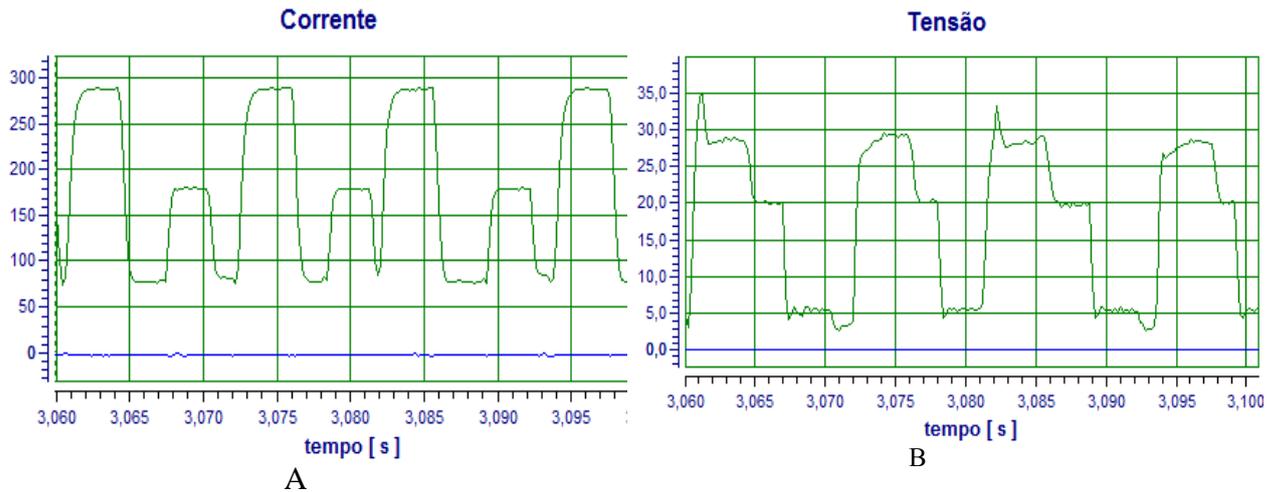


Figura 28 – Oscilogramas de (A) corrente e (B) tensão para o arame de 1,2 mm

4.3 Análise macrográfica

Foi realizada a macrografia para o revestimento obtido com as duas bitolas. Ela revelou que em nenhum dos casos ocorreram defeitos tais como trincas, falta de fusão ou porosidade.

4.3.1 Revestimento com arame de 1,0 mm

Nota-se que a espessura maior é de 4,3 mm na região entre tubo em membrana, onde localiza-se a sobreposição dos cordões ‘Junção’ e ‘Lateral 1’ (Figura 29-a). A menor foi a obtida no cordão de topo, com 2,4 mm de espessura (Figura 29-b).

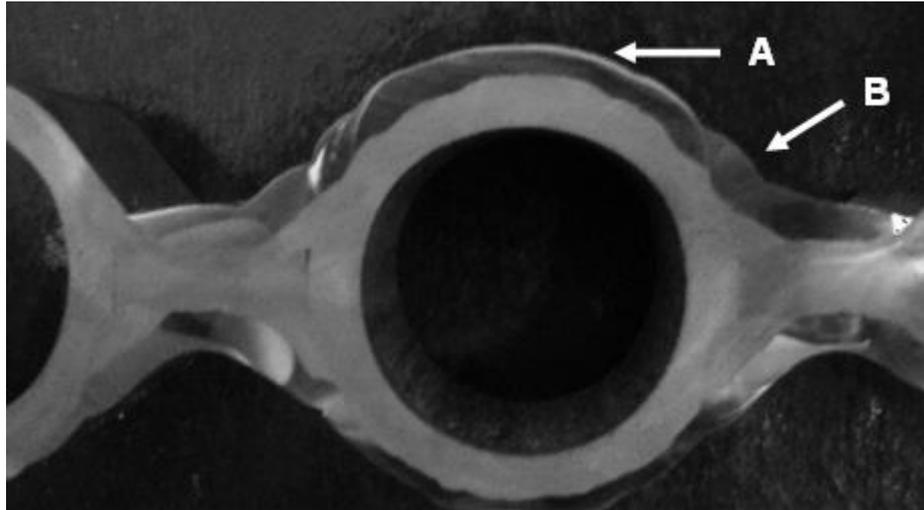


Figura 29– Macrografia do revestimento realizado com arame de 1,0 mm em região compreendendo tubo e membranas vizinhas: em (A) a região de maior espessura e em (B) a região de menor espessura

4.3.2 Revestimento com arame de 1,2 mm

Para o arame de 1,2 mm, as regiões de maior e menor espessura coincidem, mas os valores são maiores. A maior espessura é de 4,8 mm (Figura 30-a) e a menor de 2,7 mm de espessura (Figura 30-b).

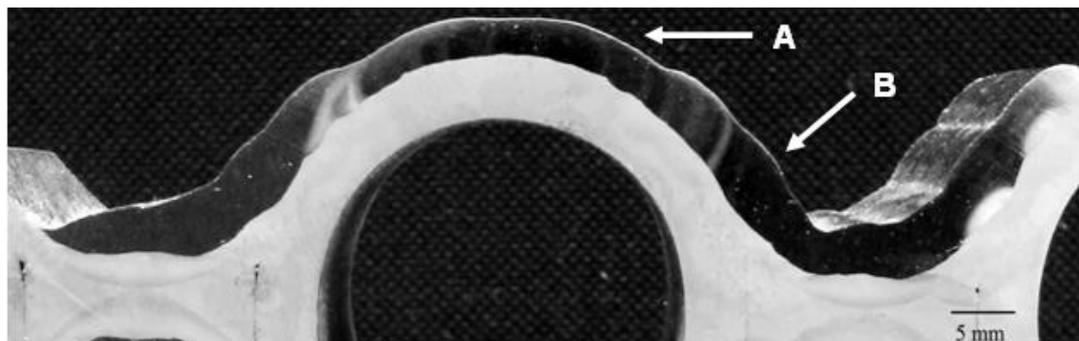


Figura 30– Macrografia do revestimento realizado com arame de 1,2 mm em região compreendendo tubo e membranas vizinhas: em (A) a região de maior espessura e em (B) a região de menor espessura

4.4 Análise da diluição

Sobre a foto da macrografia traçou-se uma linha representando o diâmetro externo original do tubo e com o auxílio do software ImageTool® calculou-se a diluição do

revestimento, conforme método anteriormente exposto e ilustrado na Figura 3. Para o arame de 1,0 mm, resultado obtido foi de 15% (Figura 31).

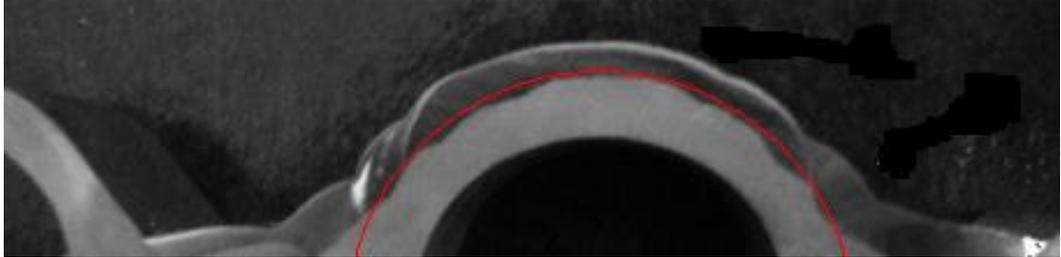


Figura 31 – Macrografia do revestimento feito com arame de 1,0 mm, com linha traçada para cálculo da diluição

O mesmo foi feito para a macrografia com o revestimento do arame de 1,2 mm (Figura 32), resultando em uma diluição de 9%.

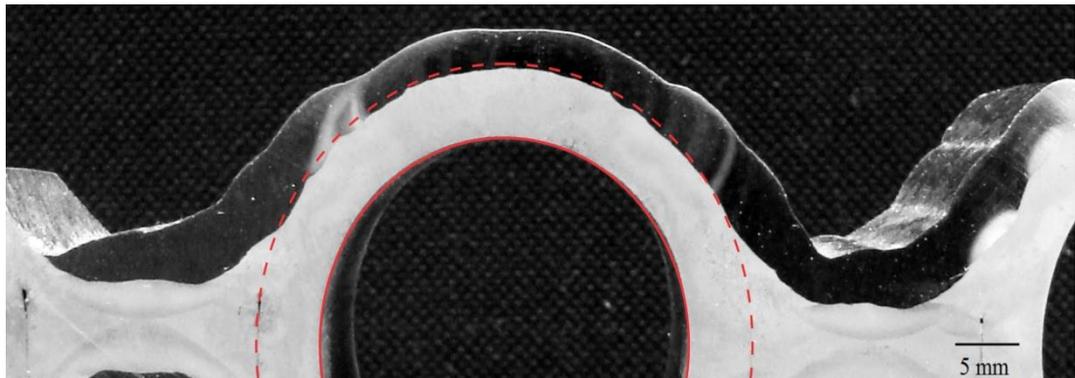


Figura 32 – Macrografia do revestimento feito com arame de 1,2 mm, com linha traçada para cálculo da diluição

5–CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

- O melhor resultado foi o obtido por meio do arame de 1,2 mm, em termos de qualidade superficial dos cordões, diluição atingida e robustez do procedimento. No entanto, estima-se que, no momento, seria preferível um procedimento que resultasse em um revestimento com menor espessura média de camada, indicando menor consumo de material, e menor gasto. Ressalta-se, porém, que as pesquisas dentro dessa problemática encontram-se em estágio preliminar, uma vez que se desconhece com precisão a influência de cada componente (erosão e corrosão) no mecanismo de desgaste, e as exigências mudam constantemente conforme o desenrolar de novos estudos. Uma análise mais elaborada relacionando a espessura do revestimento ao ganho em vida útil elucidaria se, em termos de custo, compensaria a aplicação de revestimentos mais espessos.
- A dificuldade da soldagem na posição lateral foi superada fazendo-se com que cada cordão se amparasse no anterior localizado abaixo. Esta estratégia foi eficiente para combater o escorrimento, porém culminou em sobreposição excessiva entre os cordões, acarretando em um alto gasto de material e perda de produtividade.
- O procedimento desenvolvido, mesmo que não venha a ser utilizado, serviu como um ponto de partida para outros procedimentos utilizando diferentes processos ou metais de adição. Por exemplo, pode ser repetida a ordem de deposição dos cordões, a relação entre as velocidades de soldagem dos cordões, os ângulos da tocha, etc. Seus parâmetros elétricos também podem servir como base para parametrizar ensaios utilizando MIG/MAG pulsado tanto CC como CA.

5.2 Sugestões a trabalhos futuros

- Fechar o revestimento com dois cordões de topo, em vez de um, cada um com metade da amplitude (Figura 33). Essa medida visa evitar a oxidação superficial sofrida pelo cordão de topo (Figura 25), que precisa cobrir uma largura grande com alta amplitude e baixa Vs.

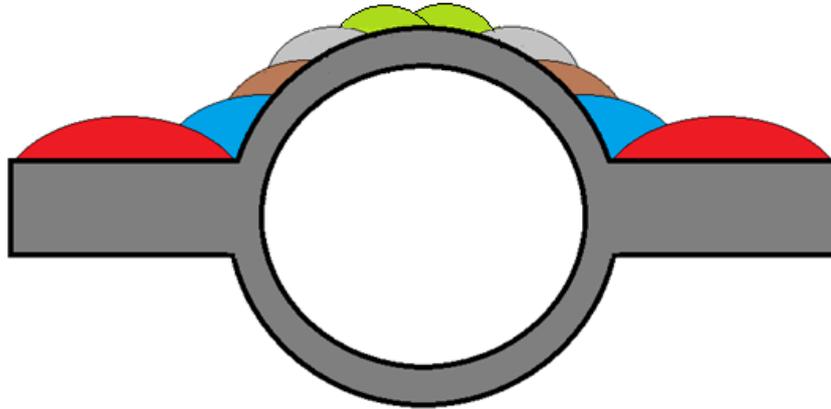


Figura 33 – Revestimento com 2 cordões de topo

- Posicionar o corpo de prova sobre um suporte que o rotacione, para girá-lo de forma a cada cordão ser soldado na posição plana (Figura 32). Com isso, o risco de escorrimento diminui e também a necessidade de uma sobreposição excessiva, diminuindo gastos de material. Com uma sobreposição menor, diminui também o número de cordões necessários para cobrir a superfície e, como consequência, ganha-se em produtividade.

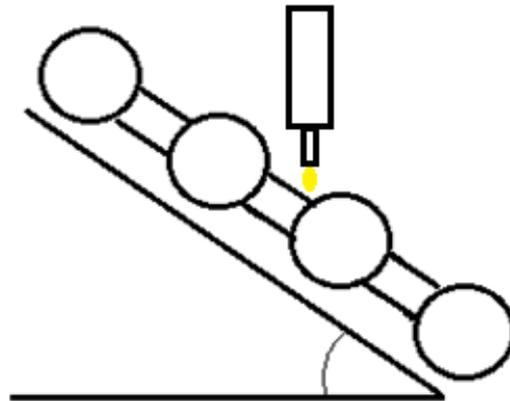


Figura 34 – Rotação da peça para realização da soldagem na posição plana

- Testar o procedimento em painéis maiores, de até 6 m de comprimento, para testar a robustez e repetitividade, utilizando um sistema de refrigeração para prevenir o empenamento da peça.
- Realizar análise química no MEV para ver de que forma a diluição atingida relaciona-se com o percentual de Fe presente no revestimento, que deve ser de 5% ou inferior.

6– REFERÊNCIAS

- [1] EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Disponível em: http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf. Acesso em: 20 de junho de 2014.
- [2] CoalPro Consulting Services. **Predictive model for the purpose of estimating boiler tubes erosion and corrosion**. Disponível em: <http://www.rwmaier.com/page13.html>. Acesso em 11 de julho de 2014.
- [3] LAI, J. Y. **Fireside Corrosion and Erosion/Corrosion Protection in Coal-Fired Boilers**. NACE INTERNATIONAL, 2004.
- [4] SILVA, Régis. H. G. e et al. **Elevada performance na fabricação e revestimentos de paredes de caldeiras**. Anais VII CITENEL e III SEENEL. Rio de Janeiro: -, 2013. 10 p.
- [5] SILVA, C. C. **Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga à base de níquel inconel 625**. Revista Soldagem & Inspeção, 2012, p. 251.
- [6] GITTO, M. F.; GOOCH, T. C.; **Effect of iron dilution on corrosion resistance of Ni-Cr-Mo alloy cladding**. British Corrosion Journal, volume 31, 1 de janeiro de 1996, pp. 309-314.
- [7] KUMAR, V.; et al. **Influence of welding process and parameters on dilution and corrosion resistance**. Stainless Steel World America, 2009, pp. 5-9.
- [8] RAPPL, J. **Pulsed Technology Increases Cladding Travel Speed**. Welding Journal, January 2009, pp. 53-54.
- [9] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **CMT Process - Practises "Energy Saving"** - Green Thinking. [S.l.]. Slides de apresentação.
- [10] PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; LUNT. M. **Characterization of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding**. Journal of Materials Processing Technology. November 2012.
- [11] MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [12] EGERLAND, S. A. **Status and Perspectives in Overlaying Under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes**. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27, nº 2, 2009. p. 50-54.

- [13] KIM, C. **Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate for Various Backing Conditions**. Materials Science Forum, 654-656, Junho 2010. 350-353.
- [14] FOKENS, R. **Cold Metal Transfer - CMT - A Revolution in Mechanized Root Pass Pipeline Welding**. 4th Pipeline Technology Conference. Hannover, Germany. 2009.
- [15] SPECIAL METALS. Disponível em: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>. Acesso em: 01 de julho de 2014.
- [16] HESTON, T. **Cladding operation Doubles Life of Boiler Tubing**. Welding Journal, Julho de 2000, p. 45-47.
- [17] DOOLEY, R. **A Survey of Erosion and Corrosion Resistant Materials Being Used on Boiler Tubes In Waste to Energy Boilers**. Proceedings of the 17th Annual North American Waste-to-Energy Conference, NAWTEC17, May 18-20, 2009, USA.
- [18] THERMCO INSTRUMENT CORPORATION. **9 Range Gas Mixture Analyzer**. Disponível em <http://www.thermco.com/ss123.php>. Acesso em: 09 de julho e 2014.
- [19] FRONIUS International, Internal Investigations (unpublished)
- [20] Fronius International GmbH. **Schweißpraxis aktuell: CMT – Technologie**, Editora WEKA MEDIA GmbH – Alemanha, 2013.