

Inovações em Revestimentos Automatizados de Tubos e Paredes d'Água de Caldeiras de Unidades de Geração Termelétrica para Mitigação de Desgaste

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Jair Carlos Dutra, José Piotrovski Neto, João Facco de Andrade, Alberto Bonamigo Viviani

Resumo – A relevância da geração termelétrica se acentua continuamente no Brasil e esforços são engendrados para a melhoria das operações das usinas, na busca por impactos diretos em relação ao incremento da disponibilidade de máquina. Neste contexto, o presente trabalho descreve ações para o aumento da vida útil de elementos tubulares de caldeiras pelo aumento de sua resistência a mecanismos de desgaste do tipo corrosão e erosão atuantes no ambiente interno à caldeira, via revestimento por soldagem com ligas metálicas especiais. Soluções foram desenvolvidas tanto para o revestimento de paredes d'água, como de tubos individuais de superaquecedores, abrangendo processos inovadores de soldagem (MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG Pulsado AC, CMT e TIG) e geração de tecnologias para automação da soldagem de revestimento.

Palavras-chave – Cladding, Mecanização, MIG/MAG, Overlay, Soldagem TIG

I. INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica, no Brasil, ainda apresenta crescimento diretamente proporcional ao crescimento econômico. Apesar de índices de industrialização não indicarem incremento acentuado, a demanda energética tem crescido, impulsionada fortemente pelo aquecimento do mercado de bens de consumo. A pressão sobre as geradoras de energia no sentido de manter a segurança de fornecimento, portanto, tem sido constante. Um agravante, em relação este fator, reside na própria matriz energética hídrica, que, em tempos de seca, como os atuais, vê sua capacidade preocupantemente deteriorada. Neste cenário, a relevância da geração termelétrica se acentua e esforços são engendrados para a melho-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado na cidade de Costa do Saupe, BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015.

Este trabalho foi financiado pela empresa TRACTEBEL ENERGIA SA e parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

R. H. G e Silva, J. C. Dutra, J. F. de Andrade e A. B. Viviani trabalham no LABSOLDA - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (e-mail: regis.silva@labsolda.ufsc.br).

J. Piotrovski Neto trabalha na TRACTEBEL ENERGIA SA (e-mail: jpneto@tractebelenergia.com.br).

ria de sua operação, com vistas a impactos diretos no aumento da disponibilidade de máquina. Este índice consiste num dos mais importantes desafios das plantas de geração, e depende tanto de paradas de manutenção planejadas como de paradas emergenciais. Assim, iniciativas que contribuam para um aumento do tempo entre paradas planejadas, ou que minimizem o risco de falhas catastróficas, fazem parte das atividades das equipes de engenharia de manutenção, das usinas.

Grande parte dos componentes das caldeiras são tubulares e operam internamente à mesma, submetidos a ambientes de alta temperatura e quimicamente propensos à corrosão. Em caldeiras a carvão, como é o caso do complexo termelétrico da TRACTEBEL ENERGIA em Capivari de Baixo, SC (o maior complexo de geração termelétrica da América Latina), há ainda o problema de adesão de cinzas, que contribui para o desgaste superficial dos tubos de paredes d'água (compostas por feixes de tubos) e individuais, como os presentes no superaquecedor, e necessidade de reparo / proteção prévia por revestimento metálico [1, 2, 3]. Estes mecanismos de desgaste levam a perdas de espessura dos tubos da ordem de 50 a 100 mpy (mils per year, 1 mil = 0,0254 mm) [4]. O aumento da vida útil destes elementos tubulares contribui para maior confiabilidade operacional e possibilidade de menor periodicidade de paradas das caldeiras, configurando claro benefício para a disponibilidade da unidade. Estudos relatam uma redução na taxa de perda espessura de parede dos tubos, podendo resultar em vida útil de até 20 anos [5].

O presente trabalho descreve ações para o enfrentamento de desgaste de componentes tubulares de caldeiras de termelétricas, aumentando a vida útil dos mesmos pelo aumento da resistência a mecanismos de desgaste do tipo corrosão e erosão, presentes no ambiente operacional interno à caldeira. De maneira específica, o trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de processos inovadores de soldagem a arco elétrico, configurados por variantes modernas de processos clássicos soldagem (MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG Pulsado AC, CMT e TIG), procedimentos e técnicas de soldagem para substratos com geometria tubular e geração de tecnologias dedicadas para automação da soldagem de revestimento de paredes d'água e de tubos individuais (sistemas integrados de soldagem).

O projeto está em andamento, com financiamento da em-

presa TRACTEBEL ENERGIA SA, no escopo do programa de P&D da ANEEL, sob o título "Desenvolvimento de uma Tecnologia Nacional Automatizada para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeiras e Tecnologias de Soldagem Associadas" e código PD-0403-0025/2011. A execução é responsabilidade do Instituto de Soldagem e Mecatrônica - LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em estreita atuação com a equipe da empresa, direcionando o desenvolvimento para aplicação nas usinas termelétricas a carvão de sua propriedade.

II. PROCESSOS DE SOLDAGEM PARA PAREDES D'ÁGUA

Atualmente, a operação de revestimento de feixes de tubos, que comporão as paredes d'água de caldeiras de termelétricas, é realizada de maneira semi-automática, com o processo de soldagem MIG/MAG. Ou seja, a tocha de soldagem é deslocada manualmente pelo soldador, e o material de adição é alimentado mecanicamente, pela fonte de potência. É intrínseca à atividade uma grande área de revestimento, que é confeccionado pela deposição de diversos cordões de solda de grande comprimento (usualmente 6 m) sobrepostos, gerando uma camada de material resistente. A execução manual de uma solda com estas propriedades resulta em baixa qualidade, advinda de baixa homogeneidade geométrica, variações de diluição (taxa de mistura do material de base com o material aportado), defeitos de fusão, acabamento precário e heterogeneidade de composição química (e consequentemente de resistência ao desgaste) ao longo do revestimento, com elevado nível de reparos (exemplo na Figura 1).



Figura 1. Exemplo de revestimento aplicado manualmente.

Tais efeitos são provenientes de uma movimentação não uniforme e não perfeitamente retilínea da tocha de soldagem pelo soldador, e da necessidade de paradas e inícios de solda ao longo dos tubos (pontos propensos a defeitos de fusão). Mesmo soldadores experientes (já escassos no mercado) têm limitações quanto à velocidade de soldagem, precisão de posicionamento e tempo e comprimento de manutenção de arco aberto. Nota-se, assim, a total plausibilidade de adoção de processos automatizados para a operação.

Dentre os processos eficientemente automatizáveis, o MIG/MAG vem sendo o mais largamente aplicado para revestimento de paredes d'água, devido a suas características de robustez e produtividade. Máximas eficiência e qualidade se extraem do processo quando se aplicam suas variantes modernas, que proveem uma transferência metálica estável,

baixa diluição, estabilidade da poça metálica em posições de soldagem fora da plana, alta qualidade de acabamento e nível reduzido de desperdício de material por respingos. Foram abordadas três destas versões, cujos desenvolvimentos no escopo do presente trabalho resultaram em condições otimizadas para revestimento.

Todos os ensaios relativos a esta seção foram executados de maneira robotizada, conforme parâmetros individualmente descritos.

A. MIG/MAG Pulsado

O processo de soldagem MIG/MAG em sua concepção original aplica uma fonte de energia com característica de tensão constante, configuração ainda largamente aplicada, que consiste na versão designada como convencional. No MIG/MAG convencional, a corrente de soldagem, variável de maior influência tanto sobre a estabilidade do processo (rigidez do arco, regularidade de transferência metálica), como sobre as características do cordão depositado (solda), não é diretamente controlada pelo equipamento. Ela é uma variável dependente, sendo que sua magnitude é definida pela configuração do circuito elétrico de soldagem e suas cargas (resistivas ou não), incluindo o *stickout*, cabos, conexões, projeto da fonte (indutância), tensão regulada e arco elétrico. Portanto, a controlabilidade sobre o processo de soldagem e das propriedades do cordão se vê limitada. A Figura 2 [6] mostra um oscilograma do processo na versão convencional, em transferência metálica por curto circuito, evidenciando que a corrente varia de forma heterogênea de acordo com a situação momentânea do arco elétrico (em momentos de curto-circuito, a corrente se eleva, em momentos de arco aberto, ela se reduz, tomando o valor correspondente à configuração do circuito elétrico de soldagem, sob variação de picos de corrente e de correntes de arco aberto).

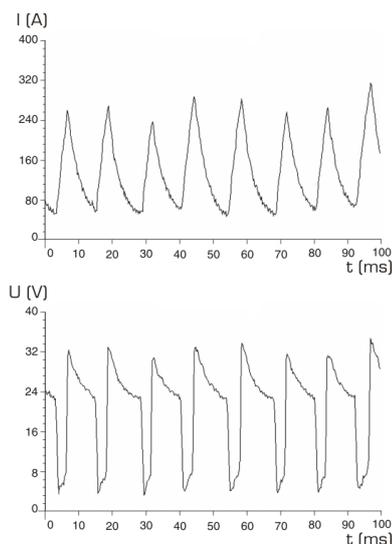


Figura 2. Oscilograma do processo MIG/MAG convencional: corrente indiretamente controlada e erratically oscilante [6].

Por outro lado, a possibilidade de se controlar diretamente a corrente de soldagem, pela manipulação de sua forma de onda, propicia o controle direto de sua influência sobre a

regularidade da transferência metálica, da energia de soldagem, e, conseqüentemente, das propriedades do cordão soldado. Desenvolvimentos em eletrônica, dando advento aos transistores, permitiram o projeto de fontes de energia para soldagem com esta capacidade. Desta maneira, o uso de formas de onda de corrente pulsadas, com todos os seus parâmetros controlados, passou a se tornar a principal opção tecnológica para aplicações de alta qualidade.

Especialmente em revestimento metálico por soldagem, a qualidade viabilizada pela corrente pulsada (modo pulsado), em relação a outros processos, como o Eletrodo Revestido e o MIG/MAG convencional, se torna um diferencial altamente relevante. A Figura 3 mostra um exemplo relativo ao revestimento de pás de turbinas de geração hidrelétrica, onde a substituição do processo MIG/MAG convencional pelo processo MIG/MAG Pulsado acarretou significativas vantagens em relação à qualidade do revestimento. Este trabalho foi conduzido em parceria do LABSOLDA / UFSC com a GERASUL (hoje TRACTEBEL ENERGIA), culminando com a adoção do processo pulsado desenvolvido em todas as aplicações de recuperação de cavitação da empresa.

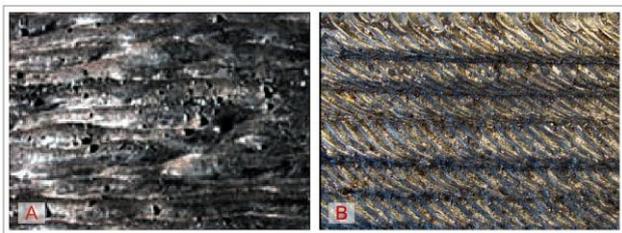


Figura 3. Comparação entre os revestimentos depositados com o MIG/MAG convencional (A) e o MIG/MAG Pulsado (B) [7].

Na metodologia do presente trabalho, dadas as especificidades da aplicação (revestimento de tubos internos a caldeiras de termelétricas), foram selecionados materiais de aporte resistentes à corrosão e erosão a alta temperatura, constituindo da superliga de Níquel Inconel 625 (arame de 1,0 mm de diâmetro), a ser depositado sobre tubos de aço ARBL 16Mo3. Como método de desenvolvimento da parametrização da forma de onda do processo MIG/MAG Pulsado, se partiu de uma configuração prévia para aço comum presente no banco de dados eletrônico da fonte de soldagem, e, através de ensaios instrumentados de soldagem, foram executadas as customizações necessárias. A monitoração do processo englobou aquisição e tratamento de dados elétricos (corrente e tensão de soldagem) e filmagem em alta velocidade, para visualização direta da formação e transferência de gotas.

Assim, a determinação dos parâmetros de pulso teve como dados iniciais o conjunto de corrente de pulso $I_p = 320$ A e tempo de pulso $t_p = 3,2$ ms para arame de Inconel 625 de 1,2 mm de diâmetro. A configuração elétrica dinâmica resultante no arco pode ser observada na Figura 4.

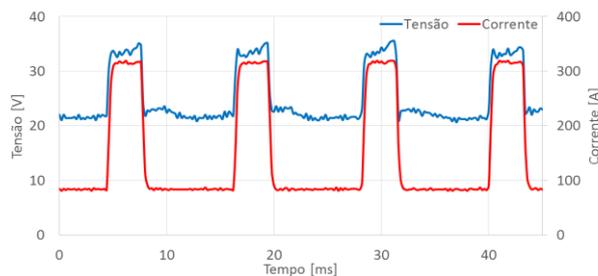


Figura 4. Oscilograma do processo MIG/MAG Pulsado aplicado como base para a customização da forma de onda de corrente.

Para este modo, apesar de não ficar evidente no oscilograma de tensão o momento do destacamento da gota, com a filmagem de alta velocidade constatou-se a estabilidade na transferência e o destacamento acontecendo durante o início do tempo de base, o que é desejável (sequência de imagens da Figura 5).



Figura 5. Sequencia de quadros de filmagem em alta velocidade (4000 quadros/s), da transferência metálica para o processo MIG/MAG Pulsado.

B. MIG/MAG Pulsado AC

O processo MIG/MAG Pulsado em corrente alternada (MIG/MAG Pulsado AC) tem sido foco de intensa pesquisa em centros de excelência em processos de soldagem ao redor do mundo. As vantagens que o processo pode conferir ao resultado justificam as dificuldades em sua parametrização, advindas da maior quantidade de parâmetros a serem regulados, os quais exercem influência direta no processo e mutuamente entre si, e no projeto eletrônico das fontes de energia, advindas da necessidade de elevado desempenho dinâmico das mesas e aplicação de sistemas sincronizados de fornecimento de alta tensão, para manutenção do arco aberto nos instantes de troca de polaridade.

A peculiar característica do comportamento físico do arco elétrico MIG/MAG em corrente alternada que dá origem a suas vantagens é o deslocamento do acoplamento arco-arame, quando o processo se encontra em polaridade direta (arame polarizado negativamente). Nesta situação, os pontos catódicos, que alimentam elétrons para o arco e consistem no acoplamento arco-arame, se posicionam sobre a superfície do arame ainda sólido, anteriormente a sua ponta líquida, deslocando a interface arame-arco da gota na ponta do arame (configuração da polaridade reversa, arame positivo) para a superfície cilíndrica do arame ainda sólido [8]. Nesta configuração (arame negativo), o calor do arco na região do acoplamento arco-arame é mais eficientemente consumido para efetiva fusão do arame, ao passo em que, na polaridade reversa, o calor do arco é consumido pelo superaquecimento da gota metálica líquida na ponta do arame, em detrimento

de sua fusão. Este efeito pode ser visto na Figura 6.

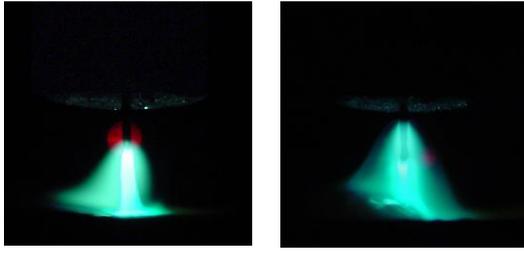


Figura 6. Acoplamento arco-arame sobre o arame ainda sólido durante a polarização direta, à dir. (arame como polo negativo), e sobre a gota, à esq. (arame como polo positivo), na soldagem MIG/MAG AC [8].

Há, portanto, um aumento da taxa de fusão de arame durante a polaridade direta da corrente alternada, ao mesmo tempo em que o material transferido tem menor temperatura e conteúdo calorífico [8]. Para revestimentos ambas as propriedades são de grande interesse, pois refletem aumento de produtividade e redução aquecimento da peça e de diluição. Entretanto, a transferência metálica (destacamento de gotas) na polaridade direta é prejudicada justamente pela reduzida densidade de corrente no acoplamento arco-arame. Disso decorre a necessidade de a forma de onda de corrente conter um tempo de polaridade reversa, para promover transferência metálica consistente. O adequado balanceamento entre as fases positiva e negativa do arame, então, permite estabilidade do processo e qualidade do revestimento soldado, consistindo em um dos focos de desenvolvimento.

Para a elaboração de uma forma de onda adequada para o processo MIG/MAG Pulsado AC, se desenvolveu uma metodologia específica. Primeiramente, se deve levantar um referencial adequado para a velocidade média de alimentação do arame, devido à supracitada diferença de taxa de fusão entre as polaridades direta e reversa. Para isso, é necessário um ensaio para determinação da capacidade de fusão de cada polaridade, determinadas conforme exposto na Equação 1, na qual k é o coeficiente de fusão de arame, V_a é a velocidade de arame e I_m é corrente média. Na polaridade reversa (ou positiva), foi utilizada a corrente de transição entre transferência metálica por curto-circuito e em voo livre como referência. Para a polaridade direta (ou negativa), a transição entre os modos de transferência gera grande instabilidade no processo, uma vez que a altura de arco não se mantém constante em altos níveis de corrente, demandando uma abordagem diferente.

$$k = \frac{V_a}{I_m} \quad (1)$$

Após determinação da capacidade de fusão para ambas as polaridades, adotou-se a polaridade positiva como base para a relação velocidade de arame/corrente média, já que esta polaridade é a mais estável. Esta medida implica na necessidade de uma futura readequação dos parâmetros elétricos, devido à maior capacidade de fusão de arame da polaridade negativa.

A configuração da forma de onda AC é baseada no que é utilizado para a corrente pulsada. Há uma corrente e tempo de pulso para produzir energia necessária para a expulsão da gota. O pulso de corrente inicialmente também foi adotado

com base no que se tinha já consolidado para o Pulsado CC, no caso 320 A e 3,2 ms. Entretanto, a filosofia aqui empregada, a exemplo do retratado em [12], busca concluir o evento do destacamento em um menor nível de corrente, de modo a propiciar baixa aceleração das gotas e com isto uma maior estabilidade do processo. O patamar de baixa corrente que procede do pulso é denominado base de corrente positiva. Inicialmente foram adotados os valores de 40 A e 1,5 ms para a base positiva. Somente após a validação da sintonia entre velocidade de alimentação de arame-eletrodo e taxa de fusão é que estes parâmetros (pulso e base) pode ser finalmente ajustados.

Com os parâmetros de corrente e tempo da polaridade positiva definidos, se parte para o cálculo dos valores correspondentes à polaridade negativa. O tempo de arame em negativo (t_n) é dado em função da velocidade de alimentação com que se deseja soldar, do diâmetro do arame utilizado e do diâmetro de gota desejado; é calculado de acordo com as equações 2 e 3. O cálculo da intensidade da corrente de negativo (I_n) parte da equação da corrente média, como colocado na equação 4, visando a equalização entre taxa de fusão e velocidade de alimentação. Entretanto, para considerar a maior taxa de fusão da polaridade negativa que não foi levada em conta ao se adotar uma corrente média baseada somente na capacidade de fusão da polaridade positiva, foram acrescentados os termos k_n (constante de fusão de arame em negativo) e k_p (constante de fusão de arame em positivo), conforme a equação 5.

$$t_n = T - t_p - t_b \quad (2)$$

$$T = \frac{2 \cdot d_g^3}{3 \cdot d_a^2 \cdot V_a} \quad (3)$$

$$I_n = \frac{I_m \cdot T - I_p \cdot t_p - I_b \cdot t_b}{t_n} \quad (4)$$

$$I_n = \frac{I_m \cdot T - I_p \cdot t_p - I_b \cdot t_b}{t_n \cdot \frac{k_n}{k_p}} \quad (5)$$

A adequação da corrente negativa, demonstrada na equação 5, garantiu ao conjunto de parâmetros uma faixa mais ampla de atuação, possibilitando inclusive a operação em outras DBCPs (distância bico de contato-peça), o que é fundamental nas operações de cladding de tubulações, devido a sua geometria circunferencial. Nestas operações, além da própria geometria dos tubos, há também a sobreposição dos cordões, que muitas vezes é significativa (cordões com grande altura), que causam variação expressiva na DBCP.

A última etapa da metodologia de desenvolvimento da forma de onda para o MIG/MAG Pulsado AC consiste no refino dos parâmetros elétricos da forma de onda, visando obter uma transferência metálica repetitiva. A base de corrente positiva antecede o período de arame negativo, a exemplo do modo pulsado, sendo também um artifício utilizado para melhorar a estabilidade da transferência metálica.

O ajuste da corrente de pulso e tempo de pulso para o Pulsado AC deve ser tal, que o destacamento de gota se consubstancie apenas após o pulso de corrente.

O oscilograma da Figura 7 apresenta a forma de onda resultante, já com o refino de parâmetros, na qual foram estabelecidos 360 A e 3,2 ms para a corrente e tempo de pulso, respectivamente, além do patamar de base, que foi fixado em 40 A e 2,0 ms. O tempo em base positiva foi ligeiramente aumentado de modo a garantir destacamento de gotas na base mesmo com expressiva variação da DBCP.

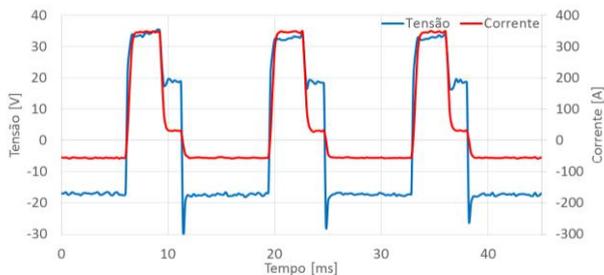


Figura 7. Oscilograma do processo MIG/MAG Pulsado AC desenvolvido.

Apesar de se ter alcançado adequada correlação entre a energia de soldagem e a taxa de alimentação de arame, filmagens em alta velocidade evidenciaram a fonte de instabilidades que ainda persistiam, em momentos da operação mais propensos a perturbações. Como mostra a Figura 8, em algumas das mudanças de polaridade, o supradescrito efeito de escalamento do arco sobre o arame não acontece na fase negativa do arame, incorrendo em falha de destacamento da gota no pulso de corrente seguinte, em polaridade positiva.

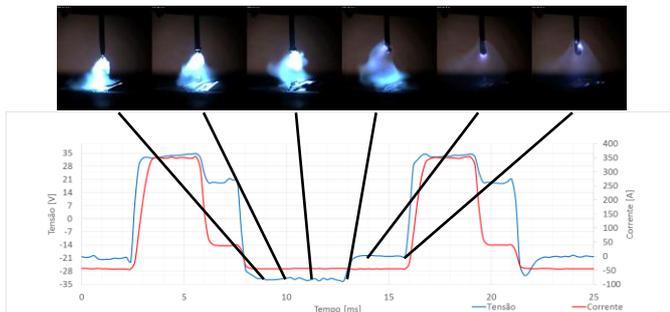


Figura 8. Quadros de filmagem em alta velocidade e oscilograma sincronizado, e falha no escalamento do arco na fase negativa do arame.

Este efeito foi atribuído a uma falta de pontos catódicos (emissores de elétrons) sobre o arame sólido, advinda do uso de Argônio puro como gás de proteção. Recorreu-se a uma adição de 2,5 de CO_2 no gás de proteção, com o intuito de forçar a oxidação local do arame, devido ao menor fator de trabalho (facilidade de emissão de elétrons) característico dos óxidos. Como pode ser observado na Figura 9, se obtive, assim, estabilidade dos pontos catódicos e da transferência metálica.

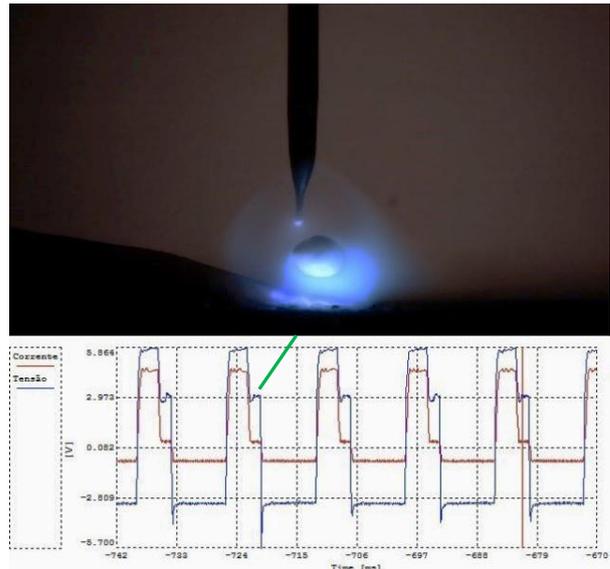


Figura 9. Quadros de filmagem em alta velocidade e oscilograma sincronizado, e falha no escalamento do arco na fase negativa do arame.

A solução para estabilização da transferência metálica acarretou, no entanto, em uma maior dificuldade de reacendimento do arco nas trocas de polaridade constantes da forma de onda em corrente alternada. O efeito decorre da maior condutividade térmica do CO_2 em relação ao Argônio, resultando em maior perda local de calor e tendência a desionização do arco nos momentos em que a corrente se aproxima de 0 A. Por isso, foi necessária uma intervenção no hardware da fonte, aumentando os pulsos sincronizados (estes pulsos são acionados nos momentos de troca de polaridade apenas, num circuito paralelo ao circuito de soldagem) de alta tensão e baixa potência de 600 V para 1000 V.

C. CMT

O processo CMT (acrônimo para Cold Metal Transfer) consiste numa variação do processo MIG/MAG, na qual se aplica uma corrente pulsada, porém, com transferência metálica por curto-circuito. Desta forma é possível uma redução da potência (e energia) de soldagem, pois se abre mão da energia que seria necessária para o destacamento da gota em voo livre, sem contato entre a gota e a poça de fusão, como acontece nas variantes anteriormente abordadas. Além disso, uma das fases da progressão da soldagem (a fase de destacamento de gota) se dá em curto-circuito, ou seja, com tensão e, conseqüentemente, potência extremamente reduzidas, o que contribui para uma redução global da energia de soldagem. Por outro lado, a tecnologia consiste num sistema de controle realimentado da corrente e da alimentação dinâmica de arame, de modo a se manter a estabilidade e regularidade da transferência metálica e da corrente média de soldagem, que não são possíveis no supracitado modo convencional em transferência metálica por curto-circuito (com controle de tensão). A Figura 10 ilustra a progressão do processo CMT, com oscilogramas de tensão e corrente e comportamento dinâmico da alimentação de arame.

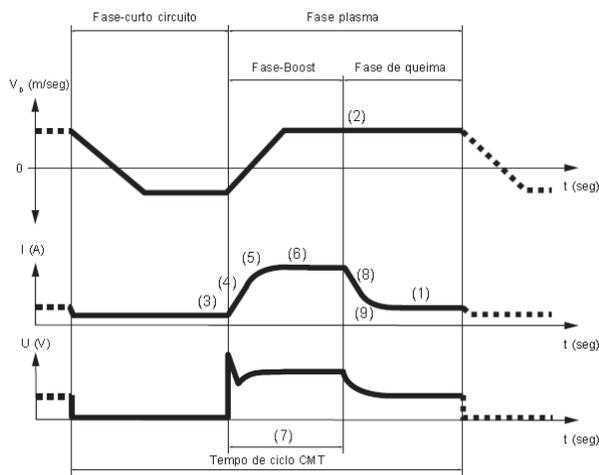


Figura 10. Comportamento dinâmico do processo CMT (tensão, corrente e velocidade do arame na ponta da tocha) [9].

As propriedades do CMT de baixa energia e regularidade da transferência metálica convergem diretamente com os requisitos de aplicações de revestimento por soldagem, baixa diluição e elevada qualidade superficial. Portanto, ele foi selecionado como um dos processos a serem abordados no projeto de P&D no qual este trabalho se insere. Ensaio de soldagem levaram ao desenvolvimento de parâmetros otimizados para aplicação de revestimento, cuja monitoração de variáveis elétricas é mostrada na Figura 11.

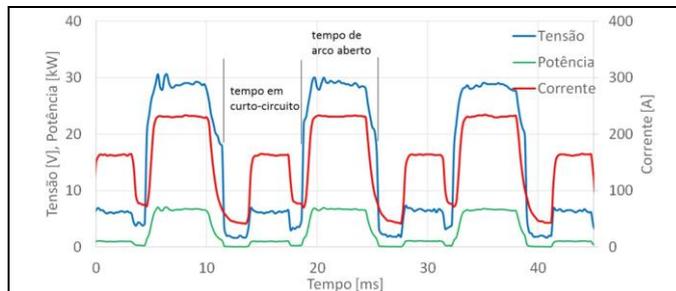


Figura 11. Oscilogramas de corrente, tensão e potência de soldagem do procedimento de soldagem desenvolvido com o processo CMT.

D. Comparação entre os Processos Investigados

O trabalho abordou versões do processo MIG/MAG com grande aplicabilidade para revestimentos metálicos por soldagem, sendo que o CMT e o MIG/MAG Pulsado já encontram aplicações industriais e o MIG/MAG Pulsado AC consiste em uma inovação gerada no projeto de P&D em questão, sem precedentes na literatura. Para complementar a análise, dentro da trajetória para a tomada de decisão final quanto ao processo a se adotar industrialmente, é necessária uma comparação entre os processos. Para isso, foi definida a situação geométrica de aplicação mais complicada em termos de estabilidade da poça de fusão e formação do cordão (na qual há tendência de escorrimento lateral da poça), que é a solda em um plano inclinado em relação à horizontal, simulando a lateral de um tubo de caldeira, como ilustra a

Figura 12. A própria performance em relação a esta situação de aplicação é critério de comparação entre os processos.

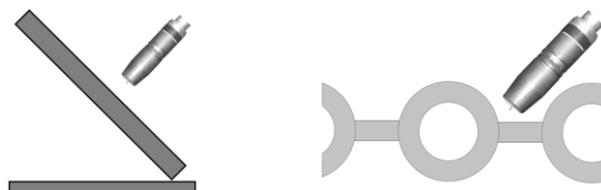


Figura 12. Configuração de aplicação de solda de revestimento para comparação entre processos.

As Tabelas 1 e 2 mostram os parâmetros finais de cada processo, aplicados no revestimento e os valores elétricos médios aquisitados, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros de regulação dos processos MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG Pulsado AC e CMT.

| | Pulsado CC | Pulsado CA | CMT |
|-----------------------------|------------|------------|-----|
| I_p (A) | 320 | 360 | -- |
| t_p (ms) | 3,2 | 3,2 | -- |
| I_b (A) | 83 | 40 | -- |
| t_b (ms) | 8,6 | 2 | -- |
| I_n (A) | -- | -43 | -- |
| t_n (ms) | -- | 8,2 | -- |
| V_a (mm/s) | 145 | 145 | 145 |
| Ca | -- | -- | -5 |
| A (mm) | 6 | 10 | 11 |
| F (Hz) | 3 | 3 | 3 |
| V_s (mm/s) | 10 | 10 | 10 |

Tabela 2. Parâmetros elétricos aquisitados dos processos MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG Pulsado AC e CMT.

| Valores lidos | Pulsado CC | Pulsado CA | CMT |
|----------------------------------|------------|------------|-------|
| V_a média (m/s) | 145 | 145 | 147 |
| Tensão média (V) | 24,8 | 20,2 | 14,81 |
| Corrente média (A) | 146 | 122 | 144 |
| Potência média (W) | 4127 | 3142 | 2700 |

Os procedimentos desenvolvidos para os três processos resultaram em satisfatório acabamento (Figura 13), o que se considera importante para aplicações de revestimento em caldeiras a carvão pela menor tendência a adesão mecânica de cinzas.

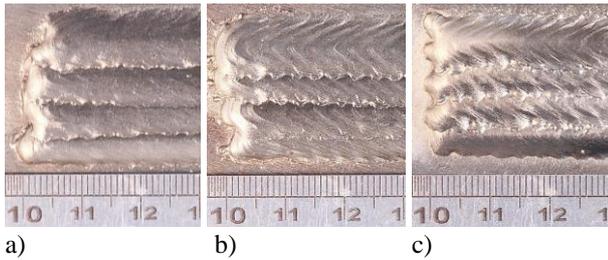


Figura 13. Aspecto superficial dos revestimentos aplicados com os processos a) MIG/MAG Pulsado, b) MIG/MAG Pulsado AC e c) CMT.

A Figura 14 mostra a seção transversal dos depósitos, de onde se extraíram os valores de diluição. O processo CMT apresentou a menor diluição, 3%, considerada baixa demais, apresentando riscos de falta de fusão pontual ao longo da região revestida, reduzindo a confiabilidade do revestimento. O processo MIG/MAG Pulsado AC resultou em 8% de diluição, suficientemente baixo e mais robusto em termos de garantia de fusão ao longo de toda a região revestida. Já o processo MIG/MAG Pulsado obteve 28% de diluição, valor considerado aceitável, mas ainda muito mais alto que o obtido pela versão AC.

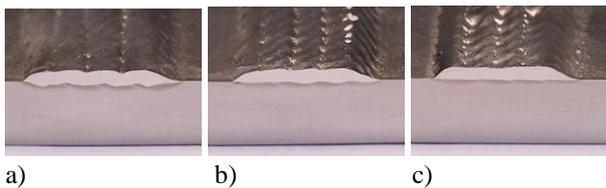


Figura 14. Seção transversal dos revestimentos aplicados com os processos a) MIG/MAG Pulsado, b) MIG/MAG Pulsado AC e c) CMT.

Considerado de grande potencial, e também por se tratar de uma inovação radical em termos de processos de soldagem para revestimento metálico com ligas resistentes à corrosão, o processo MIG/MAG Pulsado AC foi selecionado, no escopo do presente trabalho, para aplicação sobre um segmento de um painel real de parede d'água de caldeira de termelétrica. Como mostra a Figura 15, resultados satisfatórios foram auferidos tanto em termos de fusão adequada, como qualidade de acabamento.

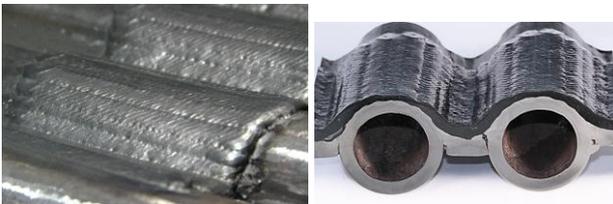


Figura 15. Revestimento de feixe de tubos de parede d'água com o processo MIG/MAG Pulsado AC desenvolvido.

III. PROCESSOS E SISTEMA DE SOLDAGEM PARA TUBOS INDIVIDUAIS

Além das paredes d'água, tubos são aplicados em outras regiões da caldeira, sendo que uma das mais afetadas por corrosão e erosão é o superaquecedor (SH). Portanto, para garantia de adequada operação destes componentes, contri-

buindo para aumento da disponibilidade de máquina, esforços de P&D para a mitigação do desgaste dos tubos instalados nesta região são plenamente justificáveis.

A aplicação do revestimento por soldagem para os tubos individuais se difere da aplicação sobre paredes d'água em alguns aspectos. No caso dos primeiros, o revestimento deve englobar toda a periferia circunferencial do tubo, enquanto no caso das últimas, o revestimento é depositado apenas em um de seus lados (o que fica exposto à cavidade da caldeira). Além disso, tubos individuais (ou solteiros) podem ser rotacionados sobre seu eixo longitudinal durante a soldagem, de modo que a tocha de soldagem pode ficar em uma posição relativa estacionária em relação ao tubo. Assim, se mantêm condições constantes ao longo do comprimento da solda do tubo.

Neste contexto, experimentos foram realizados para definição de um procedimento de soldagem para revestimento de tubos de aço 10CrMo9-10, via processo MIG/MAG Pulsado com adição de arame de aço inoxidável 309L. Também foi objetivo a investigação da influência do tratamento térmico superficial via processo de soldagem TIG pós-soldagem, no que tange às propriedades mecânicas do depósito. A Figura 16 mostra a bancada de testes desenvolvida e a Figura 17 mostra o posicionamento relativo das tochas em relação ao tubo processado. O movimento combinado do robô antropomórfico e da mesa rotativa gera uma trajetória helicoidal das tochas de soldagem ao longo do tubo, para abrangência de toda sua área superficial.

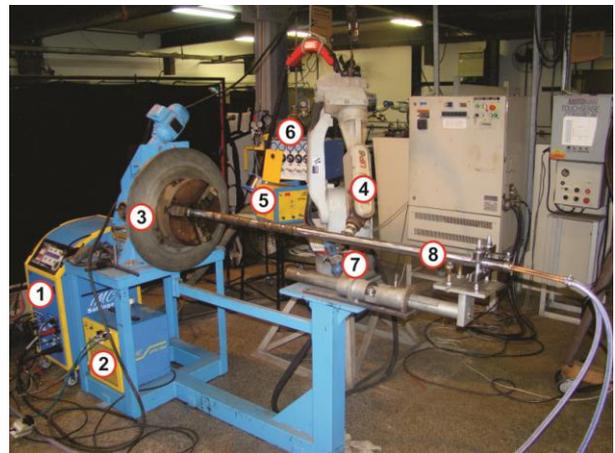


Figura 16. Bancada de testes para ensaios de revestimento e tratamento superficial pós-soldagem de tubos individuais de SH (1- Fonte de soldagem; 2- Unidade de Refrigeração; 3- mesa rotativa; 4- Robô; 5- Alimentador de arame; 6- Misturador de gases; 7- Tocha de soldagem MIG/MAG ; 8- Tubo de Aço 10CrMo910 de $d=38$ mm x $esp=6$ mm).

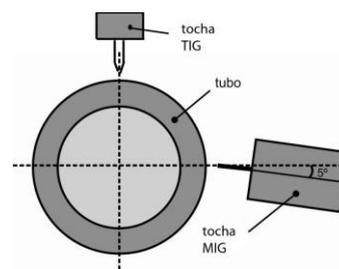


Figura 17. Configuração geométrica do posicionamento das tochas MIG/MAG e TIG em relação ao tubo a ser revestido.

Os ensaios levaram à definição de parametrização para ambos os processos, segundo a Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem MIG/MAG Pulsada e TIG, para revestimento e tratamento térmico superficial dos tubos, respectivamente.

| Processo | Parâmetros de Soldagem | Valores |
|----------|--|---------|
| MIG | Corrente de Pico - Ip (A) | 350 |
| | Tempo de Pico - tp (ms) | 4 |
| | Corrente de Base - Ib (A) | 90 |
| | Tempo de Base - tb (ms) | 8 |
| | Velocidade de Alimentação - Va (m/min) | 5 |
| | Distancia Bico de Cotato Peça (mm) | 13 |
| | Vazão de Gás (96%Ar, 4%CO2) (l/min) | 15 |
| TIG | Corrente de Soldagem - I (A) | 175 |
| | Distancia Eletrodo Peça (mm) | 3 |
| | Vazão de Gás (100%Ar) (l/min) | 15 |

Um segmento de tubo revestido e parcialmente pós-tratado via processo TIG foi preparado, conforme Figura 18, para análise metalográfica e de propriedades mecânicas, via ensaio de dureza. Na Figura 19 se observam as seções transversais das regiões sem tratamento TIG e com tratamento TIG, que mostram fusão adequada e satisfatória regularidade geométrica do cordão (com espessura média de 2,65 mm) e linha de fusão, mas com ausência de diferenças macroscópicas entre as regiões.



Figura 18. Segmento de tubo revestido e configuração dos cortes para extração de corpos de prova das regiões com e sem pós-tratamento superficial por processo TIG.

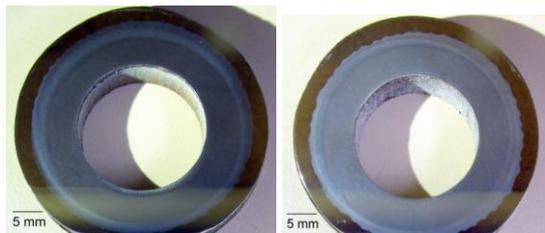


Figura 19. Seções transversais do tubo em regiões com, à dir., e sem, à esq., pós-tratamento superficial por processo TIG.

Um segmento de maior comprimento de tubo revestido, sem tratamento superficial foi submetido a ensaio de dobra-

mento, não apresentando falhas (Figura 20).



Figura 20. Tubo revestido submetido e aprovado em ensaio de dobramento.

A medição de dureza foi realizada via indentador Vickers com carga de 20 N ao longo de cada seção transversal, segundo a configuração da Figura 21, cujos resultados se encontram na Figura 22 (que mostra na linha verde horizontal o limite de fissuração a frio).

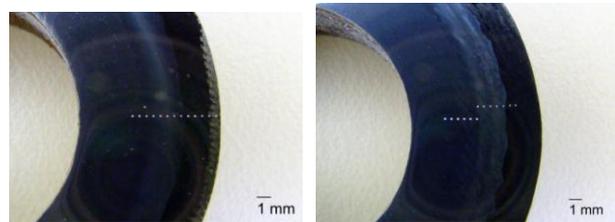


Figura 21. Configuração dos perfis de dureza medidos sobre os tubos revestidos com, à dir., e sem, à esq., pós-tratamento superficial por processo TIG.

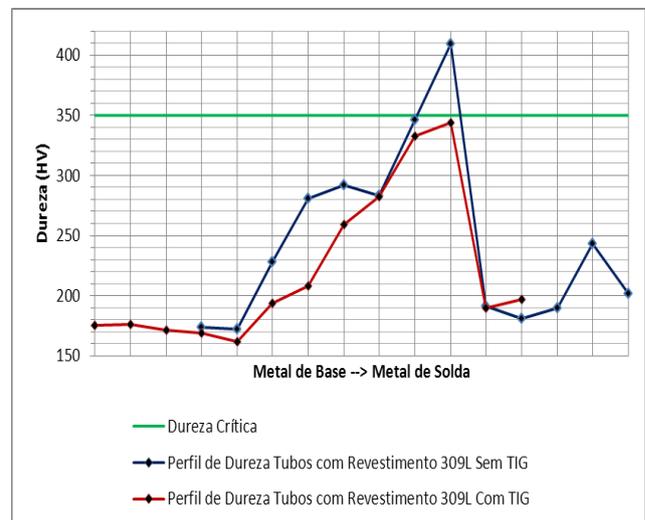


Figura 22. Valores de dureza das regiões com e sem pós-tratamento superficial por processo TIG.

O valor crítico de dureza para a formação de fissuração a frio é de 350 HV, e é possível verificar que com o passe TIG a dureza na ZTA teve uma queda significativa saindo da zona crítica. A explicação desta queda de dureza reside na morfologia da microestrutura formada na ZTA. Da Figura 23, é possível constatar que houve um refino de grao da ZAC e percebe-se que esta passou de uma morfologia tipicamente martensítica, portanto de características de alta dureza, para uma morfologia tipicamente perlítica, estrutura

menos dura.



Figura 23. Micrografias da região interfacial metal de solda - substrato, das regiões com, à dir., e sem, à esq., pós-tratamento superficial por processo TIG.

O sucesso obtido nos desenvolvimentos teve como desdobramento o projeto de um sistema integrado para aplicação do revestimento em escala industrial, que atualmente já vem sendo utilizado para satisfazer demandas da TRACTEBEL ENERGIA. Os primeiros passos para o início do projeto mecânico da máquina de revestir tubos solteiros (MRTS) foi todo voltado para pesquisar equipamentos existentes no mercado com função similar. Depois de uma sólida pesquisa técnica e da literatura o passo seguinte foi criar um modelo conceitual da MRTS com suas dimensões, Figura 24.

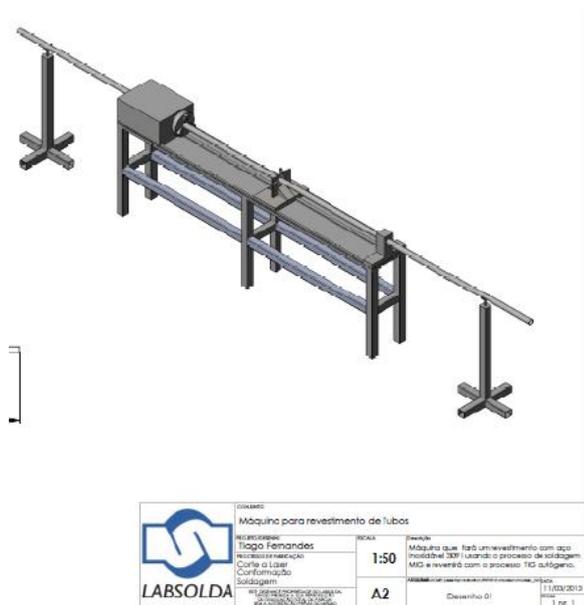


Figura 23. Modelo conceitual simplificado em CAD da MRTS.

Com o modelo conceitual e os requisitos de projeto deu-se início ao detalhamento da máquina, que foi dividida em cinco subsistemas: placa giratória, bancada, luneta, mesa e refrigeração. Cada subsistema tem uma função específica e foi tratado como um projeto à parte com o intuito de ao tér-

mino da modelagem de cada subsistema unir os blocos e obter a máquina por completo.

O desenvolvimento do subsistema Placa Giratória se iniciou com a seleção da placa de castanhas adequada, segundo o diâmetro dos tubos. Depois da escolha da placa deu-se início a montagem e cálculo do sistema de redução. Esse sistema foi montado a partir da rotação desejada na placa, conforme velocidade selecionada em ensaios de revestimento feitos no laboratório (item III). De posse da concepção do sistema de transmissão de movimento, redutor mais conjunto de engrenagens, faltou definir o componente de união com a placa giratória. A solução foi criar um mancal de união que usa rolamentos 80x125x22 mm, escolhido pela simplicidade e em função do diâmetro externo do tubo que liga a placa giratória ao sistema de redução. O passo seguinte foi modelar uma estrutura.

O subsistema Bancada tem como objetivo ser a estrutura para os componentes que irão operar. É de fato uma mesa, de simplificada concepção. O mais relevante sobre a construção deste subsistema foi a escolha de perfis de alumínio para sua construção. Tendo as duas hastes principais o perfil 50x100 mm e as secundárias o 50x50 mm. É nesse subsistema que são fixadas as guias lineares e a cremalheira que servirão para o deslocamento do subsistema Mesa.

O subsistema Luneta foi modelado em função da sua utilidade. Seu objetivo é servir de apoio para o tubo que será revestido. Sua concepção possui uma regulagem que permite a centralização do tubo com apenas um ajuste. Esse subsistema se adapta a comprimentos menores de tubo com os “pés” que permitem que ele “ande” sobre o subsistema da bancada, ampliando a faixa de aplicação do sistema.

A estrutura básica desse subsistema foi desenhada em função dos três apoios que irão tangenciar o tubo onde a centralização do tubo é dada com o ajuste na alavanca. Cada apoio é formado por um eixo usinado e uma peça de Celeron. Cabe ressaltar que o Celeron, é um plástico laminado técnico com reforços de tecidos de algodão e resina fenólica, fabricado através do processo de prensagem, onde é aplicada alta pressão e alta temperatura sobre o material, dando origem a um material duro e denso.

O subsistema Mesa é o que contém as tochas MIG/MAG e TIG que farão o revestimento e pós-tratamento dos tubos. Esse subsistema possui um mecanismo que se ajusta a possíveis anomalias do tubo. Esse ajuste mantém a distância das tochas constante durante o processo de revestimento do tubo. Tanto a tocha MIG/MAG, quanto à tocha TIG possuem um sistema de oscilação transversal formados por guia linear, carro e motor de passo.

O subsistema Refrigeração visa resfriar o tubo durante o processo de revestimento.

As Figuras 24 e 25 mostram os projetos 3D em CAD do sistema montado, em suas duas extremidades e a Figura 26 mostra o sistema físico construído e montado, em operação.

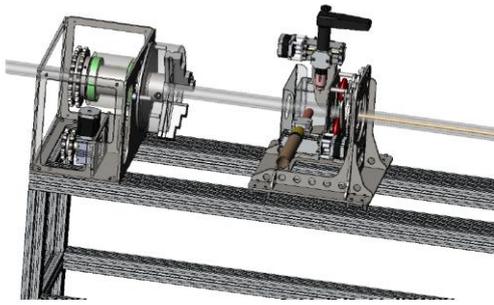


Figura 24. Detalhe dos subsistemas: placa giratória, bancada e mesa.

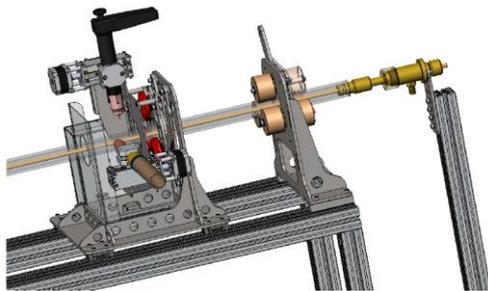


Figura 25. Detalhe dos subsistemas: bancada, mesa, luneta e refrigeração.



Figura 26. Sistema de revestimento de tubos individuais desenvolvido e construído, em operação.

IV. TÉCNICAS DE APLICAÇÃO

Para que se viabilize na prática a transposição das supracitadas vantagens da automatização para a aplicação de revestimento de paredes d'água, é objetivo do projeto global no qual o presente trabalho se insere o desenvolvimento de um manipulador dedicado. Este sistema deve prover a flexibilidade operacional, robustez mecânica e ferramentas de software que o habilitem a realizar revestimentos conforme processos descritos no item II. O desenvolvimento do Tartilope VX descrito em outros trabalhos [10] e mostrado na Figura 27, está em fase avançada, inclusive já tendo sido submetido a ensaio experimental em campo, na planta geradora da TRACTEBEL ENERGIA, em Capivari de Baixo, SC.

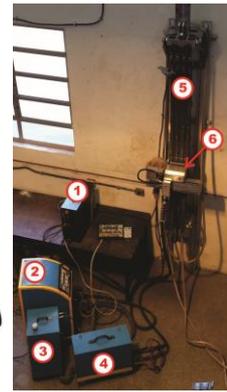
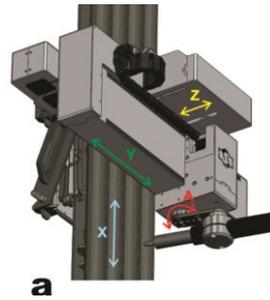


Figura 27. Manipulador Tartilope VX, dedicado a revestimentos de paredes d'água, modelado, à esq. e construído, em operação, à dir..

Este equipamento, concebido e projetado especificamente para o revestimento de feixes de tubos de paredes d'água, permite a investigação e desenvolvimento de técnicas diferenciadas de soldagem. Neste contexto, o presente trabalho aborda a questão da sequência de aplicação dos cordões sobrepostos, que perfazem o revestimento, no âmbito de seu impacto na distribuição térmica e de tensões sobre o feixe.

As sequências proposta pelo EPRI (Electric Power Research Institute) [11, 12], descritas na Figura 28 apesar de resultar em bom acabamento, incorrem em ovalização dos tubos, como pode ser visto na Figura 29 [10]. Propôs-se em [13] uma sequencia alternativa, descrita na Figura 30.

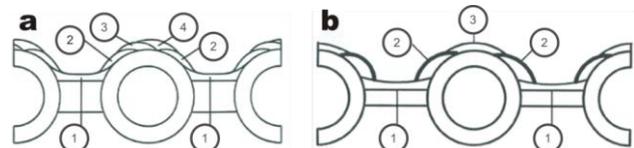


Figura 28. Sequencia de cordões proposta pelo EPRI [11, 12].

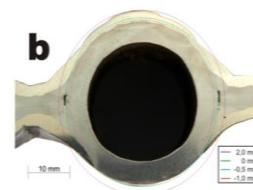


Figura 29. Ovalização resultante da sequencia de cordões proposta pelo EPRI.

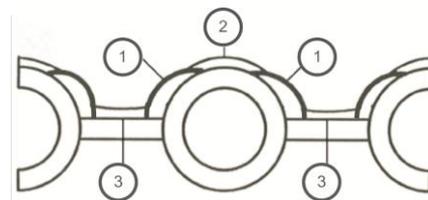


Figura 30. Sequencia de cordões alternativa, com vistas à minimização de ovalização dos tubos [13].

Portanto, foram realizados ensaios para verificação do desempenho da sequencia alternativa proposta em combinação com procedimento de soldagem desenvolvido no LABSOLDA, para configuração de aplicação diferenciada,

com o feixe posicionado na posição vertical (como na Figura 27). O material de adição foi arame de aço inox ER309LSi de diâmetro 1,0 mm e gás de proteção 95% Ar + 3% CO₂ + 2% N₂ com vazão de 15 l/min, em imposição de corrente constante na polaridade positiva de 200 A, velocidade de arame de 10 m/min e posição de soldagem vertical descendente. Os movimentos de oscilação da tocha são descritos na Figura 31, consistido em tecimento linear para os cordões sobre o tubo e tecimento pendular para os cordões sobre a membrana (permitidos pela concepção mecânica dedicada do Tartflope VX).



Figura 31. Movimentos de oscilação da tocha (tecimento) para cada tipo de cordão de solda (sobre tubos ou sobre membranas) para produção do revestimento.

Obteve-se confirmação do comportamento esperado, com a mitigação da ovalização, conforme a Figura 32, que também mostra o bom acabamento da solda de revestimento. Além disso, medições de diluição resultaram numa média, ao longo da seção transversal, de 19,45 %, praticamente dentro da faixa recomendada de 20 %, considerando faixas de erros de medição.



Figura 32. Revestimento produzido com a técnica alternativa de sequenciamento dos cordões e procedimento desenvolvido no LABSOLDA para soldagem na posição vertical.

Devido à grande área de aplicação dos revestimentos (feixes de até 6 m de comprimento, formados por quatro tubos ligados por membranas), o aquecimento resultante do processo de soldagem deve ser analisado, no que tange a deformações térmicas. Trabalhos futuros abordarão técnicas adicionais para tratamento de tensões e deformações térmicas. Mas ainda no escopo do presente trabalho se fez uma análise via videotermografia do comportamento térmico dos tubos quando submetidos à soldagem com e sem refrigeração interna com água. Verifica-se, na Figura 33, que o resfriamento pela passagem de água pelos tubos durante a soldagem é fundamental para redução do aporte térmico e das consequentes distorções térmicas, que acarretam problemas posteriores para instalação do feixe revestido na caldeira.

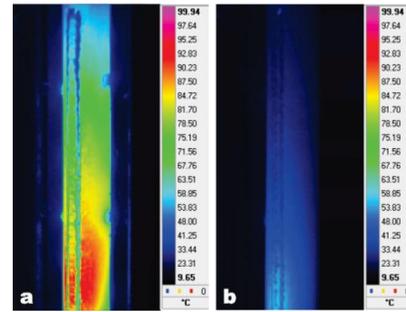


Figura 33. Comportamento térmico da parede d'água, monitorado via videotermografia: (a) sem refrigeração e em (b) com refrigeração.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho abrange um amplo espectro de desenvolvimentos inseridos em um projeto de P&D global. Nota-se um forte cunho de pesquisa aplicada, cujos resultados abrangem tecnologias de soldagem e sua automação para um problema de elevada relevância não só para a TRACTEBEL ENERGIA, como para todo o parque nacional de geração térmica, que é a redução da disponibilidade de máquina por falhas em componentes tubulares das caldeiras advindas de desgaste dos mesmos.

A solução existente para enfrentamento do desgaste sofrido pelas caldeiras é o revestimento por soldagem, e as tecnologias desenvolvidas e disponibilizadas no projeto demonstram capacidade para melhorar não apenas a produtividade da operação, como também a qualidade dos depósitos soldados. O impacto de ambas as vantagens é direto na disponibilidade de máquina, tanto quanto à maior confiabilidade dos revestimentos, como de contribuição para redução do tempo de parada para manutenção e extensão do tempo entre paradas.

Especificamente, se conclui que o processo MIG/MAG Pulsado AC tem grande potencial para a continuação e consolidação da solução tecnológica final. Para o caso dos tubos individuais, o revenimento superficial via processo TIG pós-soldagem se mostrou promissor e será testado no sistema mecanizado desenvolvido. Já as técnicas de soldagem desenvolvidas para as paredes d'água se consolidaram para a posição vertical de soldagem, e deverão ser testadas para a posição plana, atualmente sob investigação no LABSOLDA-UFSC.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda equipe do LABSOLDA e da empresa IMC-Soldagem pelo esforço e apoio prestados. Agradecimento especial também é dirigido à equipe técnica da TRACTEBEL ENERGIA SA, pelo envolvimento e interação no trabalho.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Egerland, S. A., Status and Perspectives in Overlaying under Particular Consideration of Sophisticated Welding Processes, QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, 27 (2), 01/2009
- [2] Lai, G. Y., Wensley, A. Metallurgical Characteristics and Performance Experience of Spiral Overlay Tubes in Black Liquor Recovery Boilers. 2005 Engineering, Pulping & Environmental Conference
- [3] Paul, L., Clark, G. A Higher Chromium Weld Overlay Alloy for Waterwalls and Superheaters, PowerPlant Chemistry 2009, 11 (8)
- [4] Amador, P., Lai, G. Application of Unifuse Overlay Tubes in the Convection Section of Waste-To-Energy Boilers, 11th North American Waste to Energy Conference, 2003
- [5] Lai, G. Y. FIRESIDE CORROSION AND EROSION/CORROSION PROTECTION IN COAL-FIRED BOILERS, Corrosion 2004, NACE
- [6] DUTRA, J. C.. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. Soldagem & Inspeção, v. 13, No. 1, p. 19-24, 2008.
- [7] SILVA, R. H. G. ; Dutra, J. C. . Thermal-pulsed MIG/MAG welding applied to the repair of cavitation erosion on large-scale hydraulic turbines. Welding and Cutting, v. 8, p. 27-30, 2009.
- [8] Cirino, L. M., 2009. Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG. Dissertação de Mestrado – PosMec/UFSC, Florianópolis, 97p.
- [9] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. Manual de instrução de operação - Controle Remoto RCU5000i. [S.l.], p. 241. 2010.
- [10] Dutra, J. C.; Bonacorso, N. G.; Silva, R. H. G.; Carvalho, R. S.; Silva, F. C.. Development of a flexible robotic welding system for weld overlay cladding of thermoelectrical plants- boiler tube walls. Mechatronics (Oxford), v. 24, issue 5, p. 416-425, August 2014.
- [11] Coleman, K. Application and repair of overlay welds. Electric Power Research Institute – EPRI. Technical Update 1009755. 2005.
- [12] Bakker, W. Materials Solutions for Waterwall Wastage - An Update. EPRI, Palo Alto, CA, USA, 2005.
- [13] Graig, E. et al. AquileX Corp. Method and system for weld bead sequencing to reduce distortion and stress. Int CIB23K 31/02. US007703660B2. 9 ago. 2007, 27 abr. 2010.