Desenvolvimento, Implementação e Transferência de Tecnologias para Enfrentamento do Problema de Desgaste de Estruturas Tubulares em Caldeiras - Soluções Dedicadas a Plantas Termelétricas Nacionais

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Jair Carlos Dutra, José Piotrovski Neto, João Facco de Andrade, Mateus Barancelli Schwedersky, Cleber Marques

***Resumo* – O desgaste em componentes de caldeiras representa um dos principais desafios na manutenção de usinas termelétricas a carvão, com impacto direto na disponibilidade de máquina. Dentre as alternativas empregadas para o enfrentamento deste problema, o revestimento via soldagem com ligas metálicas especiais consiste em uma das opções mais robustas. Neste contexto, a ciência dos materiais tem possibilitado inúmeros avanços, porém, para o caso dos componentes tubulares, a principal problemática reside no processo de aplicação destas ligas resistentes ao desgaste. O presente trabalho apresenta o histórico, as metodologias de projeto, os resultados finais, aspectos operacionais e desdobramentos de projeto de P&D, materializados por soluções tecnológicas integradas, compostas por sistemas dedicados, dotados de inovações em processos e procedimentos de soldagem e equipamentos para a sua automatização, que permitem maior qualidade e produtividade nas operações de revestimento. Descreve-se, em adição, a transferência tecnológica dos produtos gerados à empresa financiadora.**

***Palavras-chave* – Automação, GMAW Pulsado, Revestimento, Sistema Integrado, Soldagem MIG/MAG**

I. Introdução

Apesar da constante busca por fontes de energia renovável e energias limpas (no caso da ENGIE 85 % de sua capacidade instalada provém deste tipo de fontes), assim como meios para melhor aproveitá-las, é ainda considerável a importância das usinas termelétricas na complementação da matriz energética nacional. Um dos maiores desafios atrelados consiste em manter as usinas em total operacionalidade e disponibilidade de fornecimento, assim como buscar meios para o aprimoramento de sua eficiência. Neste contexto, a engenharia de manutenção destas plantas tem papel fundamental, pois o bom funcionamento dos diversos sistemas, bem como a identificação, desenvolvimento e implementação de melhorias, estão sob a responsabilidade deste setor.

Dentre os subsistemas de uma unidade de geração termelétrica, os evaporadores, também conhecidos como caldeiras, são elementos críticos para o devido funcionamento do ciclo de potência. Os tubos e demais componentes que integram o interior das caldeiras são submetidos tanto a esforços oriundos do fluido de trabalho (água/vapor) quanto aos elementos envolvidos na queima do combustível e nos seus produtos.

O carvão mineral é o combustível empregado no principal parque de geração termelétrica da ENGIE, o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), em Capivari de baixo, SC. As características deste carvão, juntamente a alguns fatores intrínsecos do funcionamento deste tipo de caldeira, ocasionam o desgaste dos componentes do lado dos gases, os quais ficam voltados ao interior da caldeira ou totalmente inseridos nela.

Este desgaste ocorre em função de basicamente dois mecanismos, a erosão e a corrosão. O primeiro, decorrente geralmente da ação do soprador de fuligem, cinzas leves e fundentes e partículas de carvão, e o segundo, decorrente dos produtos da combustão associados a altas temperaturas. São ilustrados alguns efeitos resultantes na Figura 1.

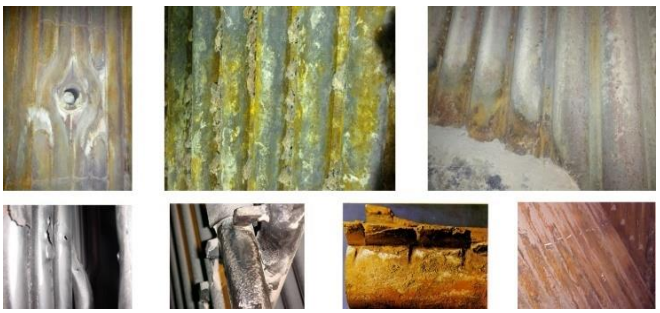

Figura 1. Fotos de paredes e componentes desgastados (linha superior) e consequentes falhas (linha inferior).

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 IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL). Este trabalho foi financiado pela empresa ENGIE (antiga TRACTEBEL ENERGIA) e parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

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

J. Piotrovski Neto trabalhava na TRACTEBEL ENERGIA SA, hoje ENGIE, no decorrer do projeto. Atualmente, se encontra aposentado (e-mail: jpneto@tractebelenergia.com.br).

O indevido controle e mitigação do desgaste nas regiões onde este ocorre de forma mais agravada pode ocasionar falhas decorrentes do rompimento/perfuração dos tubos e membranas, acarretando uma parada forçada da operação de toda a unidade, além das paradas programas de manutenção do sistema inteiro. As paradas abarcam não somente o tempo para as operações de manutenção, mas é necessário também um grande período de tempo para seu arrefecimento, reparo da região afetada e retomada da operação.

As alternativas normalmente empregadas para o enfrentamento da problemática do desgaste, e que integram a rotina de manutenção das caldeiras são: Substituição periódica (*Replacement*); Proteção com escudos/telhas (*Shielding*); Revestimento via Aspersão Térmica (*Thermal Spray*); Revestimento via soldagem (*Weld Metal Overlay*). Como medida paliativa, em alguns casos é aplicada uma massa refratária sobre os componentes, o que por um lado os protege, mas por outro impede a troca térmica. Dentre as alternativas apresentadas, trabalhos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] e experiências anteriores apontam o revestimento via soldagem como a opção de melhor desempenho e relação custo-benefício num horizonte de médio a longo prazo, uma vez que geralmente requer um maior investimento inicial.

Tratando-se do revestimento dos componentes via soldagem, verifica-se dois aspectos fundamentais: de que forma o processo é realizado, podendo ser manual ou de forma automatizada; e onde o processo é realizado, podendo ser no interior da caldeira (*in situ/in loco*) ou em oficina (*workshop*). Acerca do primeiro aspecto, é evidente e consumada a vantagem da realização de processos de soldagem de forma automatizada, uma vez que se pode obter melhor produtividade e qualidade quando se trabalha com volumes de produção suficientemente grandes. A Figura 2 apresenta dois feixes de quatro tubos espaçados por membranas, revestidos via soldagem em oficina para posterior montagem nas paredes da caldeira.

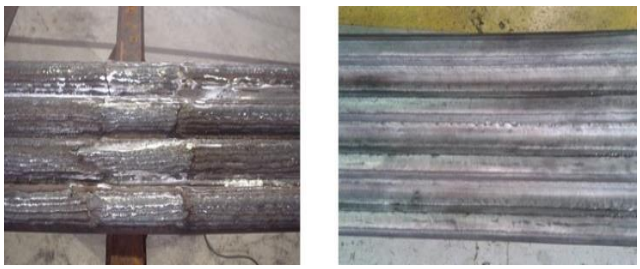

Figura 2. Feixes de tubo revestidos de forma manual (esquerda) e automatizada (direita).

Já o segundo aspecto, relacionado ao local de aplicação do revestimento, rende mais discussões. Em função da existência de uma série de peculiaridades associadas a cada opção, nem sempre é possível chegar a um consenso de qual delas é a mais interessante. Na Figura 3 podem ser observados revestimentos realizados no interior da caldeira.

Ambas as Figuras 2 e 3 evidenciam maior qualidade geométrica no caso da aplicação automatizada, em relação à soldagem manual.

Figura 3. Trechos de parede revestidos de forma manual (esquerda) e automatizada (direita).[1]

Neste contexto, a parceria LABSOLDA/ENGIE se lançou em busca de inovação, caracterizada neste caso pelo projeto intitulado "Desenvolvimento de uma Tecnologia Nacional Automatizada para o Revestimento e Fabricação por Soldagem de Tubos de Caldeiras e Tecnologias de Soldagem Associadas" de código PD-0403-0025/2011. O projeto se inseriu no tema Geração Termelétrica e já foi concluído, sob execução do Instituto de Soldagem e Mecatrônica - LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em estreita atuação com a equipe da ENGIE, direcionando o desenvolvimento para aplicação nas usinas termelétricas a carvão de sua propriedade.

A "Tecnologia" citada no título do projeto se desdobra em duas principais vertentes: os processos/procedimentos de soldagem e o sistema de soldagem responsável por desempenhar estes processos. A determinação dos requisitos associados aos processos e procedimentos de soldagem foi atrelada às características necessárias para que o revestimento cumpra sua função, como por exemplo: teor de cromo na superfície, espessura, acabamento superficial, taxa de desgaste anual, etc., abordadas em artigos anteriores [9, 10]. Já os requisitos do sistema de soldagem foram determinados em função dos processos e procedimentos desenvolvidos, suas solicitações dinâmicas e a geometria da peça a ser soldada. Tal metodologia teve de ser permeada de conceitos e práticas da engenharia simultânea, possibilitando o desenvolvimento paralelo e integrado das vertentes supracitadas.

O aumento da viabilidade técnica e econômica proporcionado pela automação do processo de revestimento também possibilita uma maior liberdade na sua aplicação, favorecendo a ampliação das áreas e elementos protegidos no interior da caldeira. Isto por sua vez, pode contribuir com o aumento da eficiência na geração, uma vez que a área de troca térmica é mais bem aproveitada, ao passo que regiões revestidas são menos afetadas por óxidos e pela ancoragem de partículas diversas que venham a diminuir a condutividade térmica da parede. Com isso, é de se esperar que uma parcela maior do calor gerado por meio da queima do carvão seja, de fato, aproveitada para o aquecimento da água/vapor e consequente conversão em energia elétrica na turbina/gerador.

Desta forma, os benefícios indiretos se estendem a outros temas e subtemas com foco ambiental, já que para uma mesma quantidade de energia gerada, menos combustível precisa ser queimado. Mesmo que o incremento na eficiência não pareça ser significativo (<<1%), em termos absolutos, considerando uma planta de geração que consome algo em

[1] Qualidade das imagens limitada devido ao ambiente desfavorável no qual foi feito o registro.

torno de 200.000 toneladas de carvão por mês, qualquer ganho de eficiência passa a ser representativo.

O presente trabalho aborda, de maneira holística, todos os aspectos do projeto, incluindo além da parte de desenvolvimento tecnológico, também o histórico das rotas tecnológicas adotadas e questões de metodologia e gerenciamento de projeto, com base em aspectos operacionais básicos do sistema final. Desta maneira, ele complementa os trabalhos apresentados em edições anteriores do CITENEL, que descreveram, cronologicamente, aspectos técnicos específicos [9, 10].

Portanto, de maneira geral, o projeto objetivou o desenvolvimento de um sistema integrado, constituído de um manipulador robótico com cinco graus de liberdade, uma fonte de soldagem e uma bancada de revestimento dedicada à fabricação dos painéis que integram a parede da principal caldeira do CTJL (caldeira sete). De maneira associada, foi gerado sistema rotativo com três eixos para revestimento de tubos individuais [10]. Os conhecimentos e produtos do projeto permitiram a aplicação dos procedimentos desenvolvidos no revestimento de 77 m² de tubos de sustentação da caldeira sete. Nesta empreitada foram depositadas cerca de duas toneladas de material de adição totalizando aproximadamente 25 km de cordões de solda. O sistema final para fabricação e revestimento de painéis de paredes d'água está em fase de transferência tecnológica para a empresa, segundo Proposta de Implementação acordada.

II. Desenvolvimento do Projeto- Metodologias e Gestão

A. Objetivo Geral

Diante do que foi apresentado sobre a problemática abordada e das possíveis alternativas tecnológicas, em consonância com a filosofia de atuação do LABSOLDA, foi encarado como objetivo geral do projeto o desenvolvimento das componentes necessárias para o efetivo emprego e aplicação do revestimento automatizado na mitigação do desgaste em componentes de caldeira. A Figura 4 ilustra as componentes envolvidas no objetivo.

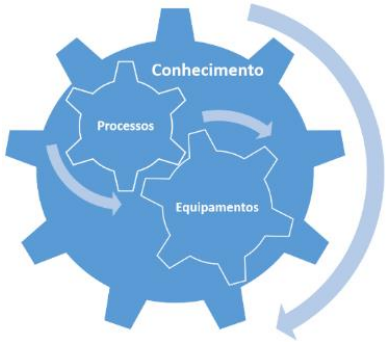

Figura 4. Componentes centrais do projeto (Conhecimento, Processos e Equipamentos).

A primeira e elementar componente considerada foi o conhecimento. Partindo da base já estabelecida, o conhecimento foi, ao longo de todo o projeto, identificado, criado, armazenado, compartilhado e aplicado. De maneira integrada a este processo, as demais componentes foram desenvolvidas, sendo elas os processos/procedimentos de soldagem e os diversos equipamentos empregados na automação e suporte aos processos de soldagem.

B. Equipe Desenvolvedora

O confronto com a problemática descrita representou um belo e desafiador trabalho de engenharia. A viabilidade de tal desenvolvimento, assim como seu potencial de sucesso, se deu pela pré-existência de uma base de conhecimento, a qual foi formada em projetos anteriores de temas correlatos. Além disso, é primordial a atuação integrada de uma forte equipe multi e interdisciplinar, já que o sucesso da automação da soldagem requer competências combinadas de diferentes engenharias e suas subáreas.

O LABSOLDA integra em sua equipe estudantes (graduação e pós-graduação), professores e profissionais (engenheiros, tecnólogos e técnicos) das áreas de mecânica, elétrica, automação, materiais, dentre outros, os quais se organizam em basicamente três subequipes. A principal delas, que atua na *core activity* do laboratório, consiste na equipe de processos de soldagem, que é apoiada e municiada pelas equipes de projeto mecânico e eletrônica.

Além das citadas equipes, o LABSOLDA conta com o constante apoio da empresa IMC-Soldagem, *spin-off* do próprio LABSOLDA. Este apoio permite uma maior integração entre os equipamentos empregados além de um desempenho e controle diferenciado dos processos de soldagem, o que é obtido por meio de configurações e ajustes dinâmicos dos parâmetros envolvidos no processo (programas sinérgicos).

Os trabalhos tiveram envolvimento contínuo dos pesquisadores da ENGIE, os quais participaram ativamente das reuniões e direcionamentos. Contou-se também com o apoio de diversos outros profissionais da empresa com extenso conhecimento acerca dos desafios, dificuldades e peculiaridades que compõem a rotina de manutenção das caldeiras. Estes interagiram ativamente nas visitas e aplicações realizadas pelos membros do LABSOLDA na ENGIE, as quais tiveram vital importância na definição das rotas a serem seguidas ao longo dos desenvolvimentos do projeto.

C. Planejamento e Metodologia

O modelo de planejamento tradicional (diagrama de *Gantt*), vinculado ao gerenciamento de projetos, não é de trivial utilização no caso de alguns projetos de P&D. Quando se tem a frente empreitadas que visam a expansão das fronteiras do conhecimento, como aquelas envolvidas em um desenvolvimento experimental na busca por inovação, a antecipada determinação das etapas e prazos pode se tornar uma tarefa laboriosa e imprecisa. Isso não quer dizer que não deva ser feito nenhum planejamento, mas sim, que este tenha algumas características diferenciadas e seja interpretado e utilizado da maneira apropriada.

O planejamento precisa ser flexível, dinâmico e deve se ater mais às macro etapas, de modo a não engessar os desenvolvimentos e acabar criando algo impossível de ser seguido, o que pode levar a seu completo desuso. Esta limitação na forma do planejamento requer, impreterivelmente, uma

ação diferenciada dos gestores no sentido de acompanhar o progresso das atividades com mais constância. Tal acompanhamento deve ser combinado com uma visão holística, propiciando o avanço do projeto como um todo. Estas considerações são baseadas na experiência da equipe executora com outros projetos de P&D de alto teor de inovação.

Neste sentido, no início do projeto, foi realizado um novo planejamento a partir do que foi estabelecido no projeto base (etapas e cronograma), acrescidos das frentes de trabalho correlatas, estipuladas em conjunto com a ENGIE. Para cada frente de trabalho e respectiva macro etapa, foi feito um fluxograma detalhando e dividindo as atividades de cada uma das equipes do laboratório. A sequência de execução das atividades se deu pela disponibilidade de recursos momentânea.

Por tratar-se de um desenvolvimento relativamente complexo, e com prazo restrito, tem de se recorrer a práticas da engenharia simultânea, por exemplo: não se pode esperar o primeiro protótipo do manipulador robótico ficar pronto para iniciar o desenvolvimento dos processos de soldagem, de modo que estes foram iniciados em sistemas alternativos como robôs antropomórficos e o manipulador Tartílope V4. O mesmo ocorre no caso do manipulador robótico, já que não se pode esperar ter um procedimento totalmente definido para se iniciar o projeto do sistema mecatrônico para desempenhá-lo. Tal fato implica na necessidade de uma boa sinergia entre as equipes, de modo que as necessidades, requisitos, limitações, funcionalidades e demais características sejam bem visualizadas por todos, já que a rápida convergência dos resultados depende de um sistema bem integrado.

Este *modus operandi* tende a gerar um sistema mais versátil e complexo no início, já que nesta fase ainda se tem muitas incertezas sobre as reais faixas de operação e requisitos. No entanto, a versatilidade nas etapas iniciais é algo interessante, e que deve ser buscado neste tipo de trabalho, uma vez que possibilita a especulação e consequente experimentação de uma gama maior de parâmetros e suas respectivas variações e combinações. Ao longo dos desenvolvimentos, ao passo que estes se aproximam de sua forma final, é possível adequar e filtrar as funcionalidades do sistema, simplificando-o quando possível de modo a deixa-lo mais robusto e economicamente viável.

D. Contextualização da Pesquisa

Localização da operação

A meta lançada no projeto base colocou a recuperação de tubos deteriorados (operação *in loco*) e o revestimento de tubos novos (operação em oficina) como objetivos a serem cumpridos por um mesmo sistema integrado (manipulador robótico e demais equipamentos associados). Deste modo, tal sistema deveria ser flexível e/ou adaptável para as duas operações. Desta forma, as atividades iniciais do projeto compreenderam: concepção de um manipulador robótico de arquitetura modular, o qual poderia, via reconfiguração de seus módulos, atender as duas situações de forma dedicada; desenvolvimento de procedimentos de soldagem para revestimento em oficina, nos quais foram utilizados robôs antropomórficos; desenvolvimento de procedimentos para revestimento *in loco*, utilizando também o manipulador Tartilópe V4; desenvolvimento do sistema de controle, tanto na parte de software quanto de hardware.

Os resultados iniciais alcançados nos procedimentos para revestimento em oficina foram promissores. A partir da base de conhecimento já existente, conciliada à competência da equipe executora, foi possível convergir rapidamente a parâmetros de processo e de movimentação (vertical descendente) que culminaram em um excelente revestimento, como pode ser verificado na Figura 5. Foram desenvolvidos parâmetros tanto para o emprego de Inox 309L quanto para o Inconel 625, que representam duas das principais ligas utilizadas para revestimento de componentes de caldeiras.

Figura 5. Bancada de Ensaios (esquerda), resultado com Inconel (centro) e 309 (direita).

Já no desenvolvimento relativo ao procedimento para revestimento *in loco*, o qual tem a orientação dos tubos restrita (conforme Figura 6), foi necessário mais tempo e esforço para obtenção de um procedimento satisfatório.

Figura 6. Bancada de soldagem com painel a 15° e acabamento do depósito transversal.

Apesar dos esforços relativos ao desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para aplicação do revestimento *in loco*, foi preciso ter em mente todas as condições de contorno envolvidas neste tipo de operação. Neste sentido, é fato que em outros países, como por exemplo nos Estados Unidos, o revestimento automatizado no interior das caldeiras é uma realidade. No entanto, isso ocorre não só em função do superior patamar de desenvolvimento tecnológico, mas também em função de favoráveis condições de contorno normalmente encontradas lá. Uma das principais delas diz respeito à qualidade do carvão utilizado como combustível das termelétricas, o que incide diretamente numa série de fatores determinantes na viabilidade técnica da aplicação da soldagem automatizada *in loco*.

A qualidade média do carvão mineral disponível no Brasil é muito inferior à média mundial. Segundo o USGS (*United States Geology Survey*) [11], podem ser verificados dados que ilustram esta diferença. Na Tabela I, são mostradas algumas propriedades relevantes.

Tabela I - Comparativo da qualidade do carvão Brasileiro [adaptado de 11].

Propriedades	Média* Mundial	Média do Brasil
Poder calorifico (MJ/kg)	23,3	14,8
Teor de Cinzas Efetivo (%)	20	72
Teor de Enxofre Efetivo (%)	1,34	5,28

*Média de amostras dentre as principais minas sem considerar as dos EUA.

A Figura 7 ilustra a elevada quantidade de cinzas no interior da caldeira.

Figura 7. Cinzas leves na parede da caldeira e processo de limpeza.[2]

Para melhor compreensão do impacto da qualidade do carvão na viabilidade do revestimento *in loco*, foram listados na Tabela II os oito principais fatores que têm influência na execução de um bom procedimento de soldagem automatizado. Dos oito fatores listados, quatro deles (*) estão fortemente atrelados à relativa má qualidade do carvão e suas consequências. A limpeza dos tubos é fundamental para a adequada deposição do metal de adição, do contrário, pode ocorrer porosidade, falta de fusão, instabilidade da poça de fusão e do arco gerando irregularidade do cordão depositado. Estes defeitos podem rapidamente nuclear trincas e outras descontinuidades que podem por sua vez ocasionar falhas e até o desplacamento de trechos do revestimento. No caso da aplicação do revestimento sobre componentes novos (em oficina) a limpeza destes é simples e em alguns casos pode ser até desnecessária. Já considerando a limpeza para o revestimento sobre trechos no interior da caldeira, a questão pode ficar complicada.

Tabela II. Fatores determinantes para o revestimento automatizado.

Fatores	*In loco*	Em oficina
Limpeza dos tubos*	Difícil/impossível	Simples/desnecessária
Acabamento da superfície *	Ruim (desgastado desbastado)	Ótimo (tubos novos)
Variação da espessura*	Ocorre	Não ocorre
Insalubridade do ambiente*	Alta	Baixa
Tempo disponível	Restrito	"Irrestrito"
Posição dos tubos	Restrita	"Irrestrita"
Irregularidade da parede	Alta	Pode ser controlada
Possibilidade de resfriamento	Não	Sim

[2] Qualidade das imagens limitada devido ao ambiente desfavorável no qual foi feito o registro.

O desgaste combinado com a adesão de partículas (cinzas fundentes, leves e carvão não queimado) pode gerar uma camada de difícil remoção (esquerda da Figura 7), já que é composta por óxidos e demais elementos de elevada dureza. Dos métodos de limpeza, o mais efetivo é via jateamento, o qual pode também ser crítico em função da aplicação em um ambiente confinado. Contudo, foi relatado pelo pessoal da equipe de manutenção da ENGIE, que em certas regiões da caldeira, nem o jateamento representa um método capaz de remover a camada formada sobre os tubos e membranas.

Considerando possível a limpeza das regiões a serem revestidas no interior da caldeira, impreterivelmente, estas ainda teriam um acabamento superficial irregular, já que o processo de limpeza é feito manualmente e está sujeito a habilidade do seu executor. Apesar da incessante busca por procedimentos de soldagem mais robustos, capazes de absorver pequenas imperfeições, nem sempre é possível sobrepujar todas elas, o que pode incorrer em eventuais defeitos e descontinuidades. Neste sentido, a variação da espessura do material de base, decorrente tanto do desgaste quanto do processo de limpeza dos tubos e membranas, representa uma variável crítica para a aplicação do revestimento. A incidência do arco elétrico e sua pressão sobre regiões de parede mais fina pode ocasionar a perfuração dos componentes, podendo ela ser visível (possibilitando o reparo) ou oculta, o que pode gerar falhas graves no momento da operação da caldeira.

A insalubridade do ambiente representa também um dos fatores críticos de maior peso, que por um lado corrobora com a necessidade de automação do processo, mas por outro, requer equipamentos mecatrônicos especiais para suportar as condições encontradas no interior da caldeira. No entanto, o nível de automação de passível obtenção, requer a presença de um operador, o qual deve monitorar continuamente a estabilidade do processo assim como efetuar eventuais correções. Este operador tem desempenho e segurança drasticamente afetados em função da insalubridade intrínseca do ambiente somada a aquelas agregadas pelo processo de soldagem em um ambiente confinado (radiação, fumos e respingos).

A questão do tempo disponível para realização do revestimento também é um fator crítico. As paradas para manutenção são planejadas para que seja possível realizar todas as operações necessárias com segurança e no menor tempo possível, já que a disponibilidade do sistema de geração depende disso. Tal fato implica na execução paralela de diversos serviços (esquerda da Figura 8), o que pode gerar um ambiente ainda mais insalubre e impróprio para a execução de um serviço de soldagem de revestimento. A área a ser revestida deve ser compatível com o tempo dedicado disponível, número de equipamentos e pessoal para operá-los. No caso do revestimento prévio de painéis em oficina, basta substitui-los nas regiões necessárias, o que pode ser feito de forma mais rápida e simples (na maioria dos casos) de modo que possa ser realizada paralelamente a outros serviços adjacentes e cobrir uma maior área.

Figura 8. Fotos ilustrando operações paralelas e atmosfera insalubre do interior da caldeira.[3]

Uma questão extremamente importante em processos de soldagem é a posição na qual o cordão é depositado, já que o processo lida com uma poça de metal fundido a qual está sujeita a diversas forças, dentre elas a força peso (gravidade). Para a adequada estabilidade da poça de fusão, devem ser estabelecidos parâmetros tais que equilibrem estas forças culminando em um cordão contínuo e com as características desejadas. Quando o processo é realizado sobre estruturas fixas (parede *in loco*), não se tem liberdade para escolher a posição de soldagem, no entanto, quando realizada em componentes relativamente móveis (painéis em oficina), deve ser analisada e selecionada a posição que favoreça o atendimento dos requisitos de qualidade, produtividade e ergonomia, considerando que o soldador/operador precisa de segurança e conforto para trabalhar de forma eficiente ao longo de toda a jornada.

A automação de um procedimento de soldagem é favorecida quando a peça de trabalho tem geometria mais simples e com pequenas variações em relação às dimensões nominais. A presença de irregularidades, como aquelas muitas vezes verificadas nos tubos e membranas que compõem as paredes (falta de planicidade, paralelismo dos tubos e demais distorções), agrega uma dificuldade maior na obtenção de um processo estável com poucos defeitos. No caso do revestimento em oficina, é possível utilizar gabaritos e outros acessórios que contribuem com a uniformidade da geometria do painel a ser revestido.

Operações de revestimento tem geralmente longa duração, apesar da contribuição da automação para a produtividade, os processos podem levar várias horas e até dias, dependendo é claro da área a ser revestida. Em função disso, o sobreaquecimento da peça de trabalho deve ser controlado, o que pode ser feito com a adoção de menores potências do arco, intervalos entre o depósito dos cordões ou com o arrefecimento da peça de trabalho. No interior da caldeira, a única opção viável é a realização das pausas supracitadas aliada à utilização de menores potências, quando que em oficina, é possível aproveitar os próprios tubos para o arrefecimento circulando água no interior destes. O arrefecimento permite também, uma maior estabilidade do processo de soldagem, o que resulta em uma maior homogeneidade do revestimento e suas características, além de uma maior produtividade, uma vez que se pode empregar potências também maiores.

A construção e validação do vasto conhecimento supracitado, referente aos fatores relevantes para aplicação do revestimento automatizado *in loco* versus em oficina, se deu ao longo de todo o projeto. Isto foi possível por meio da busca e compartilhamento de informações que se deram tanto no dia a dia dos trabalhos quanto em importantes visitas técnicas a ENGIE. Nestas visitas foi possível, em duas oportunidades, a entrada da equipe do LABSOLDA nas caldeiras 4 e 7 do CTJL, as quais passavam por períodos de manutenção.

A experimentação das condições encontradas no interior das caldeiras foi fundamental para que a equipe executora compreendesse, de fato, a realidade das rotinas de manutenção, seus desafios, e o grau de insalubridade e confinamento atrelados ao interior das caldeias. Apesar da existência das raízes deste conhecimento já no início do projeto, este ainda não estava tão bem delineado e formulado, no entanto, já se tinha uma forte intuição de sua relevância.

Deste modo, de acordo com o objetivo geral do projeto, que visou o efetivo emprego do revestimento automatizado na mitigação do desgaste, foi decidido em conjunto com a ENGIE, que a concentração de esforços no desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para revestimento em oficina, representaria a opção mais sensata e realista no contexto apresentado. Contudo, é importante ressaltar que mesmo em oficina, a aplicação automatizada do revestimento representa ainda um grande desafio, como evidenciado na sequência deste trabalho.

Montagem e Fabricação dos Painéis

A parede das caldeiras é composta por tubos, por onde circula a água/vapor, e tiras de espaçamento comumente chamadas de aletas ou membranas (Figura 9). A união entre estes componentes, quando fabricados novos painéis (unidades de substituição das paredes) no CTJL, é realizada via soldagem MIG/MAG manual. Considerando que estes painéis sejam instalados diretamente na caldeira, sem revestimento, o processo manual empregado é satisfatório. No entanto, quando se tem a intenção de aplicar o revestimento automatizado, as variações provenientes tanto da soldagem manual quanto da preparação das peças a serem unidas, representam um fator crítico para a viabilidade da automatização. Para solução desta questão, foi também assumida a responsabilidade pelo desenvolvimento do processo automatizado de união entre tubos e membranas que antecede o revestimento.

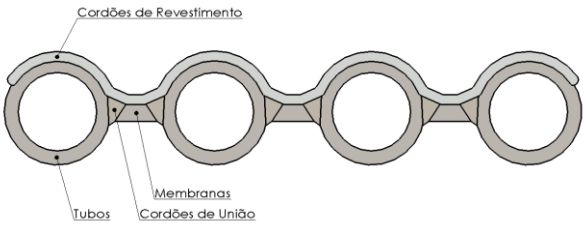

Figura 9. Representação da seção transversal do painel pronto.

[3] Qualidade das imagens limitada devido ao ambiente desfavorável no qual foi feito o registro.

Em função da geometria delgada dos componentes, isto é, têm seu comprimento muito maior que a largura, o processo de união automatizado não é de trivial execução. O aporte térmico concentrado decorrente do processo de soldagem conciliado a fusão e solidificação do metal acarretam, impreterivelmente, na criação de um campo de tensões/deformações. Este campo por sua vez, pode gerar distorções e movimento relativo entre os componentes, o que compromete a execução do processo de união. Numa pesquisa sobre o tema, verificou-se que fabricantes de paredes de caldeira utilizam sofisticados equipamentos com múltiplas tochas para a execução do processo de união entre os tubos e membranas. Devido à restrição de recursos (tempo, capital e pessoal) disponíveis no projeto, o desenvolvimento de um equipamento dedicado para a operação de união tubo-membrana não representava uma alternativa viável. Deste modo, esta função recaiu ao manipulador robótico a ser desenvolvido, o qual deveria também desempenhar o revestimento.

Outro desafio vinculado ao revestimento em oficina, também associado à questão supracitada sobre distorções, é o empenamento resultante do painel após o seu revestimento. O lado do painel que precisa ser protegido é aquele que fica voltado para o interior da caldeira, de modo que o revestimento é feito de um lado só (Figura 9). A contração do material após sua solidificação gera tensões cuja resultante é forte o suficiente para curvar o painel, de modo que o lado que foi revestido fica côncavo. Mesmo fixando o painel na posição retilínea durante seu revestimento, o empenamento ocorre, já que as tensões residuais são dominantes sobre as tensões térmicas (transientes). A ordem de grandeza do empenamento impossibilita a posterior montagem dos painéis na caldeira, uma vez este deverá compor um trecho de uma parede plana. Como pode ser observado na Figura 10, o empenamento é um problema que afeta tanto painéis revestidos manualmente quanto de forma automatizada. No entanto, em função da maior homogeneidade e controle da espessura do revestimento realizado de forma automatizada, é possível afirmar que esta pode contribuir com a amenização do empenamento.

Figura 10. Painéis empenados após revestimento (manual esquerda e automatizado direita).

De qualquer forma, em ambos os casos é necessária a correção da forma dos painéis, o que pode ser feito, por exemplo, com a ajuda de uma calandra munida de dispositivos especiais para não achatar os tubos. A equipe da oficina do CTJL já teve uma extensa experiência na resolução desta questão, uma vez que em uma empreitada recente foram revestidos manualmente cerca de 100 painéis, os quais precisaram ser todos desempenados. Neste sentido, se contou inicialmente com o *know-how* e infraestrutura da ENGIE para esta tratativa, deixando a questão do empenamento como algo a ser resolvido a posteriori.

E. Desenvolvimento do Sistema de Soldagem

No contexto apresentado, em termos do objetivo, metas, resultados preliminares, condições de contorno, direcionamentos e desafios, foi desenvolvido e construído o protótipo do sistema de soldagem de painéis para operação em oficina. A componente mecatrônica do sistema, que consiste no manipulador robótico, foi concebida e dimensionada de acordo com os requisitos dinâmicos estabelecidos no desenvolvimento do procedimento de soldagem para oficina. Tais requisitos foram associados aos pré-requisitos padrão de manipuladores para soldagem, que são: Robustez (resistência para operação em nível industrial, o que está associado a longos períodos de trabalho ininterruptos e ambientes insalubres); Mantenabilidade (facilidade, acessibilidade e simplicidade de execução das operações de manutenção, tanto mecânicas quanto eletrônicas); Portabilidade (compacidade de sua estrutura, ergonomia associada a sua operação e transporte, possibilidade de armazenagem em recipientes rígidos).

Como pode ser observado na Figura 11, o manipulador se desloca sobre um trilho semi flexível acoplado diretamente na face traseira (a qual não é revestida) do painel. Desta forma, o painel fica livre pare se deformar, mas não ocorre alteração da posição relativa da tocha em relação ao painel, já que o trilho do manipulador acompanha a curvatura do feixe de tubos.

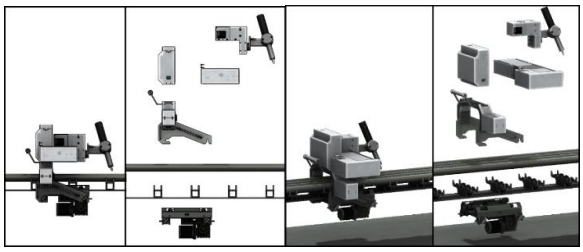

Figura 11. Vistas normais e explodidas do protótipo desenvolvido.

Os apoios do trilho foram desenhados com o perfil do painel, de modo a agirem como gabarito de posicionamento para os tubos e membranas. A fixação dos apoios no painel foi feita via soldagem de pinos (*Studwelding*), os quais podem ser removidos após a conclusão do revestimento.

Os quatro eixos automáticos incorporados no manipulador (Figura 12) se mostraram suficientes para a execução das trajetórias de movimentação necessárias, sendo eles: o eixo X corresponde ao deslocamento linear ao longo da soldagem; o eixo A, ao ângulo de trabalho da tocha; e os eixos Z e Y, referentes à altura e posição transversal respectivamente. O movimento de tecimento, que corresponde a uma oscilação da tocha no sentido transversal a direção de soldagem, é fundamental em uma operação de revestimento automatizado. No caso do procedimento desenvolvido, ele é desempenhado pelos eixos Y (quando no cordão do topo do tubo), A (quando no cordão sobre a membrana) e com a ação com-

binada dos eixos Y e Z (quando no cordão da lateral do tubo).

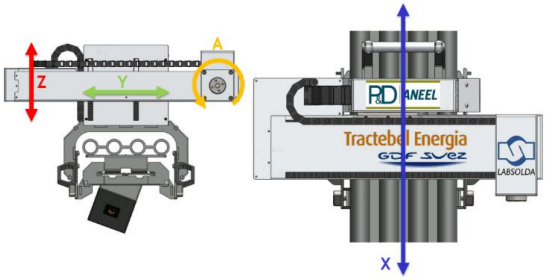

Figura 12. Eixos de movimentação do protótipo.

O movimento de tecimento é o que exige maior dinâmica do sistema, já que os motores precisam inverter seu sentido de movimento várias vezes por segundo, uma vez que foi verificado nos ensaios de soldagem que o perfil de penetração e acabamento do cordão são muito beneficiados com o incremento da frequência de tecimento. Para tanto, foram selecionados e incorporados aos eixos mais solicitados (Y e Z) sistemas de transmissão e motores apropriados (fuso de esferas recirculantes e servo motores), de modo que o manipulador pudesse desempenhar frequências de tecimento de até 5Hz para as amplitudes de oscilação necessárias.

Como pode ser observado na Figura 13, a bancada de soldagem foi montada com o painel na posição vertical, de modo que a gravidade tivesse participação importante na progressão da poça de fusão (vertical descendente), propiciando uma maior velocidade de soldagem assim como melhor acabamento e baixa penetração. A bancada de soldagem foi montada para suportar painéis de 2 metros, onde foram realizados diversos ensaios em laboratório, por meio dos quais foi possível a implementação de alguns aprimoramentos no sistema mecatrônico e o aperfeiçoamento do procedimento de soldagem. Este último foi testado em uma série de modalidades e variantes distintas do processo MIG/MAG (convencional com transferência por curto-circuito, por *spray*, modo pulsado, pulsado misto, CMT, dentre outros), cada qual com seus prós e contras de acordo com os distintos cenários prospectados e avaliados.

Após a obtenção de um sólido procedimento de soldagem associado a um desempenho estável e robusto do sistema de soldagem, foi dado início aos preparativos para a aplicação do sistema em campo, que no caso, corresponde a oficina do CTJL. Para tanto, foi estabelecida a meta de revestir um painel de 3 metros de comprimento, o que necessitou de uma bancada diferenciada (Figura 14), uma vez que não seria adequado a fixação da bancada na parede da oficina.

Apesar de problemas operacionais observados, o que é de certa forma comum em etapas de aplicação experimental de protótipo em campo (pois se têm condições diferentes das de laboratório, mais controladas), a atividade foi considerada válida, já que a meta de revestir um painel de 3 metros foi cumprida com resultado satisfatório. A experiência obtida nesta aplicação permitiu uma reflexão acerca de alguns aspectos do sistema mecatrônico integrado, da posição de soldagem do painel e da questão relacionada ao empenamento do painel.

Figura 13. Modelo 3D e foto da bancada de soldagem vertical.

Figura 14. Aplicação experimental de protótipo em campo.

Esta reflexão foi seguida de análises, as quais fundamentaram ações no sentido de aprimorar a operacionalidade e desempenho do sistema desenvolvido. As duas principais ações corresponderam ao desenvolvimento de procedimentos para soldagem do painel na posição horizontal, e ao desenvolvimento de um sistema de controle do empenamento. Em função do comprimento usual dos painéis fabricados (6 metros), e da percepção da receptividade da estrutura vertical empregada na aplicação em campo (4 metros), foi constatado que a infraestrutura necessária para a adequada fabricação de painéis revestidos na posição vertical não seria apropriada para operação na oficina do CTJL. Deste modo, foi dado início ao desenvolvimento de um procedimento para revestimento do painel na posição horizontal, possibilitando assim uma infraestrutura mais simples associada a uma operação mais segura e ergonômica. Paralelamente, foi avaliada inapropriada a opção inicial por deixar o painel livre para empenar (contando com a correção a posteriori), de modo que foi buscada e desenvolvida uma alternativa mais elaborada no sentido de facilitar ou até dispensar a operação de desempeno.

O integrado desenvolvimento das duas ações acima justificadas culminou no projeto e fabricação de uma bancada de soldagem com mais mobilidade (Figura 15), a qual permite a rotação do painel em torno de seu comprimento assim como a aplicação de um contra empenamento.

O primeiro recurso se fez necessário para possibilitar a deposição dos vários cordões de revestimento na mesma posição relativa, posição plana de soldagem, (esquerda da Figura 16), de modo a evitar o escorrimento decorrente da inclinação da lateral dos tubos. Esta rotação foi implementada com o emprego de mancais graduados nas extremidades da viga na qual é fixado o painel. Já o segundo recurso, o

contra empenamento, consiste na forma encontrada para que a geometria final do painel após o revestimento seja praticamente plana, dispensando o complicado e trabalhoso processo de desempeno. Isso foi possível a partir do cálculo da curva ideal da viga na qual o painel deve ser fixado, o que por sua vez se dá pela ação de um mordente (direita da Figura 16), o qual é responsável pela aplicação da força e consequente deformação elástica do painel.

Figura 15. Modelo 3D e foto da bancada de soldagem horizontal.

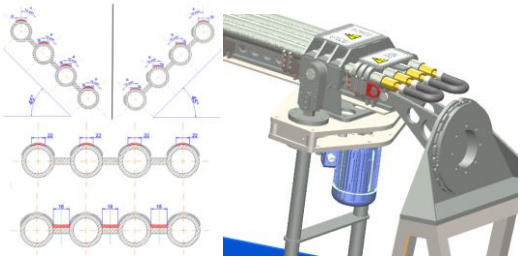

Figura 16. Posições de depósito dos cordões e sistema mordente do painel.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com a nova bancada foram também promissores, ao passo que foi constatado, após o revestimento completo de um painel que sua geometria resultante foi, de fato, praticamente plana. Em termos do processo de soldagem, foi possível obter parâmetros do processo MIG/MAG Pulsado que resultaram em um revestimento adequado. Como já esperado, a produtividade e acabamento foram um pouco inferiores ao procedimento com o painel na vertical, mas ainda dentro da faixa considerada aceitável.

A nova bancada também permitiu a intensificação do desenvolvimento do procedimento de união tubo membrana (Figura 17), que se mostrou ainda mais complicado do que o esperado.

Figura 17. Ensaios de união tubo membrana.

O principal requisito estabelecido para a junta de união consiste na obtenção de penetração total. Para tanto, geralmente são realizados dois passes, um de cada lado da junta, de modo a sobrepor a zona fundida e consequentemente garantir a penetração total. No entanto, este procedimento comumente resulta em um cordão relativamente proeminente, o que de certo modo atrapalha o posterior processo de revestimento. Com o intuito de contornar este problema, aliando ainda um aparente aumento de produtividade ao processo, se prospectou a realização do procedimento de união via passe único. Para tanto, foram realizados ensaios com os chamados processos MIG/MAG de alta energia, os quais tem a prerrogativa de alcançar maiores valores de penetração. No entanto, diante da dificuldade de obtenção de resultados satisfatórios, partiu-se para a execução do chanframento das membranas, o que facilita muito a obtenção da penetração total aliada a um cordão de contorno suave.

Com isso, foram atingidos bons resultados nos desenvolvimentos iniciais em corpos de prova de tamanho reduzido (0,5m). O *backing* de cobre, que consiste num componente adotado para dar suporte a parte de trás da junta (raiz), foi incorporado na bancada horizontal. Deste modo, o processo de união poderia ser seguido do processo de revestimento sem que fossem necessárias alterações na fixação do painel junto à bancada. A complicação emergiu no momento da validação do procedimento desenvolvido nos painéis de maior comprimento (3m), sendo observados três problemas críticos. O primeiro deles, decorrente da variação da geometria do chanfro, o que incorreu em um *gap* variável entre a membrana e o tubo (esquerda da Figura 18). O segundo, relacionado à variação de distância entre o backing e a membrana, de modo que em certas regiões estes ficavam encostados (ideal) e em outras existia uma fresta. E o terceiro e mais crítico, referente a movimentação da membrana durante a soldagem, como resultado da contração do primeiro cordão, que "puxa" a membrana para perto de um tubo, se afastando do outro (centro da Figura 26).

Figura 18. Problemas encontrados na soldagem de união tubo membrana.

Apesar de providências que vieram a resolver todas estas questões (chanframento automático, aprimoramento da fixação da membrana e *backing*), surgiu outro problema mais grave. A potência necessária para garantir a efetiva penetração total sem a ocorrência de falta de fusão e outros defeitos, foi alta o suficiente para fundir alguns trechos do *backing* de cobre. Isso acarretou na soldagem involuntária do *backing* junto ao painel, o que fatalmente impede que o painel seja removido da bancada. A remoção forçada danificou as barras de cobre utilizadas como *backing* (direita da Figura 18) que não podem ser tratadas como consumíveis em função de seu elevado custo. A solução consistiu na readoção da soldagem bilateral, mantendo os chanfros, mas realizando inicialmente o chamado passe de selo, o qual dispensa o uso do *backing*.

Deste modo, foi considerado oportuno o momento para início do projeto do sistema mecatrônico definitivo, já que os procedimentos a serem desempenhados pelo manipulador se encontravam bem definidos. Além disso, a extensa utilização do protótipo forneceu valiosos subsídios para o projeto do sistema definitivo. A Figura 19 mostra o projeto do

sistema resultante, onde foram implementadas diversas melhorias e também realizada uma importante mudança na configuração dos seus eixos de movimentação.

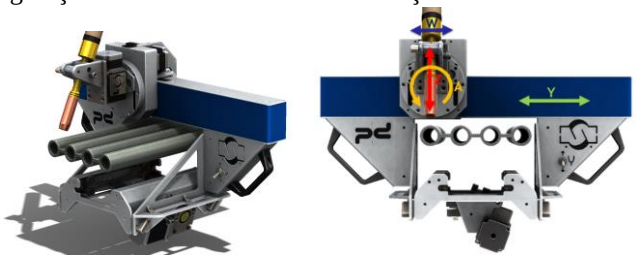

Figura 19. Projeto do manipulador definitivo.

Ao contrário do protótipo, no qual foram incorporadas 3 juntas prismáticas (X, Z e Y) e uma rotacional (A), descrito em artigo anterior [9], o sistema definitivo contou com 4 juntas prismáticas (X, Y, Z e W) e uma rotacional (A). Além do incremento no número de eixos, foi realizada também uma reordenação destes, deixando de utilizar a sequência X-Z-Y-A para empregar a sequência X-Y-A-Z-W. Todas estas alterações foram necessárias para acomodar o eixo W, o qual foi concebido e projetado especialmente para o movimento de tecimento (*weaving*). Como já colocado anteriormente, o movimento de tecimento representa aquele de maior requisito dinâmico, considerando a necessidade de inversão do sentido de rotação do motor. No entanto, foi elaborado um mecanismo que permite a oscilação da tocha sem que haja as citadas inversões.

Deste modo, pôde ser feita a seleção de um motor mais simples e compacto (motor de passo). A implementação de um eixo dedicado para o tecimento também possibilitou a simplificação dos demais eixos (Z, Y e A), uma vez que estes ficam estáticos ao longo da soldagem, sendo utilizados apenas para eventuais correções além do posicionamento e orientação da tocha.

Em consonância com as alterações mecânicas apresentadas, foi realizado também o desenvolvimento do sistema de controle definitivo, considerando tanto a parte de hardware quanto de software. Ambas as partes têm papel fundamental no desempenho do equipamento, sendo estas responsáveis pelo funcionamento e integração do sistema de soldagem como um todo. Além de controlar os motores do dispositivo manipulador e ser responsável pela geração das trajetórias de soldagem, o sistema eletrônico de controle permite a realização das funções de interface com o usuário e de interface com a fonte de soldagem. É este sistema de controle que, por exemplo, chama os programas de soldagem previamente configurados na fonte, de acordo com o procedimento que será realizado, se de selo, união ou revestimento. A possibilidade de uso de motores de passo em substituição aos servo-motores anteriormente utilizados, proporcionou uma considerável simplificação da estrutura interna do gabinete de controle.

Apesar da versão final do manipulador contar com um motor a mais que o protótipo inicial, a placa eletrônica projetada para receber o microprocessador ARM permitiu o acionamento do quinto eixo, sem a necessidade de grandes intervenções na versão original. Considerando as diferentes tarefas executadas pelo gabinete de controle e o grau de interdependência entre elas, é de simples percepção o alto grau de complexidade do seu projeto e as consequências que podem ser associados a um sistema mal projetado. O funcionamento equivocado de operações controladas por hardware e software pode colocar em risco tanto a segurança do equipamento como a do próprio operador. Todo o conhecimento adquirido pela equipe desenvolvedora pode ser considerado uma fonte de informações relevantes para a implantação das funções necessárias para o atendimento dos requisitos do projeto.

Apesar do direcionamento referente a posição de soldagem com o painel na posição horizontal, foi considerado pertinente que o sistema definitivo pudesse também operar na vertical. Com isso, poderia ser feita a opção pelo revestimento também nesta posição, na qual é atingida maior produtividade e qualidade do revestimento e se mantem a flexibilidade do sistema permitindo adaptações que se mostrarem pertinentes. Para validação do sistema desenvolvido nas duas situações, foi realizado o projeto de uma bancada basculante. Tal sistema é capaz de alternar o painel entre as posições horizontal e vertical, possibilitando o procedimento de união tubo-membrana (horizontal) e o de revestimento (horizontal ou vertical). Na Figura 20 pode ser visualizado o citado projeto com o painel em três posições, horizontal, intermediária e vertical.

Figura 20. Bancada basculante.

Devido à limitação de espaço no laboratório, a bancada foi concebida para comportar painéis de até 3 metros de comprimento, sendo esta dimensão suficiente para os ensaios finais de qualificação do procedimento e equipamentos desenvolvidos. Na Figura 21 podem ser visualizadas fotos da bancada basculante montada, do manipulador definitivo e da fonte de soldagem. Com apoio da empresa IMC-Soldagem, se desenvolveu uma fonte dedicada para os procedimentos de soldagem empregados na fabricação automatizada dos painéis. A fonte da família DIGIPlus A7 trabalha com um limite de corrente no valor de 800A e possui estrutura eletrônica que possibilita diferentes processos de destacamento de gota (curto-circuito, pulsado, pulsado térmico, entre outros). Para a correta sincronização entre a movimentação do manipulador e os parâmetros do processo, a comunicação entre o gabinete de controle do manipulador e a fonte de soldagem é realizada via porta serial.

Figura 21. Bancada, manipulador definitivo e fonte de soldagem.

Com isso, pode-se considerar cumpridas as etapas de concepção e aperfeiçoamento das componentes desenvolvidas (conhecimento, equipamentos e processos). A Figura 22 mostra o projeto da bancada desenvolvida para instalação na ENGIE, na qual poderão ser fabricados painéis de até 6 metros de comprimento.

Figura 22. Modelo da bancada para soldagem horizontal (6m).

Transferência de Tecnologia

Uma vez concluída a macro etapa de pesquisa e desenvolvimento, segue-se a transferência tecnológica dos resultados do projeto para a empresa financiadora. No presente caso, foi gerado o documento "Proposta de Implementação", que orienta a execução desta atividade, considerado diferentes fatores. Um aspecto extremamente importante consiste no grau de Automação da operação. Processos podem ser automatizados em diferentes níveis, partindo de uma simples mecanização até a automação plena, em que o sistema tem autonomia completa sobre o processo, sendo capaz de responder automaticamente as intercorrências que surgirem. O próprio processo de soldagem MIG/MAG, por exemplo, é considerado semiautomático, já que o arame é sempre alimentado pelo cabeçote motorizado da fonte. O nível de automação de passível obtenção no âmbito do presente trabalho requer ainda grande participação do operador, o qual deve configurar os diversos parâmetros de movimentação e do processo e também monitorar continuamente o procedimento para executar eventuais correções na trajetória/orientação da tocha e/ou parâmetros do processo. Neste sentido, fica a ressalva de que a implementação por si só, não garante o melhor aproveitamento do sistema desenvolvido. Para tanto, é necessária a criação de um know-how associado a uma vasta base de conhecimento, a qual deve englobar todos os aspectos do sistema, sendo eles mecânicos, eletrônicos (de hardware e software) e os fenômenos associados aos processos de soldagem propriamente ditos.

Assim, a "Proposta de Implementação" descreve o sistema de automação do revestimento (bancada de fixação, manipulador robótico), define requisitos básicos de infraestrutura pré-instalação, e conteúdo do treinamento do pessoal alocado pela empresa, mas reitera-se que a transferência tecnológica não se resume a entregar fisicamente o equipamento desenvolvido e instruir como operar. Trata-se, em essência, de uma ação continuada, que envolve também transferência de conhecimento, atualização do conhecimento e acompanhamento periódico, de modo a garantir sempre a melhor eficiência e aprimoramento da aplicação das inovações geradas.

F. Desenvolvimentos Associados

De forma paralela à linha de desenvolvimentos descrita, foram realizados ainda diversos trabalhos exploratórios, destacando-se: revestimento via processo PTA-P, TIG; união tubo-membrana via processo Plasma-MIG serial, TIG com concentração catódica do arco; revestimento de tubos solteiros / individuais via processos MIG/MAG, TIG Alimentado e PTA-P.

Estes trabalhos têm importância vital para geração de conhecimento, servindo como concretos e adequados subsídios para as tomadas de decisão realizadas ao longo do projeto, e podem basear, no futuro, o aprimoramento ou desenvolvimento de novas alternativas tecnológicas. Mesmo o sucesso do presente projeto só foi possível em função da base científico-tecnológica desenvolvida em trabalhos anteriores.

Sistema para Revestimento de Tubos Individuais

Destaca-se, dentre os trabalhos e resultados associados ao objetivo principal do projeto o desenvolvimento de processo e equipamento, mostrado em [10], para revestimento de tubos solteiros (individuais), os quais compõem regiões da caldeira nas quais os tubos estão sujeitos ao desgaste em toda sua circunferência, como aqueles apresentados na Figura 23.

Os bons resultados obtidos nos ensaios realizados durante o projeto, aliados ao desenvolvimento de um equipamento dedicado para esta operação, impulsionaram o revestimento automatizado de um lote de tubos para a ENGIE. Ao todo, foram revestidos 476 metros lineares de tubos com excelente padrão de qualidade, totalizando cerca de 2 toneladas de material depositado em cerca de 77m² de superfície (Figura 24).

Figura 23. Serpentinas do super aquecedor e tubos de sustentação.

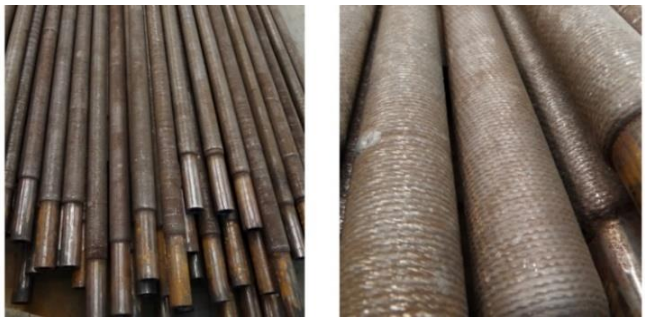

Figura 24. Tubos solteiros revestidos e acabamento obtido

III. Conclusões e Considerações Finais

O espectro de impactos resultantes do projeto de P&D ao qual este trabalho se vincula abrange não somente desdobramentos tecnológicos, como inovações em equipamentos e técnicas, mas também, com elevada relevância, contribuição para formação de pessoal de alto nível e enriquecimento da infraestrutura nacional de P&D. Estes resultados atendem aos objetivos estipulados pelos Programas de P&D da ANEEL e da ENGIE, de estímulo à cultura de inovação e estímulo da pesquisa no setor elétrico brasileiro. Notam-se, também, impactos sociais de salubridade para operadores / soldadores, ambientais e econômicos.

Os sistemas de fabricação e revestimento de painéis tubulares para paredes d'água e de revestimento de tubos individuais, aliados aos processos e procedimentos de soldagem desenvolvidos, permitem, pela maior estabilidade do arco elétrico e repetibilidade da trajetória da tocha, uma maior homogeneidade geométrica dos cordões de solda que formam as camadas de revestimento. Esta maior controlabilidade do processo permite maior regularidade da composição química do revestimento ao longo da área processada e melhor acabamento, culminando em maior qualidade e produtividade na operação, tornando as paradas de manutenção mais eficientes e eficazes.

Há contribuição, também, para possível maior intervalo entre paradas para manutenção e redução de paradas por falhas catastróficas. Além disso, a maior qualidade do revestimento reduz, ou elimina, necessidades de retrabalho por desbaste (esmerilhamento), reduzindo a emissão de resíduos sólidos do processo. Neste quesito, a maior qualidade do revestimento automatizado também aumenta a eficiência da caldeira.

No que tange à saúde ocupacional, a operação automatizada afasta o operador do arco elétrico e de seus fatores insalubres, como radiação e geração de fumos e respingos metálicos, ao passo em que reduz o tempo de operação, pela maior produtividade obtida.

A abordagem interdisciplinar do projeto, numa trajetória de desenvolvimento constituída de várias etapas sequenciais em todos os flancos presentes (soldagem, projeto mecânico, automação, eletrônica), permitiu a formação de recursos humanos especializados, nos níveis de graduação e pós-graduação (citam-se um trabalho de doutorado; um de mestrado; dois trabalhos de conclusão de curso e cinco artigos publicados em periódicos científicos e anais de congressos).

É importante mencionar, que, devido ao caráter aplicativo do projeto, os recursos humanos formados obtiveram sólida contribuição não somente para seu conhecimento teórico, mas também prático, de nível internacional. Desta forma, se observa o uso de conhecimento de nível internacional para geração de soluções para problemas locais. De fato, são aplicadas diferentes técnicas ao redor do mundo para o revestimento de estruturas tubulares. No entanto, o projeto gerou uma solução dedicada às características locais (no caso, complexo termelétrico Jorge Lacerda), que pode ser expandida e aplicada em outras plantas brasileiras. Outro benefício atrelado ao domínio tecnológico obtido é a redução de dispêndios cambiais, pela redução de necessidade de importação de equipamentos e serviços especializados.

Todos os aspectos mencionados resultam em redução de custos, aumentando a competitividade das empresas usuárias da tecnologia e, potencialmente, contribuindo para a modicidade tarifária.

O estágio atingido pelas atividades do projeto permitiu ações para a efetivação da transferência da tecnologia gerada para a empresa financiadora, ENGIE, segundo "Proposta de Implementação" acordada.

IV. Agradecimentos

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

V. Referências Bibliográficas

[1] Blogg, N., Brooks R. Innovative Technique Developed as Permanent Solution to FiresideWaterwall Erosion/Corrosion issues within Fossil Fired Power Boilers, Power Generation Europe 2002

[2] Amador, P., Lai, G. Application of Un ifu se Overlay Tubes in the Convection Section of Waste-To-Energy Boilers, 11th North American Waste to Energy Conference, 2003

[3] Lai, G. FIRESIDE CORROSION AND EROSION/CORROSION PROTECTION IN COAL-FIRED BOILERS, Corrosion 2004, NACE

[4] Blogg, N., Brooks R. Innovative Technique Developed as Permanent Solution to FiresideWaterwall Erosion/Corrosion issues within Fossil Fired Power Boilers, Power Generation Europe 2002

[5] Koripelli, R. S., et al. The Role of Fireside Corrosion on Boiler Tube Failures, Part II, COAL POWER Magazine, junho 2010

[6] Bakker, W. et al. Waterwall Wastage Mechanisms in Coal-Fired Boilers - The Effect of Coal Chemistry on Waterwall Wastage EPRI Final Report, November 2001

[7] REZAKHANI, D. Corrosion behaviours of several thermal spray coating s used on boiler tubes at elevated temperatures. 2007. Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

[8] KIM, H.-J; KIM, Y.J. Wear and Corrosion Resistance of PTA Weld Surfaced Ni and Co Based Alloy Layers. Surface Engineering, v.15, n.6, p. 495-501. 1999

[9] SILVA, Régis H. G. e et al. Elevada performance na fabricação e revestimento de paredes de caldeiras. Anais VII CITENEL e III SEENEL. Rio de Janeiro: - ,2013. 10 p.

[10] SILVA, R. H. G.; Dutra, J. C.; PIOTROVSKI NETO, J.; et al. Inovações em Revestimentos Automatizados de Tubos e Paredes d'Água de Caldeiras de Unidades de Geração Termelétrica para Mitigação de Desgaste**.** Anais VIII CITENEL e IV SEENEL. Costa do Sauípe, 2015. 12 p.

[11] United States Geology - World Coal Quality Inventory