

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DO VOLUME DE CHANFROS PARA SOLDAGEM UTILIZANDO TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO A LASER

Alberto Bonamigo Viviani, alberto.bonamigo@labsolda.ufsc.br¹

Jair Carlos Dutra, j.dutra@ufsc.br¹

Nelso Gauze Bonacorso, nelso@ifsc.edu.br²

Regis Henrique Gonçalves da Silva, regis.silva@posgrad.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Bairro Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC.

²Instituto Federal de Santa Catarina, Rua Mauro Ramos, 950, Bairro Centro, 88020-300, Florianópolis, SC.

Código: CONEM2014-1130

Resumo: Nos setores de Petróleo e Gás, construção naval, civil, automobilística e demais setores que necessitem de união de matérias por soldagem, há dificuldade na padronização das juntas a serem soldadas. Essa dificuldade compromete muitas vezes a utilização da soldagem automática. Para que seja possível soldar sem a intervenção do operador de soldagem, é imprescindível que a geometria da junta seja conhecida em toda sua extensão, possibilitando que o equipamento se adapte aos desvios geométricos da junta, garantindo total preenchimento do chanfro. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema para medição do volume de chanfros. A medição do volume é realizada por um sensor óptico a laser tipo “folha de luz” que, uma vez programado para reconhecer determinado perfil de junta, reconhece pontos específicos na geometria do chanfro e calcula variáveis da junta, como a área da seção transversal. Esta área é armazenada por um software e concatenada com o movimento de translação do manipulador robótico que conduz o sensor por sobre a junta. A coletânea de dados de área e posição do manipulador possibilitam calcular o volume da junta. Um corpo de prova de testes é projetado de modo a simular uma junta de difícil inspeção, com variações bruscas de perfil e regiões com e sem preenchimento parcial. São realizados testes do sistema de medição com diferentes velocidades de deslocamento do manipulador robótico. Os resultados destes testes são comparados à medição de volume realizada por um sistema estereoscópico comercial calibrado de alta precisão. O sistema proposto se mostra adequado a utilização para inspeção de chanfros em todas as faixas de velocidade utilizadas nos testes, com precisão dentro dos limites estipulados.

Palavras-chave: Sensoriamento Laser, Soldagem, Inspeção, Metrologia

1. INTRODUÇÃO

O setor de Petróleo e Gás está se tornando um grande fomentador de pesquisas nos últimos anos, devido ao seu reconhecimento como estratégico para o desenvolvimento do país. Os sucessivos recordes de produção e as descobertas de novos reservatórios (pré-sal) preveem uma crescente demanda tecnológica para fabricação, construção, montagem e manutenção de equipamentos relacionados principalmente ao setor naval e de dutovias. Processos de união, revestimento e reparos metálicos realizados por soldagem têm papel fundamental nestas operações.

No Brasil, por diversas questões (cultura, disponibilidade de mão de obra e equipamentos, entre outros) os procedimentos de união de estruturas e tubos metálicos ainda são majoritariamente executados de forma manual, utilizando em maior volume os processos conhecidos com Eletrodo Revestido (ER), *Metal Inert Gas* (MIG), *Metal Active Gas* (MAG), *Tungsten Inert Gas* (TIG), entre outros. Estes processos, com exceção do ER, têm grande potencial para automatização. A principal vantagem da soldagem executada de forma manual é a intervenção *online* do soldador que, utilizando sua experiência e os seus sentidos (visão, audição, olfato e tato), atua diretamente na movimentação da tocha, realizando as correções necessárias para a execução da operação de soldagem mesmo em condições difíceis.

A soldagem mecanizada entra neste contexto para auxiliar o soldador, que passa a ser denominado operador de soldagem neste novo cenário. Nesta modalidade, o operador não está em contato direto com a tocha de soldagem, porém executa comandos em uma Interface Homem Máquina (IHM) a fim de interferir no processo, comandando as correções necessárias para que o produto final seja adequado. A necessidade do operador de soldagem implica na mesma desvantagem da soldagem manual, pois o mesmo apresentará fadiga e também necessita de treinamento. A solução para esse problema é então a soldagem automática, que dispensa a necessidade de um operador ou soldador,

executando correções tanto na trajetória de soldagem como até mesmo na regulagem de parâmetros da fonte de soldagem para adequar o processo às condições atuais da junta.

O conceito da soldagem automática está na independência da operação com o operador de soldagem, sendo o sistema capaz de executar as uniões de forma autônoma, com repetitividade e agilidade, sem necessidade de paradas para descanso. Este tipo de soldagem é o ideal para garantir grande produtividade e, geralmente, requer apenas mão de obra para posicionar o manipulador no início do chanfro, cabendo ao sistema a geração da trajetória de soldagem e correção da mesma frente os desvios da junta. Em muitos casos onde é utilizada, a soldagem automática não necessita de realimentação, por se tratar de ambientes bem definidos, com peças que possuam um bom controle dimensional e operações fracionadas, geralmente em linhas de montagem, que propiciam pequenas deformações da junta durante a soldagem. Kang *et al.* (2007) mostra que aplicações como construção naval, de pipelines, manutenção e prototipagem rápida, por exemplo, apresentam grande dificuldade à implementação da soldagem automática por existirem muitas variáveis no processo, sendo necessária a utilização de sensoriamento da junta para garantir a qualidade do produto final.

A geração de trajetórias nessa modalidade de soldagem (automática) pode ser feita previamente (*offline*) ou durante a soldagem (*online*), dependendo da capacidade do sistema. Alguns modelos de sistemas comerciais disponíveis no mercado para trabalhar com soldagem suportam as duas modalidades, porém, sensores adaptados à primeira (*offline*) são mais presentes no mercado e de projeto mais simples. A realização de uma varredura da junta antes da soldagem identifica os pontos chave e os correlaciona com a posição do manipulador. Este método apresenta uma série de vantagens, principalmente, a operação em um ambiente livre das interferências impostas pelo arco elétrico.

Na inspeção *offline* ou na combinação das duas, é imprescindível que o sistema seja capaz de reconhecer algumas variáveis básicas no perfil da junta, como abertura de raiz (ou *gap*), área do chanfro, posição central da junta e suas fronteiras, além do volume a ser preenchido. A leitura destas informações pode ser feita por sensores fixados à própria tocha de soldagem ou ao manipulador. Para esta finalidade existem diferentes tipos de sensores que podem ser utilizados.

Os sensores de contato são geralmente de construção simples e possibilitam adquirir informações de posicionamento ou até de perfil da junta, dependendo de seu projeto. Entretanto, Kang *et al.* (2007) mostra que esse tipo de sensor não é muito utilizado para inspeção por poder causar a contaminação da junta e por não oferecer uma grande versatilidade de aplicação aliado a quantidade de informação extraída do perfil. Os procedimentos de soldagem em sua maioria são versáteis e essa é uma de suas grandes vantagens sobre os outros processos de fabricação, por isso há muitas vezes a necessidade de um sensoriamento igualmente versátil. Além disso, Bonacorso (2004) mostra a desvantagem da velocidade de aquisição de pontos da superfície ser relativamente baixa com este tipo de sensor.

Segundo XiaoQi *et al.* (2012), os modelos de sensores sem contato com a peça são bastante variados, porém, os mais comuns são de sensoriamento pelo próprio arco e sensoriamento por imagem. Mendonça (2013) mostra que o primeiro, que utiliza as variáveis elétricas do próprio arco para realizar medições, é baseado nas mudanças que ocorrem na corrente de soldagem quando o eletrodo se desloca pelo chanfro, tanto pela Distância Bico de Contato – Peça (DBCP, altura que separa a peça do bico de contato da tocha) quanto pela velocidade de aproximação do eletrodo consumível (no caso de soldagem MIG, por exemplo). O mesmo autor mostra que este tipo de sensoriamento necessita da presença de um arco elétrico plenamente estabelecido, o que inviabiliza sua utilização na inspeção prévia da junta.

Segundo Liu (2010), os sensores por imagem, sobretudo com laser, são muito comuns na indústria, porém precisam superar uma série de obstáculos para atuar na inspeção *online*, principalmente a interferência causada pelo arco elétrico. A razão de esses sensores serem largamente utilizados na indústria é a qualidade e a riqueza de informação alcançada com sua operação. Com uma única imagem do chanfro, por exemplo, é possível extrair diversos pontos de interesse e localizá-los espacialmente em relação à ponta do eletrodo. O uso desse tipo de sensor é predominante na inspeção *offline* ou combinação de ambas (justamente por não haver o arco de solda), possibilitando um mapeamento completo da geometria do chanfro a ser preenchido.

Kang *et al.* (2007) mostra que o arco elétrico é uma fonte de problemas para a inspeção de junta: emite luz em toda a faixa do espectro visível, dificultando sensoriamento por imagem; emite calor e fumos e pode causar a projeção de partículas, que podem danificar os sensores, além do calor deformar a peça e inserir erros de medição. Além disso, segundo os mesmos autores, a soldagem que utiliza alta frequência pode causar danos ao sistema elétrico de sensores que utilizam componentes deste tipo (a grande maioria).

A inspeção *online* da junta é uma alternativa pouco explorada devido às dificuldades supracitadas, porém apresenta a vantagem de compensar em tempo real deformações da junta ou desvios geométricos da mesma, tornando o processo robusto a variações da peça. A inspeção *online* geralmente é conciliada a uma inspeção prévia, acumulando informações sobre o estado inicial da junta e utilizando estas para regiões onde a inspeção em tempo real não consegue atuar. A inspeção *offline* é então uma alternativa para evitar a interferência do arco elétrico, possibilitando medições em um ambiente muito menos agressivo.

Segundo XiaoQi *et al.* (2002), a escolha de um sensor óptico a laser é feita principalmente pela capacidade deste tipo robusto de sensor, que tem seu princípio de funcionamento denominado “triangulação ativa”, de funcionar tanto para inspeção prévia quanto para funcionamento durante a operação de soldagem. Sendo este sensor capaz de reconhecer pontos de interesse no perfil da junta e realizar o cálculo da área da seção transversal desse chanfro (apenas da porção sem material), para que seja possível mensurar o volume do chanfro é necessário correlacionar essas medições com o deslocamento do sensor, sendo para isso escolhido um manipulador cartesiano que disponibilizasse essa informação de posicionamento para o software.

O sistema para automatização da soldagem com inspeção *offline* deve realizar a tarefa mais complexa da inspeção prévia (medição do volume da junta), sendo assim facilmente adaptável para reconhecer todos os parâmetros geométricos do chanfro e não só o volume. A medição do volume da junta é imprescindível para a determinação da velocidade de alimentação de material e velocidade de soldagem, garantindo preenchimento uniforme do chanfro em toda sua extensão. O preenchimento uniforme do chanfro facilita o controle dos passes, material a ser depositado e variáveis elétricas da fonte de soldagem, auxiliando bastante a automação da soldagem e a obtenção de produtos de boa qualidade, inclusive propiciando a padronização da qualidade dos cordões de solda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foca na utilização de um sensor óptico a laser, tipo “folha de luz”, acoplado a um manipulador robótico cartesiano, para realizar a medição do volume da junta em inspeção *offline*.

A proposta geral deste trabalho é desenvolver um sistema para medição de volume de juntas que suporte tipos de chanfros diversos, utilizando para isso um sensor óptico a laser, do tipo “folha de luz”, possibilitando o conhecimento das características geométricas da junta a ser preenchida por soldagem em toda a sua extensão. Os objetivos específicos para chegar ao resultado final almejado são:

- a. Acoplamento do sensor óptico ao manipulador cartesiano;
- b. Desenvolvimento da metodologia de inspeção do chanfro para medição do volume;
- c. Desenvolvimento de software para executar a medição de volume;
- d. Projeto do chanfro a ser inspecionado para verificação da precisão e capacidade do sistema;
- e. Realização de ensaios com o sistema desenvolvido de acordo com a metodologia adotada;
- f. Medição do chanfro desenvolvido para os ensaios por sistema estereoscópico calibrado;
- g. Comparação dos resultados obtidos nos ensaios com a medição executada por sistema calibrado.

O primeiro passo para o desenvolvimento do sistema proposto é o acoplamento do sensor ao manipulador, possibilitando o funcionamento concomitante de ambos. No caso da soldagem, o ideal é que o sensor esteja acoplado à tocha de soldagem, facilitando toda a instalação, calibração e operação do conjunto.

2.1. Acoplamento do sensor à tocha de soldagem

O sensor utilizado neste trabalho é o *SLS-050 VI* da empresa Meta Vision Systems Inc., que utiliza um laser diodo com potência de 30 mW associado a um sensor de imagem de tecnologia CMOS, com taxa de aquisição de 30 fps e precisão de $\pm 0,1$ mm tanto para o eixo vertical quanto para o horizontal do sensor, de acordo com MVS (2009). Este sensor projeta uma linha laser, ou um plano de luz (por isso o nome “folha de luz”), que demarca o perfil da junta, o qual é captado por um sensor de imagem, possibilitando a identificação do perfil e medição do mesmo. A **Figura 1A** mostra o sensor *SLS-050 VI* em funcionamento, inspecionando uma junta com chanfro em “U” em tubulação de aço comum.

O manipulador utilizado neste trabalho é o *Tartilope V2* da empresa SPS – Sistemas e Processos de Soldagem (**Figura 1B**), que apresenta dois graus de liberdade, executando movimentos longitudinais e transversais em relação ao chanfro quando instalado paralelo a este. Segundo SPS (2013), este é um manipulador projetado para utilização com soldagem, sendo o deslocamento transversal necessário para realização de passes com o movimento de tecimento (maior largura de cordão).

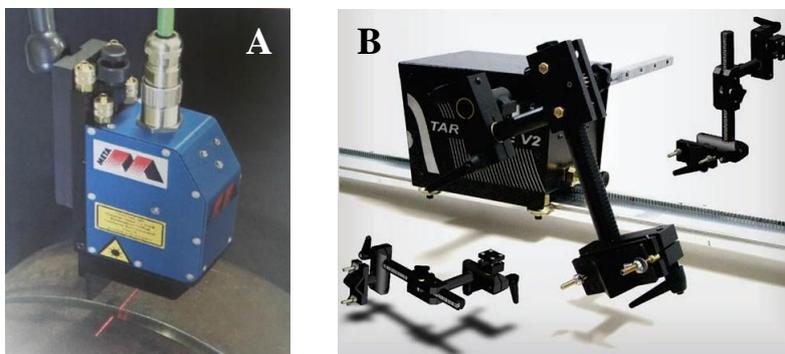


Figura 1. (A) Sensor óptico *SLS-050 VI* de MVS (2009), (B) *Tartilope V2* de SPS (2013)

O acoplamento mecânico do sensor com o manipulador foi projetado de acordo com as seguintes considerações: promover a segurança do sensor durante a operação de soldagem, já que este tipo de sensor é adequado também para utilização *online*; garantir a rigidez do acoplamento mecânico entre sensor, tocha de soldagem e manipulador; reduzir a massa do conjunto para não gerar carga extra ao manipulador e consequentes problemas durante a operação do mesmo.

A Figura 2A ilustra o suporte desenvolvido para integração mecânica do sensor ao manipulador, acoplado diretamente à tocha de soldagem. A Figura 2B esquematiza a montagem do sistema de medição, com a peça a ser inspecionada posicionada paralela ao trilho do manipulador (Eixo X).

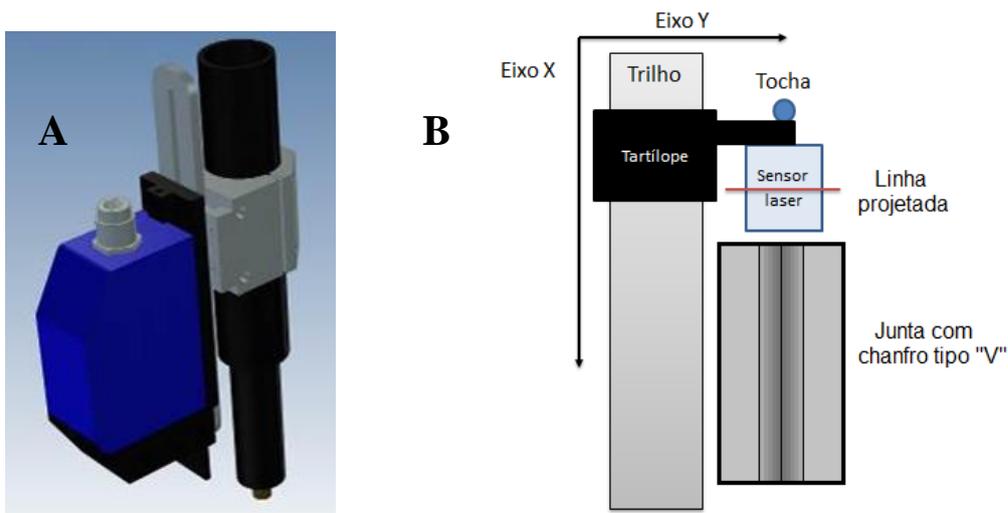


Figura 2. (A) Acoplamento do sensor à tocha de soldagem, (B) Esquema de montagem do sistema de medição

2.2. Software para medição de volume

O sensor *SLS-050 VI* possui uma placa de controle externa, denominada *breakout board*, que possibilita a comunicação do sensor com um computador ou robô através de protocolo Ethernet. A empresa desenvolvedora do sensor limita as permissões de acesso ao usuário para leitura dos parâmetros da junta e alteração entre perfis pré-programados. Além da comunicação via Ethernet com o sensor, é preciso coordenar as medições do perfil com o deslocamento do manipulador, o que é feito através de comunicação serial com o controlador do robô.

Conhecidos os protocolos de comunicação necessários para troca de informações entre os componentes do sistema, foi desenvolvido um software em linguagem C# para estabelecer comunicação entre computador, sensor e controlador do manipulador. A Figura 3A ilustra o fluxograma do software desenvolvido. A Figura 3B demonstra a tela do programa em execução. O software desenvolvido é capaz de realizar a medição de volume com qualquer dos tipos de chanfros suportados pelo sensor laser, não sendo limitado apenas a chanfros em "V", já que o parâmetro solicitado ao sensor (área da seção transversal) é sempre feito da mesma maneira, independentemente do tipo de chanfro selecionado. A utilização de qualquer tipo de chanfro requer um ajuste anterior dos pontos de interesse do sensor sobre o perfil.

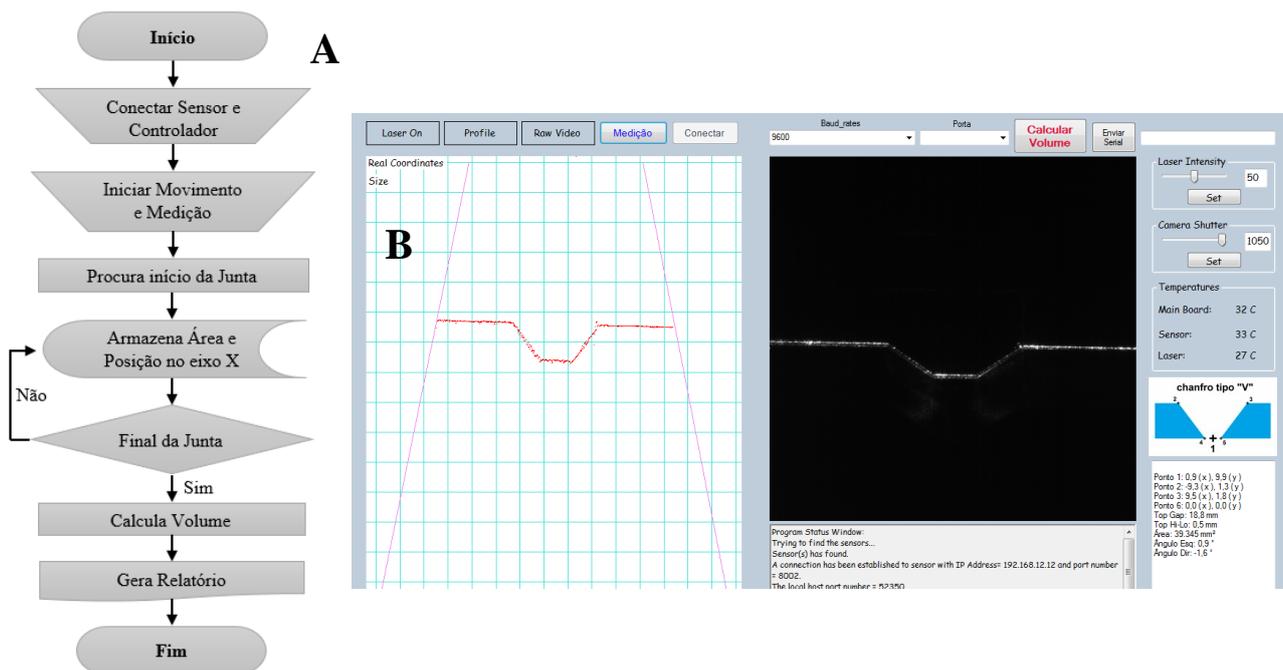


Figura 3. (A) Fluxograma, (B) Tela do software executando medições

O fluxograma do programa desenvolvido (Fig. 3A) é relativamente simples: primeiramente são estabelecidos os canais de comunicação entre computador e sensor e entre computador e controlador. Uma vez conectados, é dada instrução para o manipulador iniciar seu deslocamento no Eixo X, aguardando então o início da medição, sendo que essas duas etapas podem ser adaptadas para serem executadas simultaneamente (caso o sensor não possa ser posicionado antes do início da junta). O comando de “Início da Medição” inicia a transmissão do sensor para o computador das medições, possibilitando a verificação de quando começam a ser enviadas medidas do perfil, localizando assim o início da junta a ser inspecionada.

A detecção do início da junta inicia a rotina de coleta de informações do chanfro: a cada 200 ms é armazenado um valor de área e um valor de posição no eixo X, compondo uma matriz de duas colunas. Toda vez que uma nova linha é armazenada nessa matriz, o sistema checa se não foi solicitado o cálculo do volume ou se o sensor já passou do final da junta. A detecção do final da junta é feita por um checagem rápida dos últimos 5 valores de área: se todos forem nulos (iguais a zero) então é sinalizado o final da junta (esta opção pode ser facilmente desativada por programação, mantendo apenas o comando de “Calcula Volume” como parâmetro para execução do cálculo).

O final da junta sendo sinalizado ou com o botão de “Calcula Volume” sendo acionado, o sistema faz o processamento da matriz onde estão armazenados os valores de área e posição em X, analisando pares de linhas e adotando uma metodologia simples para evitar as medições nulas e medições em mesma posição. Medições nulas são eliminadas da matriz, como se não tivessem sido inseridas (elas ocorrem quando há mudança brusca do perfil do chanfro principalmente). Medições sobre a mesma posição em X acontecem principalmente em velocidades muito baixas de inspeção, sendo feita a média das duas áreas e armazenado esse novo valor para aquela posição em X do manipulador.

Caso o par de medições analisadas seja válido (posições em X diferentes e áreas não nulas) é feita uma média das duas áreas e multiplicada pela diferença das posições em X, obtendo um volume. Várias medições são feitas no comprimento da junta (frequência de 5 Hz para as medições), fazendo com que cada volume calculado dessa forma represente apenas uma pequena parcela do volume total, transformando o cálculo em algo próximo a uma integração das áreas das seções transversais. Ao final da junta, o volume total será uma soma de todos esses volumes calculados, sendo gerado um relatório em formato de planilha .xlsx (*Microsoft Excel*).

2.3. Projeto da peça para teste do sistema de medição

A versatilidade de operação, no âmbito da soldagem, é uma característica bem vista em qualquer sistema de medição para atuação neste meio. Sensores que se adaptem bem a condições de difícil operação, como ambientes hostis e com grandes variações físicas das peças mensuradas, são os que conseguem maior espaço no mercado. O sistema proposto utiliza um sensor robusto justamente para esta finalidade, por isso é essencial que o software e a metodologia para medições de volume possam atuar sobre estas condições, principalmente com consideráveis desvios geométricos da junta.

O software desenvolvido prevê operação com tais condições, sendo possível inclusive a programação prévia do programa para alterar a configuração de chanfro que o sensor busca reconhecer durante a execução da medição. A peça para teste deste software necessita então simular tais condições, com desvios bruscos de geometria e qualidade superficial análoga à encontrada nas aplicações de soldagem.

A Figura 4 apresenta alternativas para a simulação de desvios geométricos, variando parâmetros da junta, como por exemplo a montagem com abertura de raiz variável (Figura 4A), ou então montagem com as chapas desalinhadas em um ou mais eixos (Figura 4B); ou até uma peça que simule um chanfro com preenchimento variável (Figura 4C).

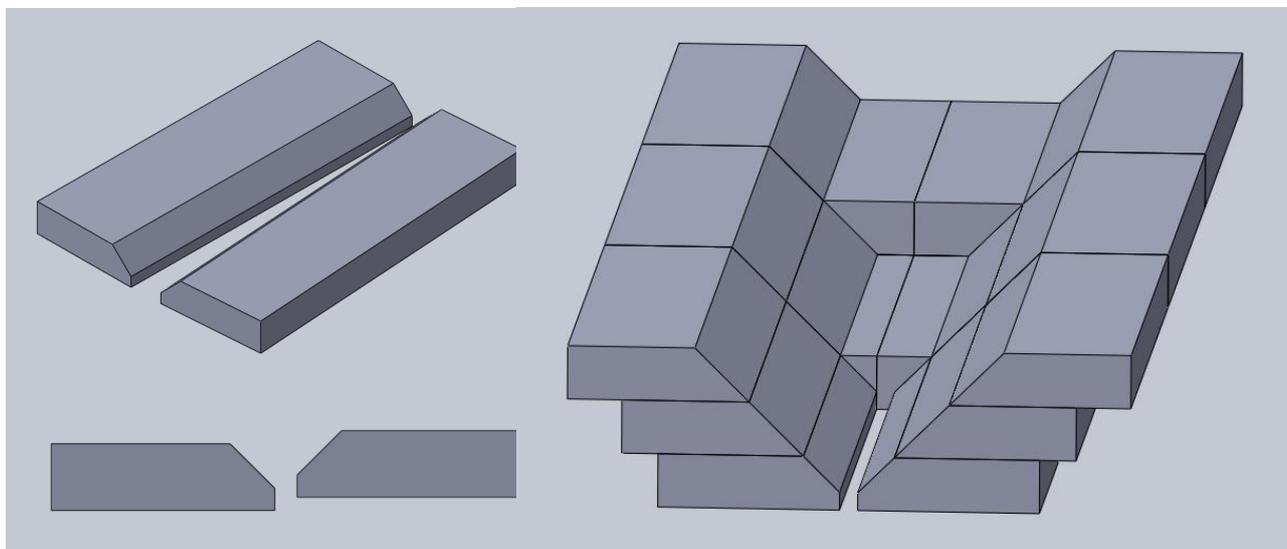


Figura 4. (A) Abertura de raiz variável, (B) Desalinhamento (*Hi-Lo*), (C) Preenchimento parcial do chanfro

A abordagem escolhida para a peça de teste é com base na peça com preenchimento variável do chanfro (Figura 4C), por conseguir em uma única peça simular seções de chanfro sem preenchimento e com preenchimento parcial, em sequência, dificultando para o sensor a leitura do perfil e a medição do volume da junta. A Figura 5 mostra a peça já fabricada: foram utilizadas chapas de alumínio de 6,0 mm de espessura, formando 3 seções, cada uma com 50 mm de comprimento. A peça de testes simula uma junta de topo com chanfro em “V” de chapas de 25,4 mm (1,0 pol) de espessura, com comprimento de 150,0 mm, abertura de raiz de 2,0 mm e largura do chanfro de 28,0 mm (topo).

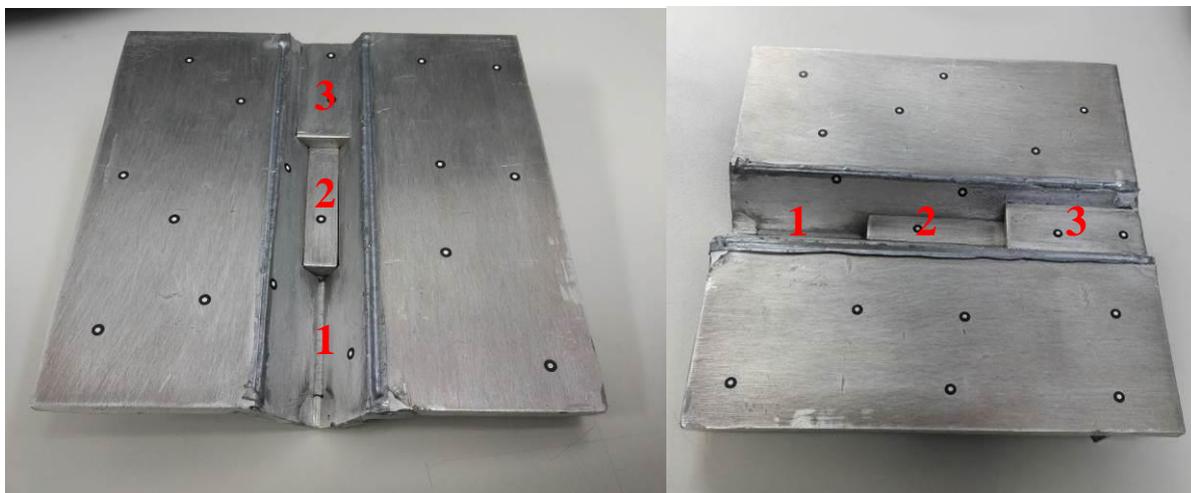


Figura 5. Peça de testes, vistas frontal e lateral

A primeira seção simula um chanfro sem preenchimento, similar ao encontrado nos passes de raiz (primeiro passe da soldagem). A segunda e a terceira seções simulam chanfros com preenchimento parcial, no caso, camadas uniformes preenchendo a área em 33% e 66% da altura do chanfro, respectivamente. As bordas foram preenchidas com silicone industrial, não comprometendo a qualidade das medições do sensor óptico a laser ou do sistema estereoscópico. Foi utilizada soldagem TIG manual para união das chapas que compõe a peça de teste. As marcações circulares na peça são adesivos plásticos que servem de ponto de referência para o sistema estereoscópico de medição, para junção das nuvens de pontos; estas marcações não interferem nas medições realizadas pelo sensor óptico a laser.

2.4. Aspectos do sistema

O posicionamento do sensor em relação ao chanfro não é tão crítico para a inspeção prévia com apenas a medição do volume como o mesmo é para o trabalho com mais informações do perfil ou funcionamento *online*, bastando a linha laser estar alinhada perpendicularmente ao chanfro. Caso esse posicionamento não seja desta forma, podem-se introduzir alguns erros na medição (sombreamento, perspectiva, desalinhamento, entre outros). A utilização de um manipulador cartesiano compacto simplifica a operação de alinhamento, tanto para o caso de peças pequenas (a peça é alinhada com o trilho do robô) quanto para inspeção de peças de grande porte (o trilho é alinhado com a junta). Outra facilidade é a geometria do sistema de fixação do sensor à tocha de soldagem, que por sua rigidez apresenta apenas 2 graus de liberdade (translação na direção da altura da tocha e rotação ao redor da mesma) facilita a instalação do conjunto.

O sensor óptico estando alinhado com a junta já elimina uma série de problemas e erros de medição como, por exemplo, detecção parcial do chanfro que não contabilizará no volume medido. Porém, é um volume que necessita ser preenchido por soldagem, ou seja, erro na medição do volume total da junta.

Uma vez posicionados manipulador, sensor e junta, o ideal é que se possa colocar a linha laser antes do início da peça, de modo que o sistema seja responsável por detectar quando a junta inicia; o mesmo vale para o final da peça (sensor deve passar para além do final da junta). Outro cuidado que se deve tomar com sensores ópticos é a qualidade do trabalho superficial na peça, que deve ser mais ou menos uniforme em todo o comprimento da junta, de modo a não “confundir” a calibração inicial do sensor e introduzir regiões com medições de área nula (zero).

O sistema de medição desenvolvido atua em uma frequência de aquisição fixa (5 Hz), ou seja, a velocidade de deslocamento do manipulador influencia diretamente na quantidade de medições realizadas sobre o mesmo comprimento de junta inspecionado. A realização de ensaios com variação dessa velocidade em X é interessante de modo que se obtenha o valor de maior velocidade que obtenha erros de medição dentro do tolerável.

A precisão do sistema de medição é um fator importante na soldagem, principalmente para processos de alta velocidade e rendimento, como nos processos de soldagem a laser, TIG “*keyhole*” ou plasma, nas quais a tocha necessita de um posicionamento muito bem acertado para que o processo seja viável. As operações industriais mais comuns (MIG/MAG, TIG e Arco Submerso) são bem tolerantes a erros de medição, principalmente no volume da junta, uma vez que o próprio procedimento de soldagem prevê a existência de um reforço na soldagem.

O preenchimento do chanfro até a altura da linha virtual que liga a superfície de ambas as chapas (no caso de uma junta de topo) já garante o sucesso da operação de soldagem. O reforço da solda é todo material depositado acima desta linha virtual, com objetivo de garantir, pela deposição de material extra, o preenchimento total do chanfro. O erro de medição do sensor deve ser então inferior à metade do volume permitido de reforço, no pior dos casos.

Os ensaios devem ser realizados todos no mesmo ambiente, para minimizar erros por dilatação da peça ou mau posicionamento do manipulador (a peça sendo inspecionada deve manter a mesma posição em todos os ensaios realizados). A operação *offline* elimina possíveis problemas advindos da presença do arco elétrico, que não precisam ser levados em conta neste caso. A quantidade de ensaios também influencia nos resultados obtidos: a repetição da inspeção com a mesma velocidade de deslocamento do manipulador ajuda a amenizar a parcela de erro aleatório do sistema, evidenciando o erro sistemático.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira medição realizada foi com o sistema estereoscópico, que foi conduzida por técnico especializado da Fundação CERTI, no laboratório de metrologia da mesma, localizado no Campus da Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema *ATOS*, da fabricante GOM, foi calibrado e utilizado para geração da nuvem de pontos, sendo esta composta por mais de 1,2 milhão de pontos; sendo depois trabalhada no software *SolidWorks* versão 2010, para extrair o volume de cada seção da junta. O erro máximo do sistema utilizado é de $\pm 10,0 \mu\text{m}$ ($1,00 \text{ mm}^3$ em volume). A Tabela 1 contém os dados das medições realizadas por este sistema (as seções da peça são as assinaladas na Figura 5).

Tabela 1. Resultados das medições da peça teste realizadas pelo sistema ATOS

Seção	Volume (mm^3)	Área Média (mm^2)
1	6560,79	135,08
2	11337,69	217,16
3	13915,58	275,43
Total	31814,06	
Médio		209,22

Buscando atingir resultados com o mínimo erro aleatório possível, foram obedecidas as premissas citadas no item anterior, com execução de medições em 6 faixas de velocidade do manipulador 0,83, 1,67, 3,33, 6,67, 10,00 e 13,33 mm/s (ou 5, 10, 20, 40, 60 e 80 cm/min, respectivamente). Todas as faixas de velocidades tiveram execução de 5 ensaios consecutivos, sendo que todas as medições foram realizadas no mesmo dia em sequência, totalizando aproximadamente duas horas de execução das medições. A temperatura no ambiente dos ensaios não foi mensurada, porém deve ter se mantido constante por ser uma sala isolada e com sistema de climatização em regime, ajustado para a temperatura de 24 °C.

A Tabela 2 apresenta os resultados já resumidos das 5 medições em cada faixa de velocidade do manipulador, sendo interessante observar a influência desta velocidade no número de medições válidas (quarta coluna), sendo este número uma média do número de unidades de volume que foram somadas para medição do volume total da junta. A segunda coluna desta tabela, que apresenta o desvio padrão dos volumes medidos em cada faixa de velocidade, dá uma indicação da parcela de erro aleatório a que o sistema de medição está sujeito.

A Figura 6 apresenta um gráfico que evidencia a colaboração de cada parcela de erro: o erro sistemático (diferença entre a média dos volumes medidos e a medição do sistema estereoscópico) e o desvio padrão (que é o principal representante do erro aleatório das medições).

Tabela 2. Resultados das inspeções realizadas pelo sistema de medição com sensor óptico a laser

Volume Médio (mm^3)	D. P. (mm^3 %)	Área Média (mm^2)	N. M. V.	Comprimento (mm)	Velocidade (mm/s)
32578,30	56,73 0,18	209,93	928	155,2	0,83
32508,13	41,45 0,13	209,89	464	154,9	1,67
32259,26	228,96 0,71	210,01	229	153,6	3,33
32240,37	216,33 0,67	210,29	115	153,3	6,67
32146,28	362,47 1,12	209,68	76,6	153,4	10,00
32189,29	293,82 0,91	210,29	57	153,1	13,33

D.P. = Desvio Padrão (em mm^3 e porcentagem da média dos volumes médios); N.M.V. = Número de Medições Válidas

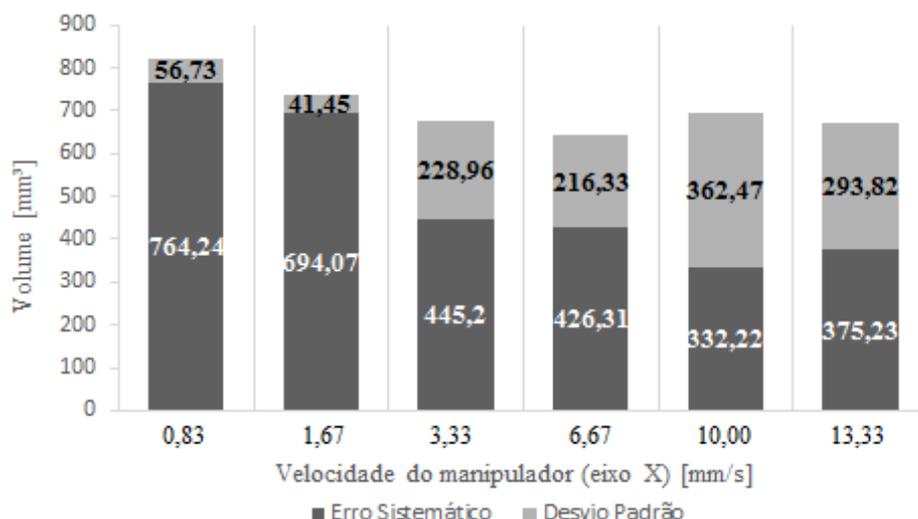


Figura 6. Gráfico para comparação entre erro sistemático e desvio padrão

Procurando um melhor entendimento dos valores obtidos, os resultados podem ser analisados com comparações simples em “unidades de eletrodo consumível” de diâmetro 1,2 mm e comprimento igual ao da junta da peça de teste (150,0 mm). Uma unidade de eletrodo consumível com esse comprimento apresenta um volume de aproximadamente 170,00 mm³. Essa comparação é interessante por facilitar a visualização da quantidade de material que pode ser acrescida ou decrescida do produto final como consequência dos erros das medições.

No caso da peça de teste, AWS (2010) determina na norma D1.1 que a maior altura de reforço aceitável para as dimensões desta peça, além de critérios de forma do mesmo. De acordo com esta norma, o reforço de maior dimensão aceitável teria um volume de aproximadamente 8640,00 mm³ (semicilindro com raio de 34,2 mm, altura de 3,0 mm, largura de 28,0 mm e comprimento de 150,0 mm). A Figura 7 ilustra o reforço considerado (Figura 7A), o volume de reforço representado com 50 unidades de eletrodo consumível (Figura 7B) e a representação de uma única unidade de eletrodo consumível de 150,0 mm de comprimento (Figura 7C).

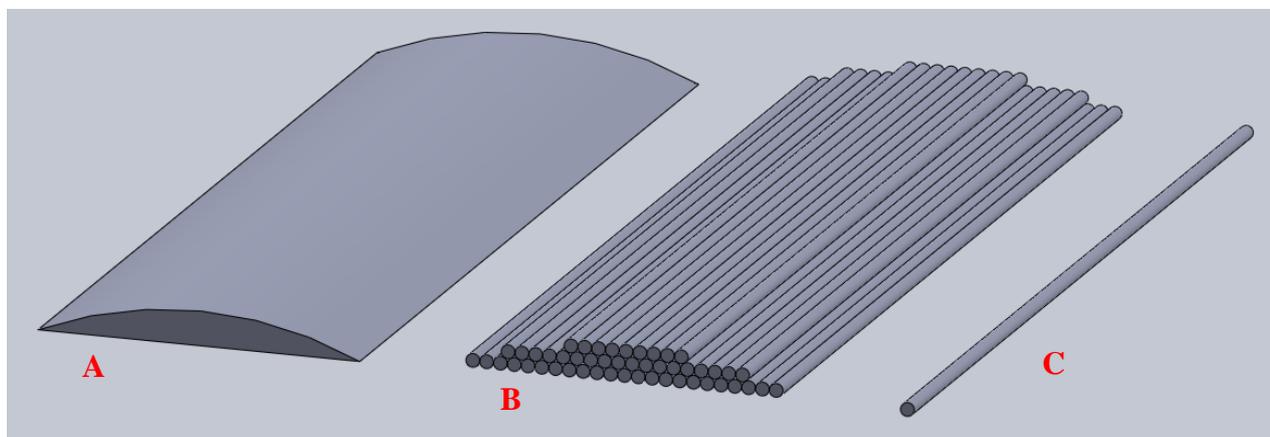


Figura 7. (A) Volume de reforço máximo admissível, (B) Volume de reforço máximo admissível representado em unidades de eletrodo consumível, (C) Unidade de eletrodo consumível

O sistema de medição, em um caso extremo, seria adequado se tivesse um erro máximo de metade do volume do reforço (25 unidades de eletrodo consumível), garantindo sempre um produto dentro do aceitável. Uma vez que o reforço é material extra na junta (que não é necessário porém é aceitável), sua existência implica em custo extra de produção, pelo tempo e material adicionais necessários. Um sistema de medição capaz de minimizar o reforço utilizado na soldagem é o ideal nesse contexto. O critério de aceitação para o erro total de medição é fixado então em 5 unidades de eletrodo consumível, ou 850,00 mm³ (10 vezes menor do que volume do reforço máximo permissível).

A Tabela 3 apresenta os valores de erro encontrados para cada faixa de velocidade. Segundo Pham (2006), o erro sistemático é a diferença da média das 5 medições com a medição do sistema estereoscópico e o erro aleatório é o desvio padrão das 5 medições dividido pela raiz quadrada do número de ensaios executadas (no caso 5 ensaios). Como a resolução do sensor óptico a laser é boa (0,01 mm²) e a precisão do sistema estereoscópico é de $\pm 1,00$ mm³, essas duas fontes de erro não contribuem significativamente com o erro aleatório, sendo o número de medições com o sensor a laser a principal fonte de incertezas.

Tabela 3. Balanço de incertezas nas medições do sistema proposto

Velocidade (mm/s)	E. S. (mm ³ u.e.)	E. A. (mm ³ u.e.)	Incerteza Combinada (mm ³ u.e.)
0,83	764,24 4,50	25,37 0,15	764,24 ±25,37 4,50 ±0,15
1,67	694,07 4,08	18,54 0,11	694,07 ±18,54 4,08 ±0,11
3,33	445,20 2,62	102,40 0,60	445,20 ±102,40 2,62 ±0,60
6,67	426,31 2,51	96,75 0,57	445,20 ±102,40 2,62 ±0,61
10,00	332,22 1,95	162,10 0,95	332,22 ±162,10 1,95 ±0,95
13,33	375,23 2,21	131,40 0,77	375,23 ±131,40 2,21 ±0,77

E. S. = Erro Sistemático; E. A. = Erro Aleatório; u.e. = Unidades de Eletrodo Consumível (170,00 mm³)

Analisando apenas a parcela de erro sistemático do sistema (segunda coluna, Tabela 3), que pode ser obtida pela diferença entre a média dos volumes obtidos em uma determinada faixa de medição (primeira coluna, Tabela 2), e o volume total medido pelo sistema estereoscópico (31814,06 mm³), as menores velocidades de movimento do manipulador apresentaram um erro sistemático maior. A velocidade de execução que apresentou o menor erro sistemático foi a de 10,00 mm/s (60 cm/min), com erro de 332,22 mm³ (1,95 unidades de eletrodo consumível). A velocidade de 0,83 mm/s (5 cm/min) apresentou o maior erro: 764,24 mm³ (4,50 unidades de eletrodo consumível).

A explicação para este fato é a de que, em baixas velocidades, o perfil é reconhecido praticamente em todo o seu comprimento, não sofrendo redução do volume total medido, mesmo nas duas regiões de mudança brusca de perfil (nas fronteiras das seções). Quando o manipulador está se deslocando com maior velocidade, a distância entre as duas áreas utilizadas para contabilizar cada unidade de volume é maior, representando uma fonte de erro significativa, já que a área utilizada para o cálculo é uma média das duas áreas medidas. Uma vez que todas as medições do sistema, em qualquer velocidade, retornam um volume maior do que o volume mensurado pelo sistema estereoscópico, o erro devido ao método de cálculo e menor número de medições válidas resulta em uma redução da média dos volumes totais. Essa redução da média dos volumes totais (primeira coluna, Tab. 2) aproxima o volume medido do valor de referência, contabilizando como um erro sistemático menor. Caso as medições do sistema tivessem retornado volume menor do que o medido pelo sistema estereoscópico, então as medições em maior velocidade teriam um erro sistemático maior.

O desvio padrão (segunda coluna, Tabela 2), indicador do erro aleatório, também pode ser analisado em unidades de eletrodo consumível, sendo que o menor valor foi de 0,24 unidades para a velocidade de 1,67 mm/s (10 cm/min) e o maior valor foi de 2,13 unidades para a velocidade de 10,00 mm/s. Este resultado era esperado, já que em baixas velocidades há mais medições válidas, minimizando os erros inerentes do método de cálculo do volume. A menor velocidade não foi a que retornou o menor erro aleatório (devido ao próprio método de cálculo e à resolução do robô), porém é notável o quanto a velocidade interfere nesse aspecto: nos ensaios com 0,83 e 1,67 mm/s (5 e 10 cm/min, respectivamente), o erro aleatório foi de 4 a 5 vezes menor do que para as outras faixas de velocidade ensaiadas.

O erro total do sistema, em qualquer faixa de velocidade ensaiada, ficou menor do que o critério de validação adotado (850,00 mm³ ou 5 unidades de eletrodo consumível). Os ensaios realizados com velocidade em X de 3,33 e 6,67 mm/s (20 e 40 cm/min, respectivamente) apresentaram o menor erro total, porém deve ser levado em conta a contribuição de cada parcela do erro (sistemática e aleatória) para julgar qual a faixa de velocidade mais adequada a cada tipo de solicitação. O erro sistemático pode ser compensado através de ensaios, como os desenvolvidos neste trabalho, realizando-se medições sobre a peça a ser soldada para determinação de um valor de correção. Em utilização a nível industrial, onde o comprimento de junta inspecionado é grande, há viabilidade no ensaio de trechos dessas juntas para determinação da correção, que minimiza o erro total do sistema. Adicionando-se uma correção às medições futuras, o erro aleatório torna-se o principal fator para determinação da precisão do sistema.

4. CONCLUSÃO

O sistema proposto foi desenvolvido com sucesso e se mostrou capaz de realizar medições de volume em situação de grande dificuldade (mudanças bruscas no perfil da junta). Foram realizados testes utilizando um único corpo de prova, porém o sistema pode operar com qualquer tipo de chanfro que o sensor óptico possuir perfil pré-programado.

Analisando os resultados expostos na quarta coluna (Tabela 3) e comparando-os com o padrão de validação adotado (volume de 850,00 mm³, ou 5 unidades de eletrodo consumível), é evidente que todas as faixas de velocidade ensaiadas apresentaram desempenho satisfatório. A inspeção prévia realizada em qualquer uma dessas faixas de velocidade resultaria em um erro capaz de ser “compensado” pelo material extra no reforço, garantindo preenchimento completo do chanfro e, assim, qualidade aceitável do produto final.

Aplicações que não necessitem de muita precisão de medida (principalmente chanfros de maior dimensão e chapas espessas, por terem um volume de reforço proporcionalmente maior) e trabalhem com o mesmo tipo de junta e processo de soldagem (facilitando a eliminação do erro sistemático) podem utilizar velocidades maiores de inspeção sem comprometer a qualidade do produto final, ganhando em produtividade.

Comparando os valores de incertezas encontrados para cada faixa de velocidade utilizada, a velocidade de execução da inspeção prévia que garante menor erro depende principalmente da aplicação. A impossibilidade de realização de

ensaios prévios, ou inviabilidade dos mesmos, sugere então a utilização das velocidades de 3,33 e 6,67 mm/s (20 e 40 cm/min, respectivamente), pois apresentaram o menor erro total de medição, além de velocidade razoável de inspeção.

Na possibilidade de execução dos ensaios para compensação do erro sistemático, a faixa de velocidade mais adequada não é a que apresentou menor valor de incerteza combinada (quarta coluna, Tabela 3), mas sim a que apresentou menor valor na terceira coluna desta mesma tabela (menor erro aleatório). Os ensaios realizados em 1,67 mm/s (10 cm/min) apresentaram menor valor de erro aleatório. A menor velocidade de medição apresentou um erro aleatório ligeiramente maior, devido ao método de cálculo utilizado e à resolução do manipulador robótico.

5. REFERÊNCIAS

- AWS, 2010, “D1.1/D1.1M:2010 – Structural Welding Code – Steel”, American Welding Society, 22nd Edition, Florida, USA, 570p.
- Bonacorso, N.G., 2004, “Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 114 p.
- Kang, M., Kim, J., Park, Y., Woo, G., 2007, “Laser Vision System for Automatic Seam tracking of Stainless Steel Pipe Welding Machine”, IEEE 2007 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Seoul, Korea, pp. 1046-1051.
- Liu, X., 2010, “Image Processing in Weld Seam Tracking with Laser Vision Based on Radon Transform and FCM Clustering Segmentation”, IEEE 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Changsha, China, pp. 470-473.
- Mendonça, F.K., 2013, “Evolução da Técnica de Seguimento de Junta via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 125 p.
- MVS, 2009, “SLS-050 Preliminary Data Sheet September 2009”, Meta Vision Systems, Quebec, Canada, 2 p.
- Pham, H. (ED.), 2006, “Springer Handbook of Engineering Statistics”, Springer London, London, England, 1120 p.
- SPS, 2013, “Catálogo de Equipamentos”, Sistemas e Processos de Soldagem, Santa Catarina, Brasil, 17 p.
- XiaoQi, C., Rajagopalan, D., Aik, M.F., 2002, “Advanced Automation Techniques in Adaptive Material Processing”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 321 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR VOLUME MEASUREMENT OF WELDING GROOVE THROUGH LASER MEASURING TECHNOLOGY

Alberto Bonamigo Viviani, alberto.bonamigo@labsolda.ufsc.br¹

Jair Carlos Dutra, j.dutra@ufsc.br¹

Nelso Gauze Bonacorso, nelso@ifsc.ed

Regis Henrique Gonçalves da Silva, regis.silva@posgrad.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, Bairro Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC.

²Instituto Federal de Santa Catarina, Rua Mauro Ramos, 950, Bairro Centro, 88020-300, Florianópolis, SC.

Code: CONEM2014-1130

Abstract. *In the Oil and Gas Industry, shipbuilding, civil, automotive and other industries that require joining materials by welding, there is difficulty in standardizing these joints. This difficulty often compromises the use of automatic welding. To make it possible to weld without operator intervention, it is essential that the geometry of the joint being known throughout its length, allowing the machine to adapt to geometrical deviations of the joint, ensuring complete filling of the welding groove. This work proposes the development of a system for measuring the volume of welding grooves. The volume measurement is performed by an optical laser sensor "light sheet" type that, once programmed to recognize certain seam profile, is able to recognize specific points on the groove geometry and calculates the joint variables, such as the cross-sectional area. This area is stored in a software and concatenated with the translational motion of the robotic manipulator that drives the sensor over the joint. The area and manipulator's position data collection allow the calculation of seam volume. A testing plate is designed to simulate a difficult inspection joint, with abrupt changes in profile and regions with and without partial filling. Tests of the measuring system with different travel speeds of the robotic manipulator are performed. The results of these tests are compared to the volume measurement performed by a calibrated commercial stereoscopic system with high precision. The proposed system proves to be suitable for bevels inspection with accurately within the stipulated limits, using any of the tested travel speed.*

Keywords: Laser Sensing, Welding, Inspection, Metrology