

AUTOMATIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES E DE DEPOSIÇÃO POR SOLDAGEM VISANDO A RECUPERAÇÃO DE ROTORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE GRANDE PORTE

Nelso Gauze Bonacorso

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência de Metal-Mecânica, Av. Mauro Ramos, 950, Centro, 88.020-300, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: nelso@cefetsc.edu.br

Armando Albertazzi Gonçalves Junior

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa Postal 5053, 88.040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: albertazzi@labmetro.ufsc.br

Jair Carlos Dutra

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa Postal 476, 88.040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: jdutra@imc-soldagem.com.br

Resumo. *As turbinas hidráulicas de grande porte das usinas de geração de energia elétrica apresentam erosão por cavitação e precisam ser restauradas pela deposição de material por soldagem. Nesse contexto, o presente trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia para executar inicialmente a medição automatizada da superfície afetada por cavitação através de um sensor óptico a laser tipo “folha de luz” com três linhas e obtenção da descrição matemática, tanto da superfície erodida, quanto uma estimativa da superfície original. A seguir, esta metodologia define a estratégia para determinar a localização dos cordões de solda de cada camada e ainda sistematizar os procedimentos típicos na operação robotizada de soldagem a plasma com alimentação automática de arame para o preenchimento destas cavidades. Por fim, é realizada a medição automatizada da superfície recuperada e a obtenção de sua descrição matemática com a finalidade de realizar a avaliação geométrica da recuperação. Resultados práticos da estratégia de preenchimento de uma cavidade típica de uma das pás de uma turbina hidráulica são apresentados com o objetivo de validar a metodologia proposta e os algoritmos matemáticos desenvolvidos.*

Palavras-chave: metrologia, soldagem, robótica, cavitação, turbinas hidráulicas.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Calainho⁽¹⁾ a erosão por cavitação em turbinas hidráulicas é um fenômeno dos mais indesejáveis e nocivos, e responsável por grandes perdas e danos no setor elétrico. Hoje no país, cerca de 75% das usinas hidroelétricas estão operando com algum tipo de problema de cavitação em seus equipamentos. Além da erosão dos componentes de uma unidade hidráulica de geração, a cavitação produz também vibrações, ruídos e a redução do rendimento da turbina.

A recuperação das regiões erodidas por cavitação é realizada pela deposição de material por soldagem. Normalmente estas superfícies possuem geometria complexas e localizam-se em posições bastante desfavoráveis à soldagem, tanto do ponto de vista de conforto para o soldador, como de adesão do metal fundido em transferência do eletrodo à superfície da turbina. Quantidades expressivas de ligas especiais de aço inoxidável são depositadas nas regiões erodidas com o objetivo de recompor o perfil original das pás do rotor, como mostra o filme feito pelo IREQ⁽²⁾.

Os reparos são realizados no local e, na maioria das vezes, de forma manual por uma equipe de soldadores. Este tipo de operação apresenta uma série de problemas técnicos e econômicos, tais como: o trabalho é insalubre, locais são de difícil acesso e posições de soldagem desfavoráveis, intenso e demorado trabalho de esmerilhamento, a qualidade do reparo depende da habilidade do soldador, retrabalho e deterioração progressiva da forma geométrica das pás da turbina.

Segundo Pereira⁽³⁾ e Tremonti⁽⁴⁾ a soldagem robotizada seria a alternativa natural por apresentar vantagens em relação ao processo manual, tais como: redução do tempo de permanência de pessoas em local insalubre, melhor uniformidade e qualidade da soldagem nas regiões reparadas, melhor controle da geometria das pás da turbina e redução do custo total na recuperação de turbinas hidráulicas. Porém, os robôs manipuladores convencionais não podem ser usados para esta tarefa em função do limitado espaço de trabalho existente no interior do rotor de uma turbina hidráulica.

No projeto Roboturb, um robô foi projetado e construído numa parceria entre a UFSC, LACTEC, COPEL e, mais recentemente, FURNAS. Este robô, como mostra a figura 1, possui sete graus de liberdade, sendo que seis são devidos às juntas rotativas, J_2 à J_7 , enquanto que o sétimo grau de liberdade, junta J_1 , é dado pelo deslocamento sobre um trilho flexível. Este trilho, por sua vez é conformado e fixado sobre a superfície livre de trabalho através de ventosas ou fixadores magnéticos.

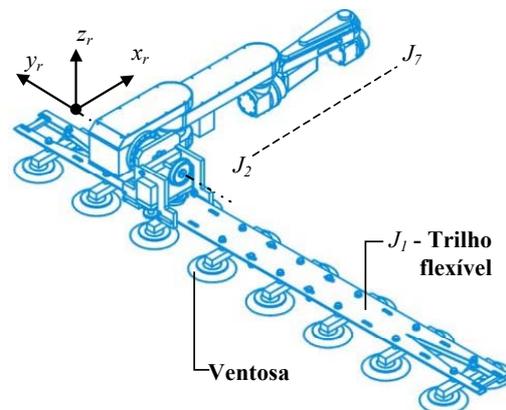


Figura 1 - Estrutura cinemática do robô desenvolvido no projeto Roboturb.

Este robô possui dois efetadores que são usados alternadamente durante as tarefas de recuperação de superfícies erodidas por cavitação, conforme mostra a figura 2.

O primeiro efetador é o sensor óptico a laser de três linhas, confeccionado por Hrebabetzky⁽⁵⁾, responsável pelas tarefas de medição da superfície danificada e da superfície recuperada. Seus principais parâmetros são: *stand-off* de 155 mm, faixa de medição de 50 mm, resolução da câmera CCD é de 768x572 pixels, incerteza de medição de 0,2 mm na direção y e de 0,2 mm na direção z.

O segundo efetador é uma tocha plasma de soldagem manual modelo PWH-4A (70°) com alimentação automática de arame, responsável pela tarefa de deposição de material por soldagem.

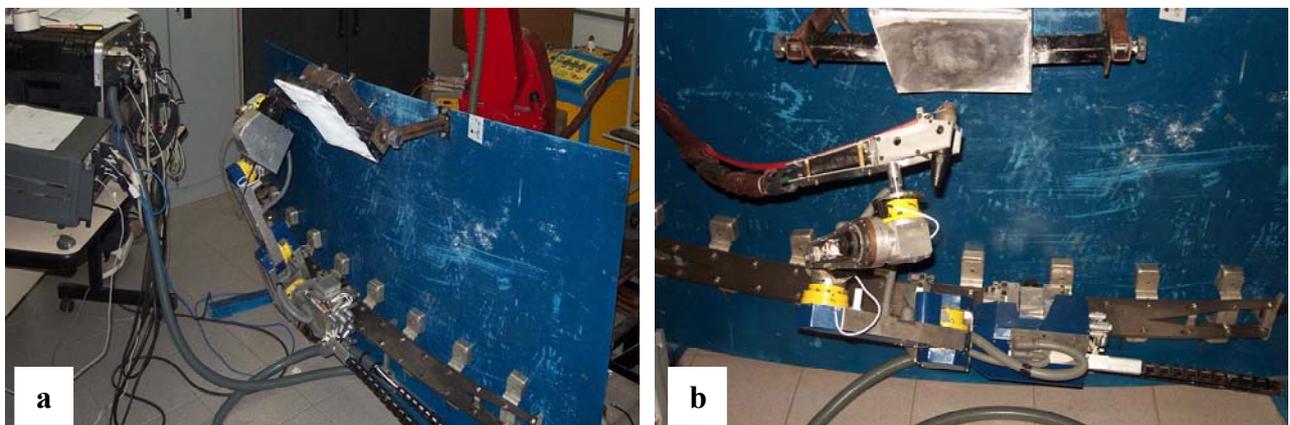


Figura 2 - Robô do projeto Roboturb. Em (a), com o sensor óptico a laser de três linhas e em (b), com a tocha de soldagem plasma com alimentação automática de arame.

2. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

No processo de recuperação as superfícies afetadas por cavitação são inicialmente localizadas e preparadas. Esta preparação é manual, via processo de goivagem por arco elétrico, e consiste na remoção dos poros decorrentes do fenômeno da cavitação com o objetivo de deixar a superfície lisa e o mais suave possível. A região resultante deste processo, chamada também de superfície danificada, é uma superfície livre circundada por trechos não danificados e, não pode ser representada por equações matemáticas na forma implícita ou explícita, sendo normalmente de difícil descrição analítica.

2.1. Medição Automatizada de Superfícies Danificadas

A medição inicial é realizada com o dispositivo de aprendizagem, *teach pendant*. O operador posiciona e orienta visualmente o sensor óptico do robô, dentro da faixa de medição, com a finalidade de efetuar a medição dos pontos extremos da linha central projetada pelo sensor óptico: $pe_1(xe_1, ye_1, ze_1)$ e $pe_2(xe_2, ye_2, ze_2)$.

O segmento de reta que une estes dois pontos, conforme mostra a figura 3, indica de forma aproximada, a direção horizontal de deslocamento da tocha durante a execução dos cordões de solda na região danificada. Estes dois pontos, juntamente com os outros adquiridos na mesma leitura, formam o primeiro subconjunto de pontos pertencente a região não danificada.

A seguir é realizada a medição dos outros subconjuntos de pontos localizados na região não danificada que inscreve o local danificado. Assim, obtém-se um conjunto de pontos $[pe_1(xe_1, ye_1, ze_1), pe_2(xe_2, ye_2, ze_2), \dots, pe_n(xe_n, ye_n, ze_n)]$ referenciados ao sistema de coordenadas fixo do robô $0_r-x_r y_r z_r$.

Um outro conjunto de pontos $[pd_1(xd_1, yd_1, zd_1), pd_2(xd_2, yd_2, zd_2), \dots, pd_m(xd_m, yd_m, zd_m)]$, todos localizados dentro da região danificada, deve também ser medido com o objetivo de caracterizar a forma desta região. Este conjunto de pontos é também referenciado ao sistema de coordenadas fixo do robô.

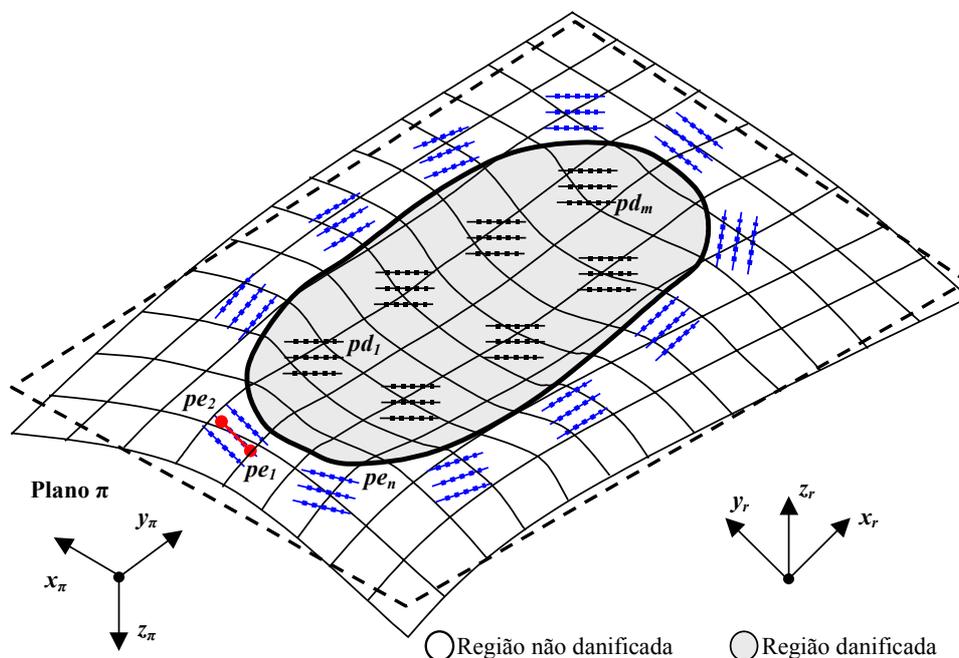


Figura 3 - Medição inicial dos pontos.

É ajustado um plano π , como mostra a figura 3, pelo método dos mínimos quadrados, que melhor se ajusta à região representada pelo conjunto de pontos: pe_1, pe_2, \dots, pe_n . O objetivo da criação deste plano é o de delimitar a região danificada, determinar a orientação e as posições para realização da medição automatizada.

2.2. Deposição Automatizada em Superfícies Danificadas

A medição automatizada da superfície afetada por cavitação, região danificada e também do local não danificado que envolve esta região danificada, é realizada através da leitura de uma matriz de pontos desta superfície em cada posição de medição.

Para reconstruir a superfície original é preciso, em primeiro lugar, interpolar pontos internos com as informações somente do contorno inteiramente localizado na região não danificada da superfície afetada por cavitação. Segundo Zeid⁽⁶⁾ esta interpolação pode ser realizada utilizando a equação que descreve uma superfície do tipo Coon bicúbica.

Com as informações do contorno localizado na região não danificada que envolve a superfície afetada por cavitação, e também dos pontos interpolados na região central, é gerada a superfície original estimada composta do tipo B-spline uniforme bicúbica $r_{i,j}(u,v)$, conforme mostra Qiulin⁽⁷⁾. Este tipo de superfície, como mostra a figura 4, é formada por um conjunto de $(k-2) \times (l-2)$ pedaços nas direções u e v respectivamente.

A superfície afetada por cavitação $s_{i,j}(o,w)$ é obtida utilizando o mesmo conjunto de parâmetros do contorno que envolve a região danificada, empregado na construção da superfície original, mais o conjunto de pontos representantes da região interna danificada. Sua equação é também composta do tipo B-spline uniforme bicúbica.

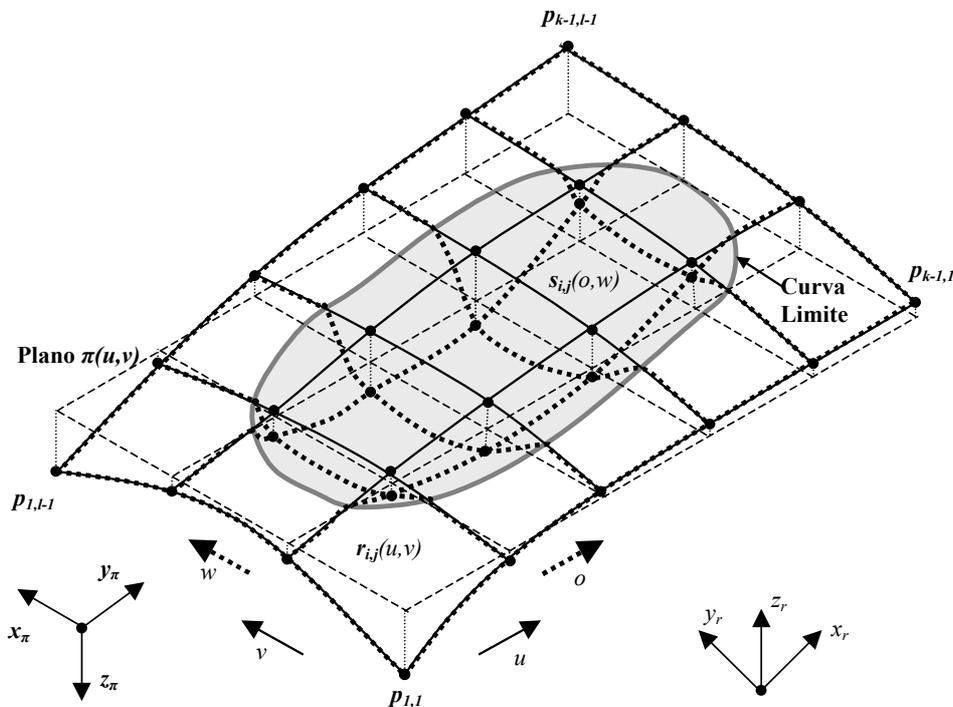


Figura 4 - Curva limite entre região afetada e não afetada pela cavitação.

Os pontos que compõem a trajetória de todos os cordões de solda estão inicialmente localizados sobre a superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$ e ao longo da direção w . Estes pontos se dividem em dois conjuntos: os pontos pertencentes às trajetórias dos cordões ímpares e os pontos pertencentes às trajetórias dos cordões pares.

O objetivo de criar estes dois conjuntos de pontos é o de proporcionar uma defasagem entre as trajetórias dos cordões de solda de duas camadas adjacentes, ou seja, as camadas de soldagem ímpares são formadas inicialmente apenas pelo conjunto de cordões ímpares, enquanto que, as camadas de soldagem pares são formadas inicialmente somente pelos cordões pares.

A distância entre as trajetórias de dois cordões de solda adjacentes d_{ip} , um ímpar e um par ou vice-versa, é constante e igual a um quarto da largura de um cordão de solda ($L/4$). A distância entre as trajetórias de dois cordões de solda, ímpares d_{ii} ou pares d_{pp} consecutivos, é também constante e igual a metade da largura de um cordão de solda ($L/2$).

Para todos os pontos localizados na superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$ e pertencentes às trajetórias iniciais dos cordões de solda, é determinada, na direção de seu respectivo vetor normal unitário, a sua distância t em relação à superfície original reconstruída $r_{i,j}(u,v)$.

A distância máxima t_m , entre estes pontos e à superfície original reconstruída $r_{i,j}(u,v)$, é obtida mediante a verificação da maior distância t entre todos os pontos. Por sua vez, o número de camadas de soldagem nc , figura 5.a, é determinado através da seguinte equação:

$$nc = \text{ceil} \left(\frac{t_m + 0,5 \cdot \Delta h}{h_{méd}} \right) \quad (1)$$

Onde: $h_{méd}$ é altura média da camada de solda (mm), Δh é a ondulação da camada de solda (mm) e ceil é a função de arredondamento numérico que resulta um valor inteiro na direção de $+\infty$.

As trajetórias de soldagem definitivas, para cada camada ($cs=1, 2, \dots, nc$), são determinadas a partir do deslocamento dos pontos pertencentes as trajetórias iniciais correspondentes, na direção de seus respectivos vetores normais unitários, conforme mostra a figura 5.a.

Para cada ponto, pertencente à superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$, esta associado a distância t entre a superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$ e a superfície original reconstruída $r_{i,j}(u,v)$. Uma trajetória de soldagem definitiva de uma determinada camada é formada apenas pelos pontos deslocados e correspondentes, que satisfazem a seguinte relação:

$$t > h_{méd} \cdot (cs - 1) \quad (2)$$

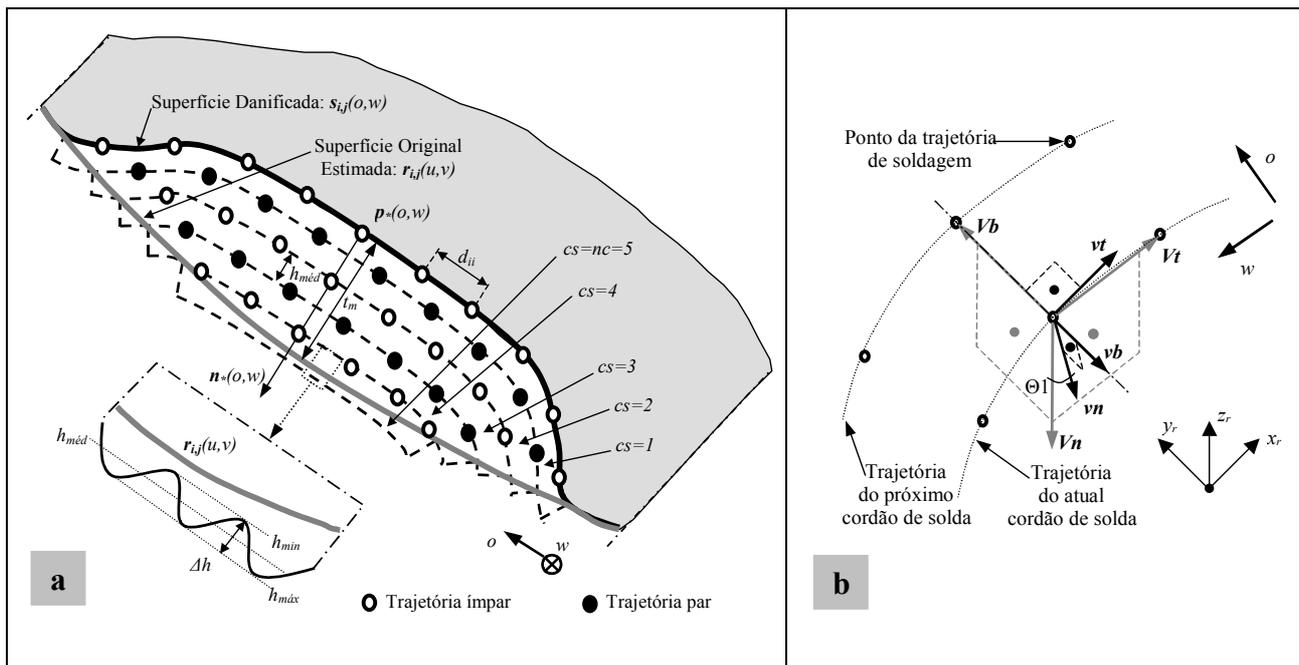


Figura 5 - Em (a), a seção transversal das camadas de soldagem e trajetórias definitivas e em (b), posição e orientação das trajetórias de soldagem de cada camada.

Cada camada de soldagem é realizada no sentido o da superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$. Os cordões de solda são executados, com velocidade de soldagem v_s constante e somente no sentido oposto de w através do movimento da origem do sistema de coordenadas da tocha $0_t-x_t y_t z_t$ sobre a posição dos pontos pertencente à trajetória definitiva dos mesmos.

Durante o processo robotizado de deposição por soldagem, o sistema de referência da tocha de soldagem $0_t-x_t y_t z_t$ será orientado nas direções x_t, y_t e z_t , pelos respectivos vetores unitários vt, vb e vn , como mostra a figura 5.b.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1. Descrição do Corpo de Prova

Com o objetivo de validar a metodologia proposta foi confeccionado, um corpo de prova em uma fresadora CNC, figura 6.a, com características geométricas e de composição química, semelhantes as superfícies danificadas encontradas em rotores de turbinas hidráulicas.

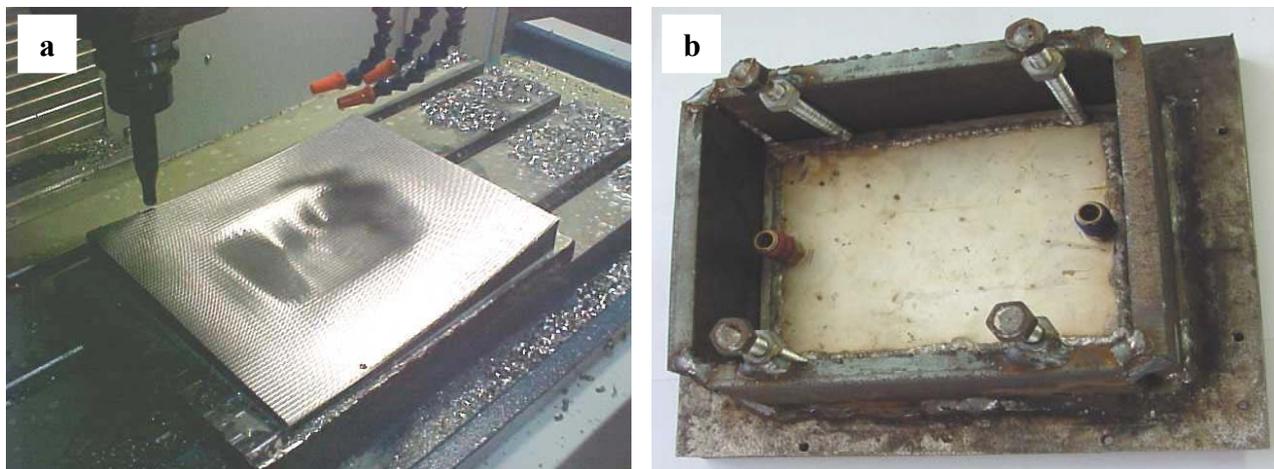


Figura 6 - Em (a), a vista frontal do corpo de prova sendo usinado e em (b), a vista da parte de trás do corpo de prova.

A geometria do corpo de prova foi definida com base em um molde de argila conformado a partir de uma superfície danificada de uma das pás da turbina 2 da usina hidroelétrica de Salto Osório. As dimensões máximas desta cavidade a ser preenchida por soldagem são de 160 mm de comprimento, 120 mm de largura e 8,50 mm de profundidade enquanto que, as dimensões do corpo de prova são: 300 mm de comprimento, 250 mm de largura e 33 mm de espessura máxima.

O material do corpo de prova é aço 1020, assim como, as quatro vigas, com 80 mm de altura, soldadas sobre a parte de trás do corpo de prova, conforme mostra a figura 6.b. A finalidade destas vigas é aumentar a rigidez do conjunto e minimizar as deformações causadas pela soldagem no corpo de prova.

O corpo de prova é também refrigerado através de um trocador de calor por onde circula água, como mostra a figura 6.b, para proporcionar condições térmicas de soldagem semelhantes as encontradas na recuperação de pás de turbinas hidráulicas. A idéia é evitar o aquecimento excessivo da superfície recuperada pelo aporte de calor do arco elétrico em um corpo de prova pequeno.

3.2. Resultados Obtidos

Inicialmente o corpo de prova é fixado, como mostra a figura 2.b, na posição sobre-cabeça com uma inclinação de 45° em relação ao plano horizontal, através de parafusos em uma estrutura metálica.

Com o sensor óptico de três linhas fixado ao robô foi realizada a medição inicial (figura 7.a) da superfície do corpo de prova. Os pontos em azul, pontos externos, definem a região não danificada que envolve o local danificado. Os pontos em preto, pontos internos, caracterizam a forma da região danificada. Esta figura mostra também a trajetória, do tipo zig-zag, para realizar a medição automatizada da cavidade do corpo de prova.

As superfícies danificada e original reconstruída, figuras 8.a e 8.b, foram determinadas a partir do conjunto de pontos obtidos na medição automatizada, figura 7.b.

A máxima profundidade existente, calculada a partir da diferença entre a superfície original reconstruída e a superfície danificada, foi de 8,36 mm. Assim, para realizar a recuperação da região danificada do corpo de prova são necessárias três camadas de solda, uma vez que, a altura média de cada camada é de 3,5 mm.

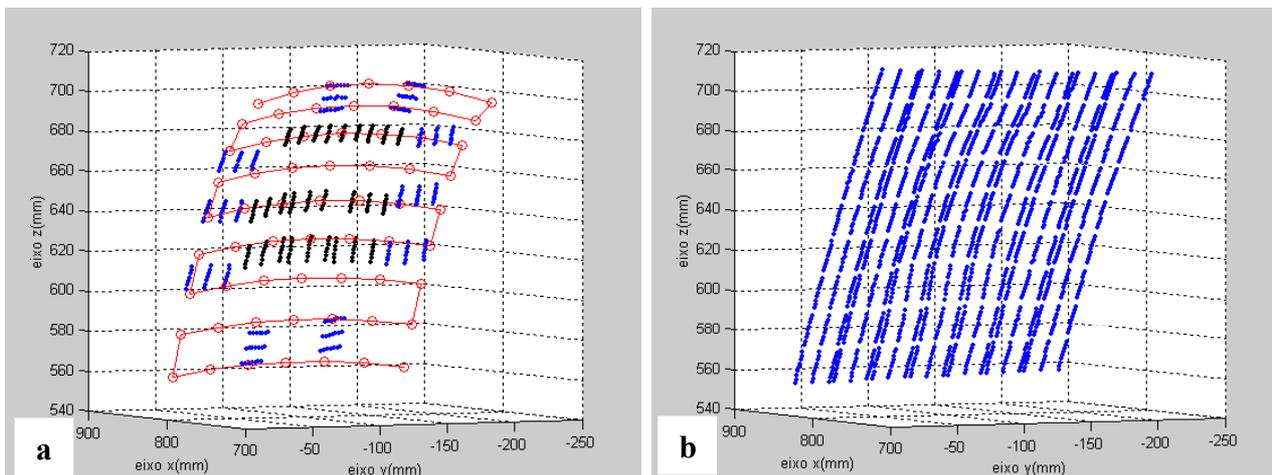


Figura 7 - Em (a), a trajetória para efetuar a medição automatizada da superfície danificada e em (b), os pontos obtidos da medição automatizada.

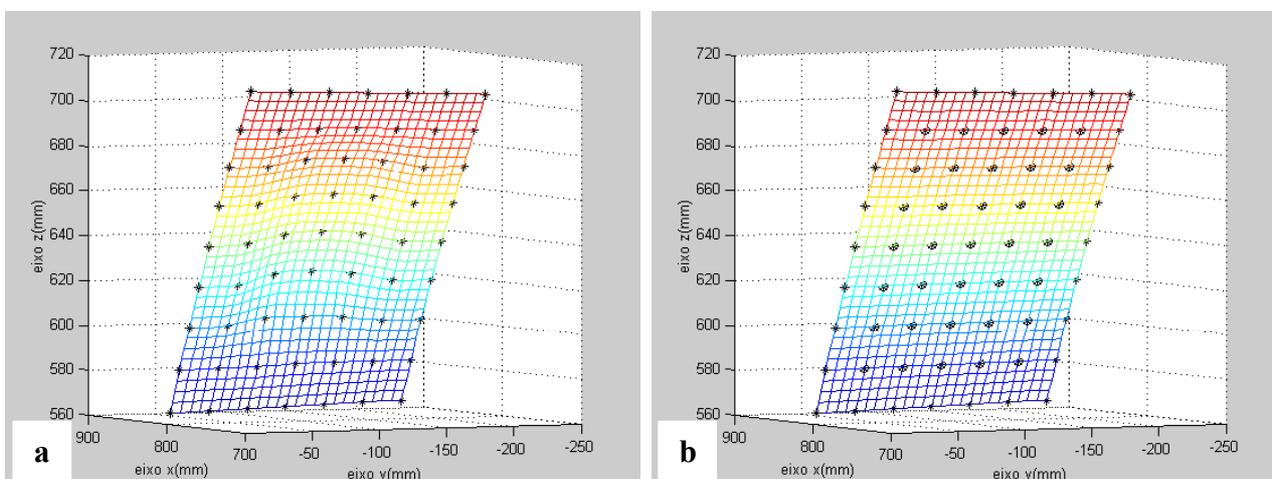


Figura 8 - Em (a), a representação da superfície danificada e seus pontos representantes e em (b), a representação da superfície original reconstruída com seus pontos representantes e interpolados.

Com a tocha de soldagem plasma fixada ao robô foi realizada a adição de material, arame de aço inox E-309L de 1,2 mm de diâmetro, de acordo com as trajetórias mostradas pelas figuras 9.a, 10.a e 11.a. As camadas de soldagem obtidas, figuras 9.b, 10.b e 11.b, foram realizadas com os seguintes parâmetros: recuo de 0,8 mm do eletrodo de tungstênio, diâmetro do orifício constritor de 3,7 mm, distância tocha-peça de 8 mm, distância entre cordões de 4,5 mm, gás de plasma foi usado o argônio com vazão de 2,0 l/min, gás de proteção foi empregado o argônio mais 3% de dióxido de carbono (CO₂) com vazão de 10 l/min, velocidade de soldagem de 14,4 cm/min, velocidade do arame de 2,1 m/min, frequência de pulsação de 5 Hz, razão cíclica de 0,5, corrente de pulso de 200 A para a primeira camada e de 180 A para as próximas camadas, corrente de base de 120 A para a primeira camada e de 100 A para as próximas camadas e 7,5 ° de inclinação da tocha em relação o sentido de execução dos cordões de solda.

Uma radiografia foi realizada com o objetivo de detectar discontinuidades, como trincas, poros, inclusão de escória e falta de fusão, no corpo de prova soldado. Este ensaio não-destrutivo, apenas revelou, em toda a região soldada, insignificante quantidade de pequenos poros. Do ponto de vista da natureza, do tamanho e da quantidade de discontinuidades presentes nesta radiografia, o depósito realizado por soldagem plasma, apresentado na figura 11.b, é considerado aceitável.

Com o sensor óptico de três linhas, fixado novamente ao robô, foi realizada a medição automatizada da superfície já recuperada. A superfície recuperada e seus pontos representantes foram determinadas a partir do conjunto de pontos obtidos na medição automatizada desta superfície.

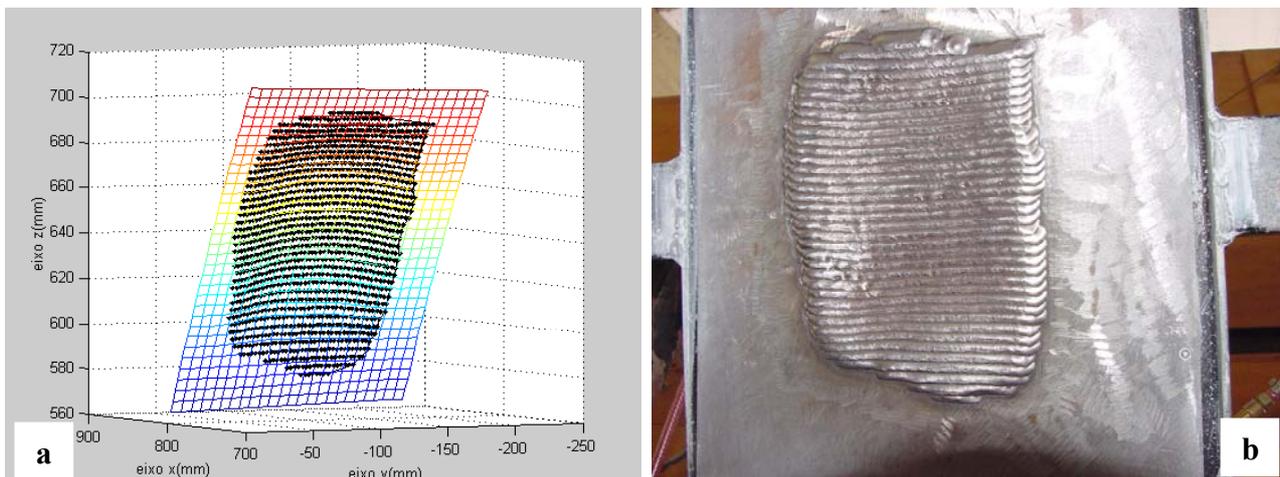


Figura 9 - Em (a), os pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à primeira camada e em (b), a primeira camada de solda.

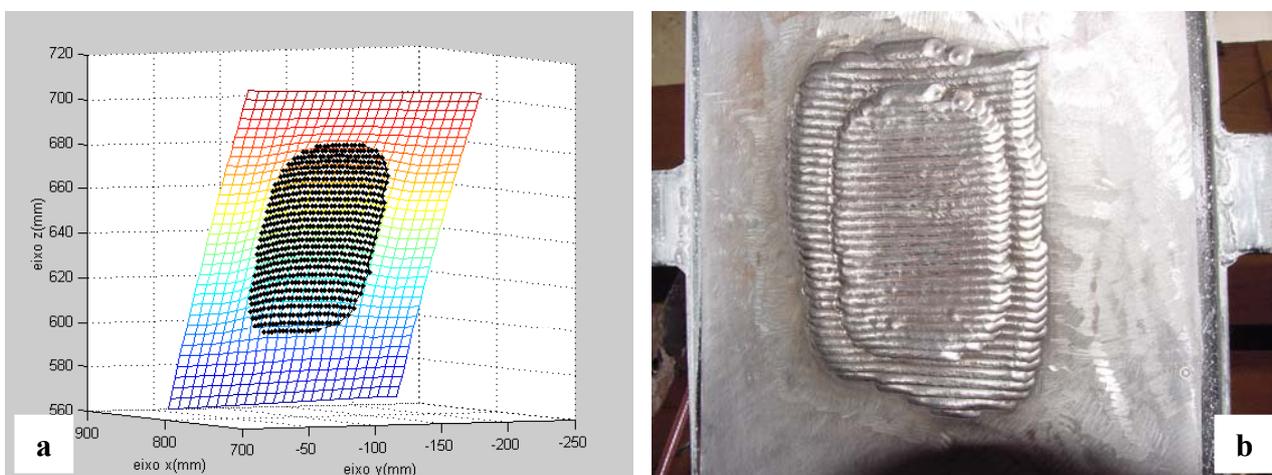


Figura 10 - Em (a), os pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à segunda camada e em (b), a segunda camada de solda acrescida à primeira.

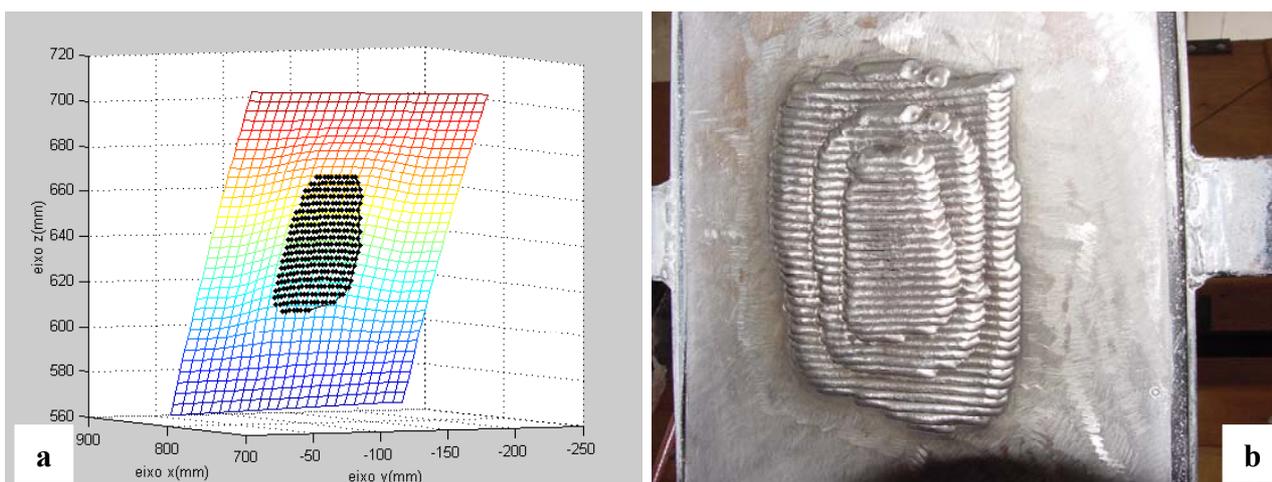


Figura 11 - Em (a), os pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à terceira camada e em (b), a terceira camada de solda acrescida às anteriores.

A avaliação geométrica da superfície recuperada foi realizada. Um excelente resultado foi obtido, conforme mostra a figura 13.a, ou seja, não há falta de metal depositado em toda a extensão da superfície recuperada. As curvas de nível desta figura representam a diferença entre a superfície recuperada e a superfície original reconstruída.

A seguir, o corpo de prova foi esmerilhado, de forma manual e com orientação fornecida pela figura 12.a, com o objetivo de se obter a superfície final, figura 12.b, o mais próxima da superfície original reconstruída.

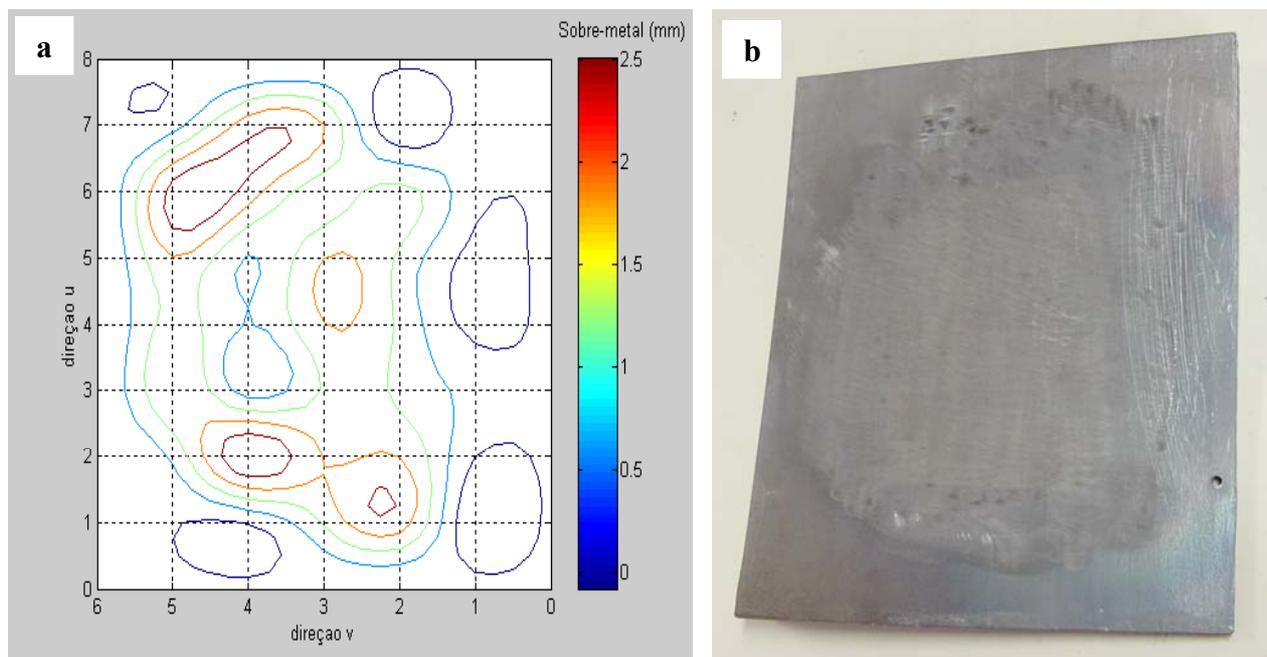


Figura 12 - Em (a), a avaliação geométrica da recuperação e em (b), a superfície final obtida após esmerilhamento.

4. CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado representou um esforço associativo de várias áreas do conhecimento em engenharia. A metodologia desenvolvida foi validada através da execução dos algoritmos matemáticos implementados em ambiente de programação MatLab. Estes algoritmos que foram gerados são flexíveis podendo ser aplicados, adaptados ou expandidos, para solucionar problemas similares de recuperação automatizada de superfícies.

Excelentes resultados foram obtidos com relação à avaliação geral da recuperação realizada. A radiografia revelou, em toda a região recuperada, insignificante quantidade de pequenos poros. O resultado da avaliação geométrica da superfície recuperada mostrou, com relação à superfície original reconstruída, um sobre metal situado na faixa de 0 a 2,5 mm.

O sensor óptico a laser de três linhas proporcionou, durante a medição automatizada da superfície danificada e da superfície recuperada, uma rápida aquisição dos pontos pertencentes a estas superfícies com níveis de incerteza da ordem de 0,5 mm. Cabe ressaltar ainda, que em cada posição de medição das respectivas trajetórias, a leitura dos pontos sempre ocorreu na região central da faixa de medição deste sensor.

O processo automatizado de soldagem plasma com alimentação automática de arame, aperfeiçoado neste trabalho, mostrou-se robusto e repetitivo na recuperação de cavidades semelhantes as encontradas em pás de turbinas hidráulicas de grande porte.

As camadas de solda, produzidas por este processo, apresentam excelente acabamento superficial e são isentas de respingos e salpicos. A defasagem existente, entre as trajetórias de soldagem de camadas adjacentes, proporcionaram uma menor ondulação na superfície recuperada do corpo de prova. Além disso, os cordões de solda possuem penetração rasa e uma ótima relação largura/altura.

5. REFERÊNCIAS

1. CALAINHO, J. A. L., HORTA, C.A., GONÇALVES, C. & LOMÔNACO, F. G. **Cavitação em turbinas hidráulicas do tipo Francis e Kaplan no Brasil**. XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999.
2. IREQ. **Scompi**, filme em fita VHS produzido pela instituto de pesquisa Hydro-Québec's, (IREQ), duração de 30 minutos, colorido.
3. PEREIRA, A. G., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem robotizada de andaimes tubulares**. II CONGRESSO NACIONAL de ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM/2002, Agosto, 2002.
4. TREMONTI, M. A. **Requisitos organizacionais à introdução da robótica: o caso do processo de soldagem a arco elétrico sob proteção gasosa**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP, Área de Concentração - Engenharia de Produção, Março, 1999.
5. HREBABETZKY, F., GONÇALVES JUNIOR, A. A., & NEROSKY L. A. **Shape and Local Curvature Measurement by Combination of a Three-line finder and a Mechanical measurement arm**. 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe, Munique, 2001.
6. ZEID, I. **CAD/CAM theory and practice**. McGraw-Hill, 1991.
7. QIULIN, D. & DAVIES, B. J. **Surface engineering geometry for computer-aided design and manufacture**. Ellis Horwood Limited, 1987.

AUTOMATION OF THE PROCESSES OF MEASUREMENT OF SURFACES AND OF DEPOSITION BY WELDING SEEKING THE RECOVERY OF ROTORS OF LARGE-SCALE HYDRAULIC TURBINES

Nelso Gauze Bonacorso

Federal Center of Technological Education of Santa Catarina, Management of Metal-mechanics, Av.Mauro Ramos 950, Centro, 88.020-300, Florianópolis, SC, Brazil. E-mail: nelso@cefetsc.edu.br

Armando Albertazzi Gonçalves Junior

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, Caixa Postal 5053, 88.040-970, Florianópolis, SC, Brazil. E-mail: albertazzi@labmetro.ufsc.br

Jair Carlos Dutra

Federal University of Santa Catarina, Mechanical Engineering Department, Caixa Postal 476, 88.040-970, Florianópolis, SC, Brazil. E-mail: jdutra@imc-soldagem.com.br

***Abstract.** Large-scale hydraulic turbines of electric power plants usually present erosion due to cavitation. Periodically they need to be restored through material deposition by welding. In this context, the present work deals with the development of an automatic methodology. It starts with the automated measurement of the surface affected by cavitation by means of a laser optical sensor of type "light sheet" with three lines, and to obtain the mathematical description of both the eroded and an estimation of the original surface. After that, this methodology defines the strategy to determine the location of the weld beads in each layer and further to systematize the typical procedures in the automated operation of welding by plasma with automatic wire feeding for the completion of these cavities. Finally, it is accomplished the automated measurement of the recovered surface and the computation of its mathematical description with the purpose of accomplishing the geometric evaluation of the recovery. Practical results of the developed strategy for completion of a typical cavity of one of the blades of a hydraulic turbine are presented with the objective of validating the proposed methodology and the developed mathematical algorithms.*

***Keywords.** metrology, welding, robotics, cavitation, hydraulic turbines.*