

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

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

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

Nelso Gauze Bonacorso

Florianópolis, agosto de 2004.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Rio Grande do Sul, Brasil, 1985 – 1989.

Especialista em Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1990 – 1991.

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1991.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico

Título: Sistema Microcontrolado Usado no Controle e Monitoração de Bancos de Baterias.

Orientador: Prof. Hari Bruno Mohr, Dr.

Co-orientador: Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Professor da Gerência Educacional de Metal Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, CEFET-SC, desde 1992.

Autor do Livro: Automação Eletropneumática. 5ª edição, São Paulo, editora Érica, 1997.

Doutor em Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2004.

Área de Concentração: Metrologia e Instrumentação

Título: Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte.

Orientador: Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

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

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng. - Orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr.Eng. - Presidente

Dr. Alexandre Meirelles Pope, Ph.D. (CENPES/PETROBRÁS) - Relator

Prof. Américo Scotti, Ph.D. (UFU)

Prof. Berend Snoeijer, Dr.Ing. (UFSC)

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr.Ing. (UFSC)

À minha esposa, Jucelaine.

Aos meus filhos, Gabriel e Lucas.

Ao meu pai, Gabriel (*In memorium*).

À minha mãe, Anna.

Ao meu irmão, Hélio.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pelas oportunidades concedidas e pelo amor que tenho recebido.

Aos meus pais, pela educação, apoio e lição de vida transmitida.

À minha esposa Jucelaine e aos meus filhos Gabriel e Lucas, pelo carinho transmitido em todas as situações e compreensão nos momentos de ausência.

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, por proporcionar as condições necessárias para realização deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, pela oportunidade concedida para realização desta capacitação, bem como pela disponibilização de sua estrutura laboratorial.

Aos professores orientadores, Armando Albertazzi Gonçalves Junior e Jair Carlos Dutra, pela confiança depositada e pela orientação que se vez presente nos momentos decisivos deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina, Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Jair Carlos Dutra, Carlos Alberto Flesch, Raul Guenther, Frank Hrebabetzky e Raimes Moraes, pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas do curso de pós-graduação.

Aos colegas de trabalho do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, André Roberto de Sousa, Valdir Noll, Marcelo Carlos Silva, João Batista Broering, Felício José Gesser, Silvana Rosa Lisboa, Bernardo Rachadel, Cláudio Roberto Losekann e Rogério Mello, pelo apoio, incentivos e sugestões.

Ao Eng. Walter Kapp, pela criatividade e brilhantismo técnico com o qual conduz seus trabalhos frente à coordenação do projeto Roboturb.

Aos engenheiros e estagiários do projeto Roboturb, Emerson Raposo, Tiago Loureiro, Henrique Simas, Milton Pereira, Rodolfo Lóssio, Rafael Leal, Rafael May Toil, Queiroz e demais membros de suas respectivas equipes.

À toda equipe do Labsolda, que é um verdadeiro time no campo do desenvolvimento de tecnologias para soldagem, em especial ao Raul Gohr Junior, Moisés Alves de Oliveira, Régis Henrique Gonçalves e Silva, Valério Quadros, Cleide M. Marqueze, Víctor Manuel Vergara Díaz, Marcus Barnetche, Ederson Afonso Niezer e Fabiano Nantes Serenza.

À secretária do Labmetro, Rosana Vieira, pela constante disponibilidade, e aos colegas de pós-graduação, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Siglas	xii
Simbologia	xiii
Resumo	xvii
Abstract	xviii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Descrição do problema	2
1.2 Estado da arte	3
1.3 Objetivos e contribuições	6
1.4 Estrutura do texto	8
Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	10
2.1 Representação de superfícies livres	10
2.2 Dispositivos de medição aplicáveis	11
2.3 Sensor óptico a laser	11
2.3.1 Sensor óptico de uma linha	13
2.3.2 Sensor óptico multi-linha	16
2.4 Processos de soldagem aplicáveis	18
2.5 Descrição do arco plasma	19
2.6 Processo plasma com alimentação automática de arame	20
2.7 Síntese deste capítulo	23
Capítulo 3 Adequação do Processo de Soldagem	24
3.1 Posicionamento do arame em relação ao arco elétrico	25
3.2 Posicionamento do arame em relação ao cordão de solda	26
3.3 Orientação da tocha de soldagem	27
3.4 Parâmetros de soldagem	28
3.5 Sistema de coordenadas da tocha	31
3.6 Síntese deste capítulo	32

Capítulo 4 Metodologia para Recuperação Automatizada de Superfícies	
Danificadas por Cavitação	33
4.1 Medição automatizada da superfície danificada	33
4.1.1 Medição inicial	34
4.1.2 Determinação da orientação da medição	35
4.1.3 Delimitação da região danificada	36
4.1.4 Determinação das posições de medição	38
4.1.5 Determinação da trajetória de medição automatizada	41
4.2 Deposição automatizada em superfícies danificadas	42
4.2.1 Determinação dos pontos representantes e suas derivadas	42
4.2.2 Obtenção de uma estimativa da superfície original	43
4.2.3 Obtenção da descrição paramétrica da superfície danificada	49
4.2.4 Determinação da localização inicial dos cordões de solda	50
4.2.5 Determinação do número de camadas de soldagem	53
4.2.6 Determinação das trajetórias de soldagem	54
4.3 Qualificação geométrica de superfícies recuperadas	56
4.3.1 Determinação da trajetória de medição da superfície recuperada	57
4.3.2 Obtenção da descrição paramétrica da superfície recuperada	57
4.3.3 Avaliação geométrica da recuperação	58
4.4 Síntese deste capítulo	59
Capítulo 5 Avaliação Experimental	60
5.1 Descrição da bancada	60
5.2 Descrição do corpo de prova	62
5.3 Resultados obtidos	63
5.4 Discussão dos resultados	74
Capítulo 6 Conclusões	75
Referências Bibliográficas	78
Anexo A Teoria de Curvas e Superfícies	86
Anexo B Matriz de Transformação do Sistema de Coordenadas da Tocha	93
Anexo C Fluxogramas dos Programas Desenvolvidos	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Zona erodida pelo efeito da cavitação na pá de uma turbina Francis [24]	1
Figura 1.2 - Rotor de uma turbina Francis de grande porte [54]	2
Figura 1.3 - Soldadores entre as pás da turbina [24]	4
Figura 1.4 - Operação de deposição robotizada por soldagem [63]	5
Figura 1.5 - Depósito realizado com o robô Scampi [54]	5
Figura 1.6 - Estrutura cinemática do robô desenvolvido no projeto Roboturb	6
Figura 2.1 - Técnica da triangulação óptica com um feixe laser	12
Figura 2.2 - Parâmetros característicos de um sensor óptico tipo “folha de luz” [8]	14
Figura 2.3 - Imagem obtida pelo sensor óptico tipo “folha de luz” ao medir a superfície representada na figura 2.2	15
Figura 2.4 - Distribuição de intensidade luminosa sobre a j -ésima linha da câmera CCD	16
Figura 2.5 - Estrutura básica do sensor óptico de três linhas	17
Figura 2.6 - Imagem obtida pelo sensor óptico de três linhas ao medir a superfície representada na figura 2.5	17
Figura 2.7 - Representação esquemática do processo plasma	19
Figura 2.8 - Processo plasma com o direcionador de arame	21
Figura 2.9 - Limites da velocidade do arame	22
Figura 2.10 - Relação esquemática entre tensão do arco e distância tocha-peça	22
Figura 2.11 - Técnica do arco elétrico pulsado	23
Figura 3.1 - Tocha plasma com direcionador de arame [43]	24
Figura 3.2 - Ângulo de incidência do arame nas técnicas: antiga à esquerda e nova à direita	25
Figura 3.3 - Variação da dtp na nova estratégia de posicionamento do arame	26
Figura 3.4 - Principais tipos de posicionamento do arame em relação ao cordão de solda	27
Figura 3.5 - Ângulos de orientação da tocha	27
Figura 3.6 - Soldagem sobrecabeça com diferentes inclinações	29
Figura 3.7 - Seção transversal dos cordões de solda da figura 3.6	29
Figura 3.8 - Uma camada depositada com arame E-309L na posição sobrecabeça à 45°	30
Figura 3.9 - Duas camadas depositadas com arame E-309L na posição sobrecabeça à 45°	31
Figura 3.10 - Medição de pontos sobre a superfície da tocha através do braço de medição	31
Figura 3.11 - Posição e orientação do sistema de coordenadas da tocha plasma	32

Figura 4.1 - Medição inicial dos pontos	34
Figura 4.2 - Vista superior da região danificada no sentido do vetor normal do plano π	37
Figura 4.3 - Malhas e nós do plano parametrizado $\pi(u,v)$	39
Figura 4.4 - Trajetória de medição automatizada tipo zig-zag	41
Figura 4.5 - Pontos interpolados para obtenção de uma estimativa da superfície original	44
Figura 4.6 - Estimativa de superfície original	45
Figura 4.7 - Vértices de controle das curvas na direção u	47
Figura 4.8 - Vértices de controle da superfície original	48
Figura 4.9 - Curva limite entre região cavitada e não afetada pela cavitação	50
Figura 4.10 - Localização inicial dos pontos pertencentes as trajetórias dos cordões de solda	51
Figura 4.11 - Determinação dos pontos da trajetória de um cordão de solda	52
Figura 4.12 - Seção transversal das camadas de soldagem e trajetórias definitivas	55
Figura 4.13 - Posição e orientação das trajetórias de soldagem de cada camada	56
Figura 4.14 - Trajetória de medição da superfície recuperada	57
Figura 5.1 - Robô Reis Rv-15, armário de acionamento e microcomputador ao fundo	60
Figura 5.2 - Fonte de soldagem microprocessada e módulo plasma	61
Figura 5.3 - Efetadores do rôbo Reis: (a) Sensor óptico de três linhas e (b) Tocha plasma	62
Figura 5.4 - Vista frontal do corpo de prova sendo usinado	62
Figura 5.5 - Vista da parte de trás do corpo de prova	63
Figura 5.6 - Medição inicial da superfície danificada: região externa e interna	64
Figura 5.7 - Malhas e nós do plano parametrizado	64
Figura 5.8 - Trajetória para efetuar a medição automatizada da superfície danificada	65
Figura 5.9 - Pontos obtidos da medição automatizada	66
Figura 5.10 - Representação da superfície danificada e seus pontos representantes	66
Figura 5.11 - Representação da superfície reconstruída com seus pontos representantes e interpolados	67
Figura 5.12 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à primeira camada	67
Figura 5.13 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à segunda camada	68
Figura 5.14 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à terceira camada	68
Figura 5.15 - Primeira camada de solda	69
Figura 5.16 - Segunda camada de solda acrescida à primeira	69
Figura 5.17 - Terceira camada de solda acrescida às anteriores	70
Figura 5.18 – Radiografia do corpo de prova soldado	70

Figura 5.19 - Trajetória para efetuar a medição automatizada da superfície recuperada	71
Figura 5.20 - Representação da superfície recuperada e seus pontos representantes	72
Figura 5.21 - Avaliação geométrica da recuperação realizada	72
Figura 5.22 - Superfície final obtida após esmerilhamento	73
Figura 5.23 - Robô do projeto Roboturb: (a) Com o sensor óptico de três linhas, (b) Com a tocha plasma e (c) Realizando a primeira camada de solda	73
Figura 5.24 - Camadas de solda produzida pelo processo manual de soldagem MIG	74
Figura A.1 - Função vetorial parametrizada em t	87
Figura A.2 - Função vetorial parametrizada em s	88
Figura A.3 - Sistema de coordenadas local	88
Figura A.4 - Descrição paramétrica de um pedaço de superfície	90
Figura B.1 - Sistemas de coordenadas envolvidos	93
Figura C.1 - Fluxograma de geração da trajetória de medição automatizada da superfície danificada	95
Figura C.2 - Fluxograma de geração das trajetórias de soldagem e de medição automatizada da superfície recuperada	96
Figura C.3 - Fluxograma de qualificação geométrica da superfície recuperada	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Situação da erosão por cavitação em turbinas hidráulicas no Brasil, 1997 [9]	3
Tabela 2.1 - Valores dos principais parâmetros do sensor óptico de três linhas	17

SIGLAS

CCD	- Sigla em inglês: <i>Coupled Charge Device</i>
CERTI	- Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras
CID	- Sigla em inglês: <i>Circuits Integrated Digital</i>
CNC	- Sigla em inglês: Computer Numerical Controls
CEFET/SC	- Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
CMOS	- Sigla em inglês: Complementary Metal Oxide Semiconductor
FURNAS	- Centrais Elétricas S.A.
IREQ	- Sigla em francês: <i>Institut de recherche d'Hydro-Québec</i>
LABMETRO	- Laboratório de Metrologia e Automação
LABSOLDA	- Instituto de Soldagem e Mecatrônica
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MAG	- Sigla em inglês: <i>Metal Active Gas</i>
MCT	- Ministério da Ciência e Tecnologia
MIG	- Sigla em inglês: <i>Metal Inert Gas</i>
ROBOTURB	- Sigla do projeto conjunto UFSC/COPEL/FURNAS/LACTEC intitulado "Sistema Automatizado para Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte"
TIG	- Sigla em inglês: <i>Tungsten Inert Gas</i>
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

A	Matriz de coeficientes do plano π .
b	Distância entre a lente de visualização e o elemento fotosensível.
B	Matriz de coeficientes da superfície quádrlica φ .
$\overline{BB'}$	Deslocamento do ponto visualizado no elemento fotosensível do detector.
C_j	Posição do centro do pico de intensidade luminosa da j -ésima linha.
cs	Número da camada de soldagem.
d	Distância entre a lente de projeção do laser e a lente de visualização.
$d(p_1, p_2)$	Distância entre pontos $\mathbf{p}_1$ e $\mathbf{p}_2$.
$d(p_1, p_3)$	Distância entre os pontos $\mathbf{p}_1$ e $\mathbf{p}_3$.
$d(pe_i, \pi)$	Distância entre o ponto $\mathbf{pe}_i$ e o plano π .
$d(pl_i, \pi)$	Distância entre o ponto $\mathbf{pl}_i$ e o plano π .
D, Du, Dv e Dt	Determinantes.
De, Dh, Do e Dw	Determinantes.
dA'	Distância do ponto pertencente ao objeto em relação a fonte luminosa.
d_{ii}	Distância entre dois cordões de solda impares consecutivos.
d_{ip}	Distância entre dois cordões de solda adjacentes.
d_{pp}	Distância entre dois cordões de solda pares consecutivos.
dtp	Distância tocha-peça.
$f_i(t, e, h)$	Funções de três variáveis: t , e e h .
$f_i(t, o, w)$	Funções de três variáveis: t , o e w .
$f_i(u)$ e $f_i(v)$	Funções cúbicas em u e v .
$f_i(o, w)$	Funções de duas variáveis: o e w .
G, D	Matrizes fundamentais da superfície.
$h_{m\acute{a}x}$	Altura máxima da camada de solda.
$h_{m\acute{e}d}$	Altura média da camada de solda.
i, i_b e i_p	Corrente elétrica, corrente elétrica de base e corrente elétrica de pulso.
i, j, k	Vetores unitários do sistema de coordenadas cartesianas.
I_{ij}	Intensidade luminosa do i -ésimo pixel do intervalo da j -ésima linha.
Iu e Iv	Valores de incrementos nas direções u e v respectivamente.
$J_1 \dots J_7$	Juntas do robô construído no projeto Roboturb.

$k(t), k(s)$	Curvaturas de curvas em função dos parâmetros t e s .
$k-2$	Número de malhas do plano parametrizado $\pi(u, v)$ na direção u .
$k_g(t)$	Curvatura Gaussiana da superfície.
$k_{ij}(e, h)$	Superfície recuperada composta do tipo B-spline.
K_{ij}, R_{ij} e S_{ij}	Matrizes de vértices de controle de cada pedaço de superfície.
$k_n(t)$	Curvatura normal da superfície.
$k_{n,max}(t), k_{n,min}(t)$	Principais curvaturas da superfície.
L	Largura de um cordão de solda.
$l-2$	Número de malhas do plano parametrizado $\pi(u, v)$ na direção v .
lm	Largura de medição.
mq	Tamanho desejado da malha quadrada.
n	Vetor normal unitário da superfície.
$N_{4,i}(e)$ e $N_{4,i}(h)$	Funções cúbicas em e e h .
$N_{4,i}(o)$ e $N_{4,i}(w)$	Funções cúbicas em o e w .
$N_{4,i}(u)$ e $N_{4,i}(v)$	Funções cúbicas em u e v .
nc	Número de camadas de soldagem.
n_i	Número de iterações.
$n_{ij}(u, v)$	Vetor normal unitário da superfície $r_{ij}(u, v)$.
$n^*(o, w)$	Vetor normal unitário da superfície $s_j(o, w)$ nos pontos $p^*(o, w)$.
of	Posição da origem do $0_f-x_fy_fz_f$ em relação ao sistema de coordenadas do braço de medição $0_b-x_by_bz_b$.
oft	Posição da origem do $0_f-x_fy_fz_f$ em relação ao sistema do flange $0_f-x_fy_fz_f$.
ot	Posição da origem do $0_t-x_tz_t$ em relação ao sistema de coordenadas do braço de medição $0_b-x_by_bz_b$.
$p(u, v)$	Ponto representante da superfície quádrlica $\psi_{u,v}$ no sistema $0_r-x_ry_rz_r$.
$p(x_p, y_p, z_p)$	Ponto referenciado ao sistema de coordenadas cartesiana $0-xyz$.
$p^*(o, w)$	Ponto sobre a trajetória inicial anterior.
$p^{**}(o, w)$	Ponto sobre a trajetória inicial posterior.
p_1, p_2 e p_3	Vértices do plano parametrizado $\pi(u, v)$.
$pc_{u,v}$	Posições da medição automatizada.
pd_i	Conjunto de pontos localizados na região danificada.
pe_i	Conjunto de pontos localizados na região não danificada.
$p_i(u, v)$	Pontos internos interpolados.
pl_i	Pontos limites da superfície danificada referentes ao sistema $0_r-x_ry_rz_r$.
$p_{nó}(u, v)$	Pontos de nó do plano parametrizado $\pi(u, v)$.

pp_1 e pp_2	Projeção dos pontos, pe_1 e pe_2 , sobre o plano π .
ppl_i	Projeção dos pontos pl_i sobre o plano π .
$pr(u, v)$	Pontos sobre a superfície original reconstruída $r_{ij}(u, v)$.
$ps_{u,v}$	Ponto representante da superfície quádrlica $\psi_{u,v}$ no sistema $0_{\pi-x_{\pi}y_{\pi}z_{\pi}}$.
$ps^u_{u,v}$ e $ps^v_{u,v}$	Derivadas de primeira ordem no sistema $0_{\pi-x_{\pi}y_{\pi}z_{\pi}}$.
$ps^{uv}_{u,v}$ ou $ps^{vu}_{u,v}$	Derivada de segunda ordem no sistema $0_{\pi-x_{\pi}y_{\pi}z_{\pi}}$.
$p^u(u, v)$ e $p^v(u, v)$	Derivadas de primeira ordem no sistema $0_{r-x_r y_r z_r}$.
$p^{uv}(u, v)$ ou $p^{vu}(u, v)$	Derivada de segunda ordem no sistema $0_{r-x_r y_r z_r}$.
$p\pi_i$	Pontos limites da superfície danificada referentes ao sistema $0_{\pi-x_{\pi}y_{\pi}z_{\pi}}$.
Q'_{ij}	Matriz derivada dos vértices de controle na direção u das curvas do tipo B-spline.
Q_{ij}	Matriz de vértices de controle na direção u das curvas do tipo B-spline.
r	Função vetorial.
r', r'', r'''	Vetores derivada da função vetorial em relação ao parâmetro t .
$\dot{r}, \ddot{r}, \dddot{r}$	Vetores derivada da função vetorial em relação ao parâmetro s .
Rc	Razão cíclica da corrente elétrica.
r_e	Recuo do eletrodo.
$r_i(t_i)$	Retas que passam pelos respectivos pontos projetados ppl_i .
$r_{ij}(u, v)$	Superfície original composta do tipo B-spline.
$r_{p^*}(t)$	Retas que passam nos pontos $p^*(u, v)$.
RT_{bf}	Matriz de rotação do sistema $0_{f-x_f y_f z_f}$ para o $0_{b-x_b y_b z_b}$.
$RT_{r\pi}$	Matriz de rotação do um sistema $0_{\pi-x_{\pi}y_{\pi}z_{\pi}}$ para o $0_{r-x_r y_r z_r}$.
r^u, r^v	Vetores tangentes da superfície.
$r_{u,v}(t_{u,v})$	Retas que passam nos pontos de nó.
$r^u_{ij}(u, v)$ e $r^v_{ij}(u, v)$	Vetores tangentes da superfície $r_{ij}(u, v)$.
r^{uu}, r^{uv}, r^{vv}	Vetores derivada de segunda ordem da superfície.
s	Variável paramétrica: comprimento de arco.
$s_{ij}(o, w)$	Superfície afetada por cavitação composta do tipo B-spline.
t	Variável paramétrica de curvas.
T_{ft}	Matriz de transformação do sistema $0_{r-x_r y_r z_r}$ para o sistema de coordenadas do flange do robô $0_{f-x_f y_f z_f}$.
$T(s), N(s), B(s)$	Vetores unitários do sistema de coordenadas local.
T, t_b e t_p	Período, tempo de base e tempo de pulso respectivamente.
t_m	Distância máxima entre os pontos $p^*(o, w)$ e a superfície $r_{ij}(u, v)$.
u, v, o, w	Variáveis paramétricas de superfícies.

V_a	Tensão elétrica do arco.
v_a	Velocidade de alimentação do arame.
v_{ax}, v_{ay}	Velocidade de alimentação do arame nas direções x e y.
V_{ij}	Matriz de vértices de controle da superfície do tipo B-spline.
v_s	Velocidade de soldagem.
v_t, v_b e v_n	Vetores unitários de orientação da tocha de solda.
$x(t), y(t), z(t)$	Representação paramétrica da curva.
$x(u,v), y(u,v), z(u,v)$	Representação paramétrica da superfície.
$XY\pi$	Matriz de coordenadas x e y dos pontos pe_i .
$XY\varphi$	Matriz de coordenadas x e y dos pontos pe_i e pd_i .
xf, yf e zf	Vetores unitários do sistemas de coordenadas do flange.
xft, yft e zft	Vetores unitários do sistema de coordenadas da tocha em relação ao sistema de coordenadas do flange.
xt, yt e zt	Vetores unitários do sistemas de coordenadas da tocha.
x_π, y_π e z_π	Vetores unitários referentes ao plano π .
$Z\pi$	Matriz de coordenadas z dos pontos pe_i .
$Z\varphi$	Matriz de coordenadas z dos pontos pe_i e pd_i .
Alfabeto Grego:	
α	Ângulo da triangulação óptica.
β	Ângulo entre planos de luz.
Δh	Ondulação da camada de solda.
γ	Superfície esférica.
δs	Comprimento de arco.
θ	Ângulo de incidência do material de adição no arco elétrico.
$\Theta 1$	Ângulo de inclinação da tocha em relação o sentido de execução dos cordões de solda.
$\Theta 2$	Ângulo de inclinação da tocha em relação a direção perpendicular à execução dos cordões de solda.
λ	Superfície plana.
π	Plano ajustado pelo método dos mínimos quadrados.
$\pi(u,v)$	Plano parametrizado.
$\tau(t), \tau(s)$	Torção de curvas em função dos parâmetros t e s .
φ e $\psi_{u,v}$	Superfícies quádricas.
Φ	Diâmetro do orifício constritor.

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. 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: locais são de difícil acesso e posições de soldagem desfavoráveis, retrabalho, intenso e demorado trabalho de esmerilhamento, consumo excessivo de material de deposição e deterioração progressiva da forma geométrica das pás.

Os ganhos obtidos com uma operação robotizada por soldagem são muitos. No entanto, 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.

Este trabalho está inserido dentro de um projeto de maior envergadura, conhecido como “Roboturb”. Várias frentes de trabalho nas áreas de soldagem, metrologia, robótica e desenvolvimento de *software* estão sendo conduzidas de forma integrada pelos vários grupos, visando desenvolver tecnologia e construir um sistema automatizado capaz de realizar operações robotizadas para recuperar superfícies danificadas por cavitação. Um robô foi desenvolvido e construído, neste projeto, com a finalidade de medir as superfícies danificadas e de efetuar a sua recuperação por 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 Chaves: metrologia, soldagem, robótica, cavitação, turbinas hidráulicas.

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. The repairs are accomplished on site and, most of the time, in a manual way by a team of welders. This kind of operation presents a series of technical and economical problems, such as: difficult access areas and unfavorable welding positions, rework, intensive and time consuming grinding work, large consumption of deposition alloys and progressive deterioration in the geometric shape of the blades.

The benefits obtained by an automated welding operation are many. However the conventional robot manipulators cannot be used for this task because of the limited workspace inside the rotor of a hydraulic turbine.

This work is inserted in a project of larger scope, known as "Roboturb". Several work fronts in the areas of welding, metrology, robotics and software development are being driven by several groups in collaborative way, seeking to develop technology and to build a system capable of accomplishing automated operations to recover surfaces damaged by cavitation. A robot was developed and built, in this project, with the purpose of measuring the damaged surfaces and recover it by making the 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.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A erosão por cavitação, figura 1.1, é basicamente entendida como a perda progressiva de material de uma superfície sólida por consequência do colapso de bolhas de vapor formadas num líquido à pressão e temperaturas críticas. Este fenômeno é encontrado em bombas hidráulicas, tubulações, camisas de motor diesel, cabeças de válvulas, turbinas e parte do sistema hidráulico de geração de energia elétrica, entre outros [6,23,55].



Figura 1.1 – Zona erodida pelo efeito da cavitação na pá de uma turbina Francis [24].

No Brasil as usinas hidroelétricas fornecem aproximadamente 92% da energia elétrica consumida no país. As unidades hidráulicas que compõem as usinas hidroelétricas são geralmente equipamentos de grande porte. Seus rotores (figura 1.2) são constituídos de aço carbono, podendo apresentar mais de 9 m de diâmetro e massa de até 300 t [18].

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 [9].



Figura 1.2 – Rotor de uma turbina Francis de grande porte [54].

O aumento do consumo de energia elétrica no Brasil faz com que algumas turbinas hidráulicas operem fora da faixa nominal garantida pelo fabricante, proporcionando um maior crescimento da taxa de erosão por cavitação nestas unidades [9,18].

No mundo, apesar dos significantes avanços tecnológicos na área de projetos de turbinas hidráulicas, até o presente momento, não se consegue evitar em 100% os casos da erosão provocada pelo fenômeno da cavitação. Se, com um novo projeto fosse possível eliminar totalmente a cavitação, a eventual troca de uma unidade hidráulica já instalada seria inviável do ponto de vista técnico e econômico. Portanto, a erosão por cavitação nas turbinas hidráulicas ainda permanecerá por muitos anos e deve ser mantida sob controle [18,26].

1.1 - Descrição do problema

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 [24,54].

A tabela 1.1 apresenta o resultado de uma pesquisa realizada junto as principais concessionárias sobre a situação da erosão por cavitação de algumas turbinas hidráulicas brasileiras. Os custos com reparos são consideráveis, isso sem levar em consideração a maior consequência, que é a parada da unidade hidráulica por vários dias para recuperação das superfícies erodidas por cavitação [9].

Tabela 1.1 – Situação da erosão por cavitação em turbinas hidráulicas no Brasil [9].

Instalação	Tipo de Turbina	Nº de Unidades com Cavitação	Potência Nominal (MW)	Queda Nominal (m)	Horas de Operação (h)	Quantidade Depositada por Unidade (kg)	Custo do Reparo Por Unidade (R\$)
S. Simão	Francis	6	285,00	72,0	32.000	160	37.440,00
B. Munhoz	Francis	4	359,00	128,0	15.000	450	27.495,00
Três Marias	Kaplan	6	61,00	50,0	40.000	120	27.200,00
Jaguara	Francis	4	116,00	45,0	23.000	207	49.910,00
V. Grande	Kaplan	4	100,00	25,0	30.000	390	99.900,00
S. Grande	Francis	4	27,00	95,0	26.000	54	9.880,00
Emborcação	Francis	4	297,00	128,5	30.000	90	20.100,00
Camargos	Kaplan	2	22,00	22,0	30.000	60	12.600,00
Itutinga	Kaplan	4	12,00	25,0	32.000	64	12.480,00
N. Ponte	Francis	3	173,00	96,0	16.000	48	12.480,00
L.C.V. Carv.	Francis	6	170,00	60,8	35.000	875	52.150,00
P. Colombia	Francis	4	80,00	20,0	35.000	70	5.950,00
Marimbondo	Francis	8	186,00	60,3	35.000	70	6.650,00
Itumbiara	Francis	6	354,00	80,0	21.000	1.071	60.060,00
I. Solteira	Francis	20	161,50	46,0	20.000	440	70.600,00
Jupiá	Kaplan	14	100,80	25,4	20.000	1.300	119.400,00
Três Irmãos	Francis	6	54,00	45,8	20.000	1.000	100.000,00
N. Avahan.	Kaplan	3	34,00	29,7	20.000	100	30.000,00
Promissão	Kaplan	3	88,00	27,4	20.000	100	30.000,00
S. Santiago	Francis	4	355,00	106,0	18.000	198	54.000,00
S. Osório A	Francis	4	182,00	70,0	22.287	178	20.058,00
S. Osório B	Francis	2	175,00	70,0	23.601	94	21.241,00

1.2 – Estado da arte

Os reparos das superfícies erodidas por cavitação são realizados no local e, na maioria das vezes, de forma manual por uma equipe de soldadores. Os problemas técnicos e econômicos advindos deste tipo de operação de deposição são:

- O trabalho é insalubre;
- Os locais são de difícil acesso e posições de soldagem desfavoráveis, como mostra a figura 1.3;
- A qualidade do reparo depende fortemente da habilidade do soldador;
- Intenso e demorado trabalho de esmerilhamento após a tarefa de soldagem para obter uma superfície com grau de acabamento adequado;
- Trabalho adicional relativo à correção de defeitos de porosidade na superfície recuperada;
- Envolve um consumo maior de material de deposição;
- Deterioração progressiva da forma geométrica original das pás da turbina após sucessivas intervenções de recuperação manual.



Figura 1.3 – Soldadores entre as pás da turbina [24].

A soldagem robotizada seria a alternativa natural. 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. Existem, também no mercado mundial, alguns módulos motorizados para soldagem, mas são muito limitados em relação ao posicionamento e orientação da tocha de soldagem.

O IREQ (Institut de recherche d'Hydro-Québec) desenvolveu um robô, a que denominou de Scompi, especialmente projetado para a tarefa de recuperação de regiões danificadas por cavitação, em turbinas hidráulicas. Até onde se tem notícia, é o único robô desta natureza existente. A companhia canadense não vende este sistema, apenas o aluga por um valor que não compensa economicamente, se comparado com o processo de recuperação manual [18,63].

Neste robô, figura 1.4, que se desloca sobre trilhos e opera em um reduzido espaço de trabalho, existem três efetadores que são usados de forma sequencial durante as tarefas de recuperação de superfícies erodidas por cavitação [54].

O primeiro efetador é um apalpador rígido, responsável pela medição da superfície danificada. Essa tarefa requer uma prévia marcação dos pontos a serem adquiridos sobre a superfície danificada e muita habilidade do operador em conduzir o efetador por meio do dispositivo de aprendizagem *teach pendant*.

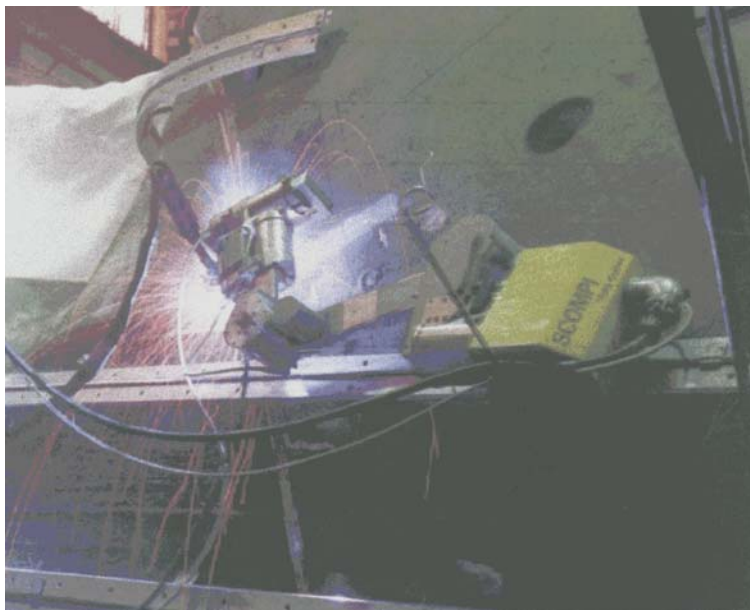


Figura 1.4 - Operação de deposição robotizada por soldagem [63].

O segundo efetuador é uma tocha de soldagem que possui a função de depositar material através do processo MIG/MAG convencional ou pulsado. A figura 1.5 mostra um depósito realizado pelo robô Scompi, que apesar de ser considerado de boa qualidade, é possível perceber defeitos de soldagem nas extremidades dos cordões de solda e também no seu interior. Cabe ressaltar, que estes defeitos, segundo o IREQ, são sanados após cada camada de soldagem depositada através da intervenção manual de um soldador.



Figura 1.5 – Depósito realizado com o robô Scompi [54].

O terceiro e último efetuador é uma esmerilhadeira, pneumática ou elétrica, responsável pelo acabamento final da superfície recuperada através da retirada do excesso de material depositado.

A operação de deposição robotizada por soldagem, como mostra a figura 1.4, apresenta uma série de vantagens em relação ao processo manual [7,25,31,47,65], tais como:

- Melhor uniformidade e qualidade da soldagem nas regiões recuperadas;
- Redução significativa dos defeitos de soldagem;
- Redução da quantidade de material consumido para o reparo;
- Diminuição do tempo consumido de recuperação;
- Redução do custo total na recuperação de turbinas hidráulicas;
- Redução do tempo de permanência de pessoas em local insalubre;
- Melhor controle da geometria das pás da turbina.

1.3 – Objetivos e contribuições

No projeto Roboturb atuam, de forma cooperativa, pesquisadores do LACTEC e de cinco laboratórios da UFSC. Várias frentes de trabalho estão sendo conduzidas de forma integrada pelos vários grupos visando desenvolver tecnologia e construir um sistema capaz de realizar operações automatizadas para recuperar superfícies danificadas por cavitação, operando no pequeno espaço entre pás adjacentes dos rotores de turbinas hidráulicas de grande porte.

Neste projeto, um robô foi projetado e construído numa parceria entre a UFSC, LACTEC, COPEL e, mais recentemente, FURNAS. Este robô, como mostra a figura 1.6, 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.

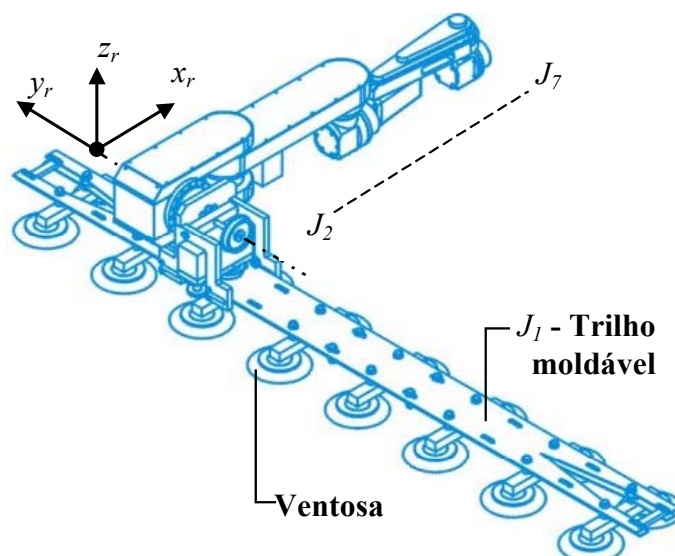


Figura 1.6 – Estrutura cinemática do robô desenvolvido no projeto Roboturb.

Este robô possui dois efetadores que são usados alternadamente durante as tarefas de recuperação de superfícies erodidas por cavitação. O primeiro efetador é o sensor óptico de três linhas responsável pela medição da superfície danificada e, posteriormente, da superfície recuperada. O segundo efetador é uma tocha plasma com alimentação automática de arame, responsável pela deposição de material por soldagem.

Os efetadores, sensor óptico e a tocha plasma, são representados por seus respectivos sistemas de coordenadas: $0_s-x_s y_s z_s$ e $0_t-x_t y_t z_t$. Assim, a posição e a orientação do sistema de coordenadas de cada efetador, em relação ao sistema de coordenadas de referência fixo do robô, $0_r-x_r y_r z_r$, são determinados através dos ângulos de rotação das seis últimas juntas, mais a relação de deslocamento e rotação da primeira junta.

O presente trabalho está totalmente inserido dentro do projeto Roboturb. Reúne as tecnologias e esforços desenvolvidos nas áreas de soldagem, metrologia, robótica e desenvolvimento de *software* em torno de três objetivos principais:

- i) Desenvolver metodologia automatizada para medir e descrever matematicamente a superfície erodida por cavitação usando um sensor de folha de luz com três linhas, acoplado ao robô;
- ii) Desenvolver estratégia robotizada para recuperação da superfície danificada da pá da turbina hidráulica, por deposição por soldagem a plasma, com alimentação automática de arame;
- iii) Avaliar experimentalmente as metodologias desenvolvidas.

Os procedimentos automatizados de medição e de deposição por soldagem em superfícies danificadas por cavitação, que estão desenvolvidos no âmbito deste trabalho, são inovadores. Na literatura pesquisada, até o momento de produção deste texto, não se encontrou nenhum registro que tenham sido usadas em conjunto na recuperação de peças e especialmente rotores de turbinas hidráulicas. Fato que garante o caráter inédito desta pesquisa.

As metodologias e os algoritmos desenvolvidos neste trabalho são as principais inovações e contribuições técnico-científicas. Mais especificamente:

- Medição automatizada da superfície afetada pela cavitação com o próprio robô através de um sensor de folha de luz com três linhas integrado ao mesmo;
- Estimativa da reconstrução, por interpolação, da superfície original com base nas características da região não danificada que circunda o local danificado;
- Determinação da localização inicial dos cordões de solda, do número de camadas e os limites de cada cordão de solda;

- Determinação dos parâmetros de soldagem e da trajetória da tocha de solda, bem como a sua orientação durante a operação de preenchimento da cavidade;
- Medição automatizada da superfície soldada com o próprio robô integrado a um sensor de folha de luz com três linhas para realizar a qualificação geométrica do reparo.

Levando em consideração a atual crise do setor energético brasileiro, aliado a poucos investimentos destinados à construção de novas usinas geradoras, este trabalho, no contexto do projeto Roboturb, irá contribuir no sentido de aumentar a disponibilidade do sistema elétrico do país. Esta contribuição, nas turbinas hidráulicas de grande porte, será proporcionada através da redução do tempo de recuperação das regiões danificadas por cavitação.

Em comparação com as características funcionais do robô canadense Scompi, as metodologias e os algoritmos gerados neste trabalho irão proporcionar no Roboturb as seguintes inovações tecnológicas:

- Operação automatizada e rápida para aquisição da geometria da região danificada através do uso de um sensor óptico a laser de três linhas;
- Operação automatizada de soldagem, com redução significativa de defeitos de soldagem e ausência de respingos e salpicos, através do processo de soldagem a plasma com alimentação automática de arame.

1.4 – Estrutura do texto

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho está estruturado em seis capítulos sendo o primeiro capítulo, a própria introdução.

No segundo capítulo, aborda-se as tecnologias empregadas para representação de superfícies livres, enfatizando o sistema de medição empregado, através de uma descrição de seu princípio de funcionamento e de seus principais parâmetros. Nesse capítulo são também avaliados os processos de soldagem destinados ao recobrimento de superfícies, destacando o processo de soldagem à plasma e suas vantagens em relação a outros processos de soldagem.

A seguir, no terceiro capítulo, são apresentados as adequações necessárias ao processo de soldagem a plasma com alimentação automática de arame para se obter depósitos de excelente qualidade.

O quarto capítulo descreve a metodologia proposta para recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação e as etapas necessárias para obtenção dos parâmetros das trajetórias de medição e de soldagem. Uma compreensão sobre a teoria de curvas e superfícies é fundamental para o entendimento deste capítulo, o que está condensado no anexo A.

A descrição da bancada de ensaios utilizada e as características do corpo de prova empregado são apresentadas no quinto capítulo, bem como os resultados práticos obtidos e a discussão destes resultados.

Por fim, no sexto capítulo, encontra-se a conclusão desta pesquisa e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros derivados deste.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Representação de superfícies livres

No processo de recuperação as superfícies afetadas por cavitação são inicialmente localizadas e preparadas. Esta preparação é manual, por goivagem a arco elétrico, e consiste na remoção dos poros decorrentes do fenômeno da cavitação com o objetivo de deixar a superfície da cavidade lisa e o mais suave possível.

A superfície resultante deste processo, chamada também de região danificada, é uma superfície livre circundada por trechos de superfícies não danificadas e, não pode ser representada por equações matemáticas na forma implícita ou explícita, sendo normalmente de difícil descrição analítica [30].

As técnicas geométricas parametrizadas, como Bezier, Spline, β -Spline e Coons, são as soluções mais adequadas para a modelagem de superfícies livres. Neste caso, informações importantes como os vetores tangentes, o vetor normal e as curvaturas, em qualquer local da superfície, podem ser facilmente obtidas [27,49].

Na modelagem de superfícies compostas, a técnica β -Spline supera as técnicas de Bezier e Spline em dois principais aspectos: a superfície do tipo β -Spline passa por todos os pontos fornecidos e permite ainda o controle local, ou seja, a mudança das coordenadas de um dos pontos fornecidos, altera, de forma parcial, a descrição analítica da superfície. Já a técnica de Coons é usada somente para construir uma superfície simples a partir das informações, pontos e derivadas nestes pontos, de um contorno fechado [69].

Levando em consideração as características citadas acima, optou-se neste trabalho em utilizar a técnica de Coons para estimar, por interpolação, os pontos centrais da superfície original através de dados extraídos da região não danificada que circunda o local danificado e a técnica de modelagem β -Spline para descrever analiticamente as seguintes superfícies compostas: danificada, original reconstruída e a recuperada.

2.2 – Dispositivos de medição aplicáveis

Existem diversos tipos de dispositivos possíveis de serem integrados como efetuator a um robô articulado e aplicáveis em medições de superfícies danificadas de turbinas hidráulicas. Estes dispositivos de medição, que diferem pela incerteza de medição e desempenho, podem ser classificados em dois grupos principais caracterizados em função da maneira que os mesmos acessam a superfície a ser medida: com ou sem contato [41].

Os dispositivos de medição que operam por contato: apalpadores sólidos, apalpadores analógicos e apalpadores comutadores, embora sejam os mais empregados, requerem atenção muito especial do operador do robô no que diz respeito a danos causados aos mesmos por eventuais colisões. A principal desvantagem deste grupo de dispositivos é a baixa velocidade do processo de aquisição dos pontos de uma superfície livre.

Os dispositivos de medição mais usados, que operam sem contatos, utilizam técnicas ópticas de medição, tais como: triangulação, autofocus, reflexão da imagem, ou na combinação dessas. A utilização destas técnicas ópticas é cada vez mais freqüente pois permite um aumento considerável da velocidade de medição se comparada à velocidade dos dispositivos de medição com contato [22].

Das técnicas citadas acima, a triangulação óptica é uma das técnicas mais comumente aplicadas em medições tridimensionais. Sua aplicação tem sido cada vez mais ampliada devido ao aumento da velocidade de medição e exatidão nos resultados proporcionado pelo desenvolvimento de seus componentes e de *softwares* dedicados [14,36].

Com base nestes fatos, optou-se em utilizar, como dispositivo de medição, um sensor óptico a laser tipo “folha de luz” com três linhas, que opera segundo o princípio da triangulação. Este sensor foi desenvolvido inicialmente por Nerosky [42] e aprimorado por Hrebabetzky [21] no contexto do projeto Roboturb.

Uma descrição resumida do sensor óptico a laser tipo “folha de luz” e suas variações é apresentada a seguir.

2.3 – Sensor óptico a laser

O sensor óptico a laser funciona segundo o princípio da triangulação óptica, como mostra a figura 2.1 [19,29,51,56].

O feixe laser é focado no ponto A sobre a superfície do objeto. Através de uma lente receptora, a imagem deste ponto, representada pelo ponto B , é formada sobre a superfície do detector. A mudança da distância do objeto de dA para dA' resulta em um deslocamento do ponto B para B' .

Da figura 2.1 podem ser retiradas as seguintes equações:

$$x = \overline{BB'} + b \cdot \text{sen}\alpha \quad (2.1)$$

$$y = b \cdot \text{cos}\alpha \quad (2.2)$$

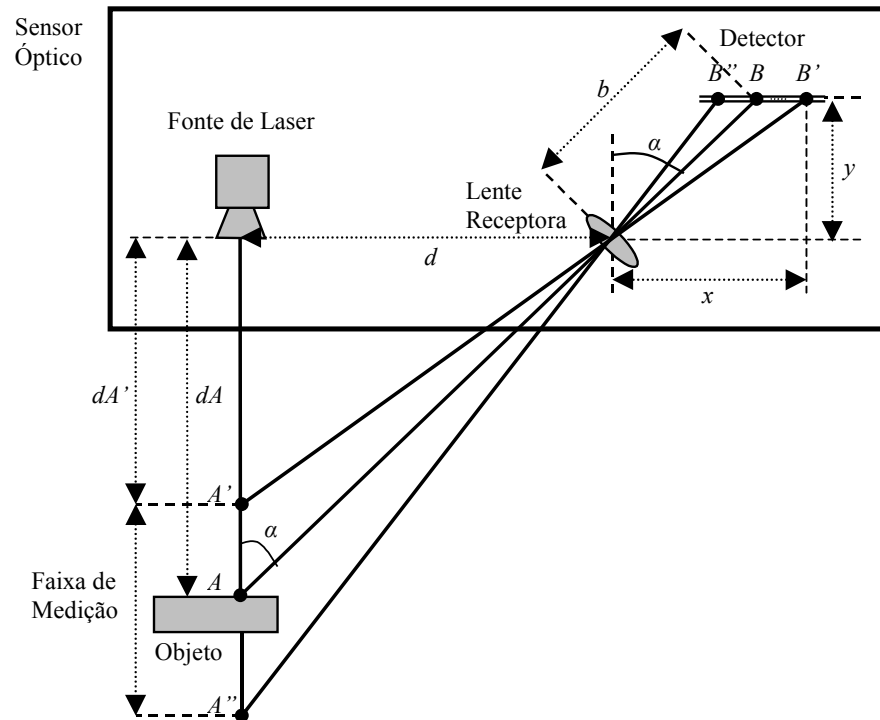


Figura 2.1 - Técnica da triangulação óptica com um feixe laser.

Através das propriedades da semelhança entre triângulos, tem-se:

$$\frac{dA'}{d} = \frac{y}{x} \quad (2.3)$$

Substituindo as equações 2.1 e 2.2 em 2.3, obtém-se a seguinte relação geométrica:

$$dA' = \frac{b \cdot d \cdot \text{cos}\alpha}{\overline{BB'} + b \cdot \text{sen}\alpha} \quad (2.4)$$

Onde:

dA' : distância do ponto pertencente ao objeto em relação a fonte luminosa (mm);

b : distância entre a lente receptora e o elemento fotosensível do detector (mm);

d : distância entre a lente de projeção do laser e a lente receptora (mm);

$\overline{BB'}$: deslocamento do ponto visualizado no elemento fotosensível do detector (mm);
 α : ângulo de triangulação ($^{\circ}$).

A distância de um ponto pertencente à superfície do objeto em relação à fonte luminosa, dA' , depende do valor do deslocamento $\overline{BB'}$ obtido no detector e das constantes b , d e α definidas no projeto do sensor. Cabe ressaltar, que para determinar o valor da distância dA' é necessário que o objeto esteja localizado dentro da faixa de medição, conforme mostra a figura 2.1.

Este sensor pode ter variações em relação aos seguintes aspectos [14]:

- Forma de iluminação aplicada ao objeto: pontual, em linha (no caso do sensor “folha de luz”), linhas paralelas, linhas perpendiculares e outras;
- Sistema de captação da imagem: matriz linear ou com matriz bidimensional (sensores tipo CCD, CMOS ou CID);
- Quanto à movimentação: é possível deslocar o objeto em relação ao sensor ou o sensor em relação ao objeto para executar a varredura de superfícies.

2.3.1 – Sensor óptico de uma linha

O funcionamento básico do sensor óptico tipo “folha de luz”, figura 2.2, envolve a projeção de um plano de luz na superfície a ser medida [12,60]. A linha de interseção entre o plano de luz e a superfície é capturada por uma câmara CCD situada a uma distância e inclinação conhecidas em relação ao plano de luz, conforme a técnica óptica da triangulação.

Na figura 2.2, a origem do sistema de coordenadas do sensor, $0_s-x_s y_s z_s$, está localizada na interseção no plano 3, meio da faixa de medição, com a reta r central e pertencente ao plano de luz projetado. Os eixos x_s e y_s deste sistema de coordenadas pertencem ao plano 3, enquanto que os eixos y_s e z_s pertencem ao plano de luz projetado.

A distância entre o início da abertura do feixe luminoso, plano 1, e a metade da faixa de medição, plano 3, é conhecida como *stand-off*. Quanto a largura de medição lm , duas especificações são importantes:

- Largura de medição mínima: é determinada no início da faixa de medição, ou seja, no plano 2;
- Largura de medição máxima: é determinada no término da faixa de medição, isto é, no plano 4.

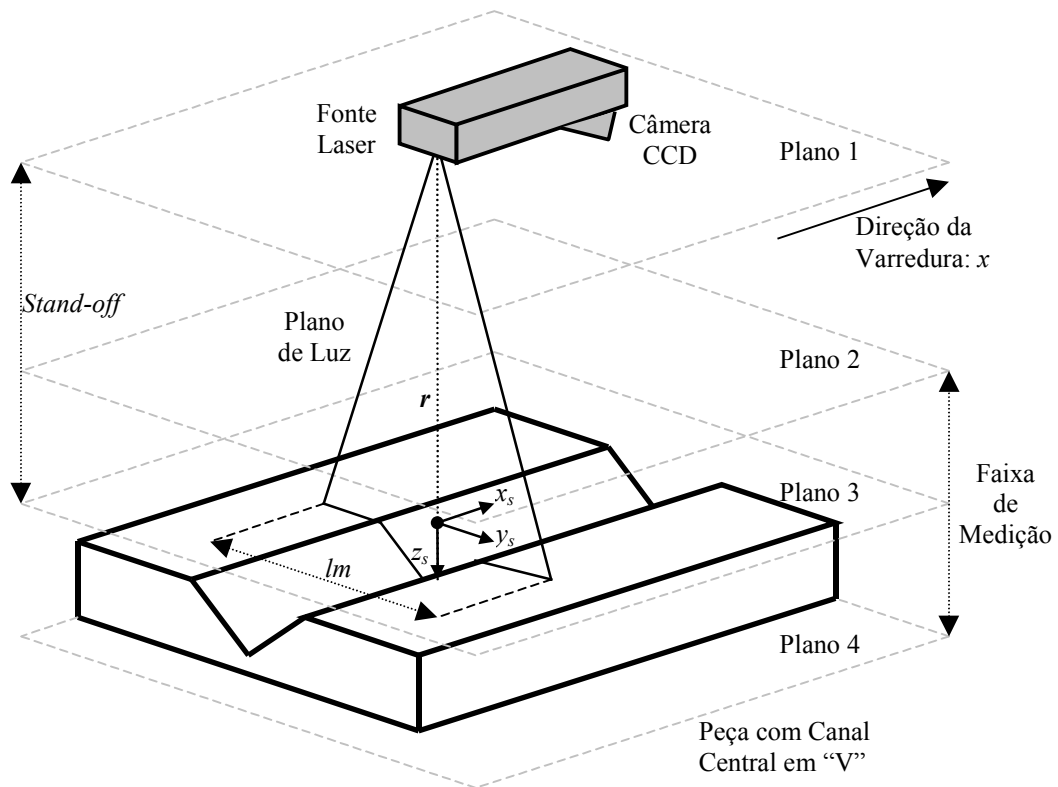


Figura 2.2 - Parâmetros característicos de um sensor óptico tipo “folha de luz” [8].

Outros parâmetros característicos, de um sensor óptico tipo “folha de luz”, devem ser considerados [42]:

- Resolução na direção y_s : é a resolução do sensor na medição da coordenada y_s dos pontos da superfície do mesurando, ao longo da linha luminosa, figura 2.3;
- Resolução da direção z_s : é a resolução do sensor na medição da coordenada z_s dos pontos da superfície do mesurando, como mostra a figura 2.3;
- Taxa de varredura: é a máxima frequência com que o sensor consegue processar de forma correta a imagem;
- Comprimento de onda do laser: dependendo da fonte de laser utilizada pode-se ter comprimento de onda que tornam a luz visível ou invisível a olho nu;
- Incerteza da medição: é o parâmetro associado ao resultado da medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos razoavelmente ao mensurando. Neste caso, incertezas de medição distintas podem ser atribuídas às coordenadas y_s e z_s da superfície;
- Linearidade: será elevada se a relação existente entre o deslocamento na direção z_s do mensurando e o correspondente deslocamento na imagem da câmera puder ser descrita por uma reta.

Observe que o sensor do tipo “folha de luz” fornece apenas informações nas direções dos eixos y_s e z_s , conforme mostra a figura 2.3. Já as coordenadas na direção perpendicular ao plano de luz projetado, eixo x_s , não são obtidas diretamente por este sensor.

Portanto, para se obter os pontos de toda a superfície do objeto é necessário realizar uma movimentação relativa de varredura entre o sensor e o objeto. Neste caso, o valor da coordenada x_s será determinado através de um sistema de deslocamento externo que execute o movimento nesta direção.

Neste trabalho, o robô irá executar o movimento do sensor óptico na direção de varredura, enquanto que, o objeto permanecerá imóvel. As coordenadas dos pontos da superfície do objeto serão obtidas, em relação ao sistema de coordenadas do robô, através de uma transformação, envolvendo rotação e translação do sistema de coordenadas do sensor para o sistema de coordenadas do robô.

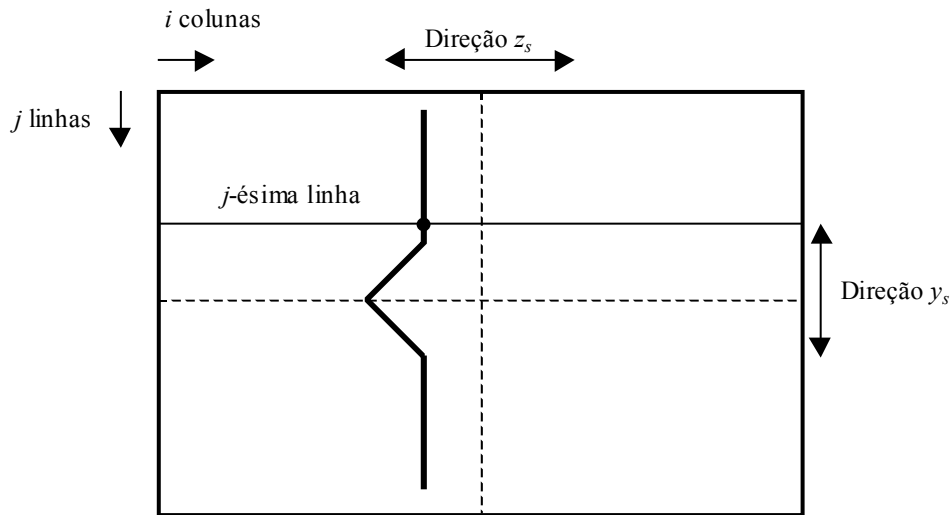


Figura 2.3 – Imagem obtida pelo sensor óptico tipo “folha de luz” ao medir a superfície representada na figura 2.2.

A figura 2.4 mostra a distribuição de intensidade luminosa sobre a j -ésima linha da câmera CCD indicada na figura 2.3. A posição do pico de intensidade luminosa, sobre os *pixels* desta linha, é assumida como a posição do centro de energia, calculada através da equação do centróide [29]:

$$C_j = \frac{\sum_{i=a}^{a'} (I_{ij} \cdot i)}{\sum_{i=a}^{a'} I_{ij}} \quad (2.5)$$

Onde:

C_j : posição do centro do pico de intensidade luminosa da j -ésima linha;

I_{ij} : intensidade luminosa do i -ésimo pixel da j -ésima linha.

Desta forma, a posição do feixe luminoso para cada linha da câmera CCD em termos de pixels é dada pelo par (C_j, j) . Através das relações matemáticas do sensor, o par (C_j, j) de cada linha da imagem é transformado em valor de coordenadas, nas direções z_s e y_s , em relação ao sistema de coordenadas do sensor [42].

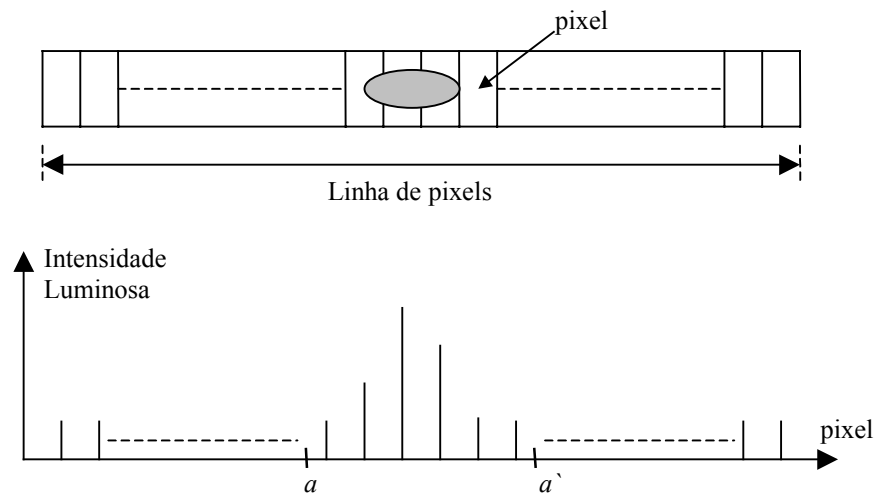


Figura 2.4 - Distribuição de intensidade luminosa sobre a j -ésima linha da câmera CCD.

2.3.2 – Sensor óptico multi-linha

A descrição matemática de uma superfície livre torna-se mais fácil, rápida e precisa se mais informações forem conhecidas. Um sensor óptico a laser de três linhas é utilizado, neste trabalho, com o objetivo de realizar a medição da superfície de forma mais rápida. Além de aumentar a quantidade de pontos medidos por posicionamento do sensor, as informações medidas permitem determinar os raios de curvaturas locais da região medida e a orientação dos vetores tangentes e do vetor normal [21,34].

A figura 2.5 mostra a estrutura básica deste sensor com seus principais parâmetros e a figura 2.6 exhibe a imagem obtida por este sensor na medição de uma peça com canal central em “V”, similar à figura 2.2.

No projeto Roboturb, os valores dos principais parâmetros do sensor óptico de três linhas, tabela 2.1, foram definidos em função das características dos locais confinados como o espaço existente entre duas pás adjacentes de um rotor de uma turbina hidráulica de grande porte.

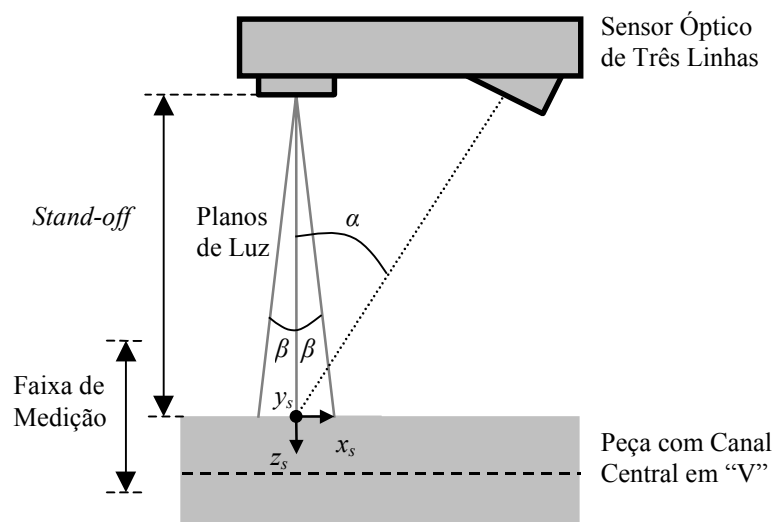


Figura 2.5 - Estrutura básica do sensor óptico de três linhas.

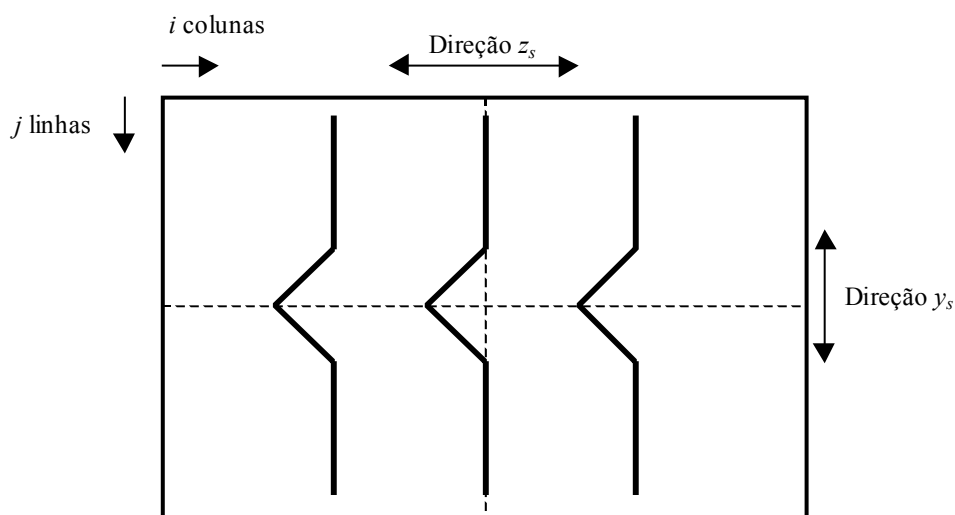


Figura 2.6 – Imagem obtida pelo sensor óptico de três linhas ao medir a superfície representada na figura 2.5.

Tabela 2.1 - Valores dos principais parâmetros do sensor óptico de três linhas.

Principais Parâmetros Técnicos	Valor
<i>Stand-off</i>	155 mm
Faixa de Medição	50 mm
Ângulo de inclinação α	30 °
Ângulo entre planos de luz β	4,8 °
Incerteza na direção y_s	0,2 mm
Incerteza na direção z_s	0,2 mm
Resolução da imagem da câmera CCD	768x572 pixels

2.4 – Processos de soldagem aplicáveis

Idealmente um processo de soldagem para ser empregado com sucesso na recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação em turbinas hidráulicas deve possuir as seguintes características:

- Depositar camadas isentas de defeitos de soldagem;
- Possibilidade de aplicar o processo com elevada taxa de deposição e em todas as posições de soldagem;
- Ausência de respingos e salpicos na formação de depósitos, o que evita, que danos ocorram nos equipamentos automatizados;
- Fácil abertura do arco elétrico;
- Produzir camadas de solda com excelente acabamento superficial.

Atualmente os processos de soldagem aplicáveis que mais se aproximam destas características ideais são o MIG e o Plasma com alimentação automática de arame.

O processo MIG, convencional ou pulsado, utiliza eletrodo consumível e apresenta maiores níveis de taxa de deposição e de velocidade de soldagem. Entretanto, a possibilidade concentração de defeitos no início dos cordões de solda e a significativa quantidade de respingos e salpicos, são as desvantagens deste processo [67,71].

O processo plasma com alimentação automática de arame, em comparação ao processo MIG, possui níveis inferiores de taxa de deposição e de velocidade de soldagem. Porém, a excelente qualidade geométrica e superficial dos depósitos e a redução significativa dos defeitos de soldagem, aliada a ausência de respingos e salpicos, justificam o seu emprego neste trabalho [1,17].

Além disso, o processo de soldagem a plasma possui outras qualidades que justificam, ainda mais, a sua aplicação, tais como:

- Arco elétrico é bastante estável [67];
- O cordão de solda é pouco afetado por variações da distância, dentro de certos limites, entre a tocha de soldagem e a peça [68];
- Possibilidade de realizar deposições com ou sem contato do arame com a poça de fusão;
- O processo plasma pode ser usado, tanto na deposição de material, quanto no tratamento superficial, simplificando e tornando mais rápido o processo de recuperação de superfícies. Atualmente, o tratamento superficial de refusão dos reparos é realizada através de processo TIG para melhorar sua condição superficial e facilitar as operações de esmerilhamento na correção do perfil da pá.

O processo plasma com alimentação automática de arame foi estudado, por Oliveira [43], visando sua utilização em revestimentos metálicos e, neste trabalho, foi adaptado ao projeto Roboturb. As adequações implementadas e os experimentos realizados em laboratório com o objetivo investigar a robustez deste processo, são apresentadas no próximo capítulo.

Outros processos de soldagem, como o plasma com alimentação de pó [15] e o Plasma-MIG [44], apresentam potencial de serem empregados mas, ainda encontram-se em fase inicial de estudos e ensaios de deposição.

2.5 – Descrição do processo plasma

O processo plasma, conforme mostra a figura 2.7, é basicamente uma extensão do processo TIG. Neste processo o arco elétrico transferido para a peça está restringido por um bocal constritor de cobre refrigerado a água. O orifício deste bocal limita o diâmetro do jato de plasma e aumenta a densidade de energia do arco elétrico [67].

A distância entre a tocha e a peça (d_{tp}) é de aproximadamente de 5 mm. Entretanto, esta distância pode variar de 3 a 7 mm, sem mudanças significativas nas características do arco elétrico. A utilização de uma d_{tp} muito reduzida pode inutilizar o bocal constritor através do contato deste com a superfície da poça fundida. Por outro lado, o aumento excessivo da d_{tp} resulta na perda das características do arco, que se torna cônico [37].

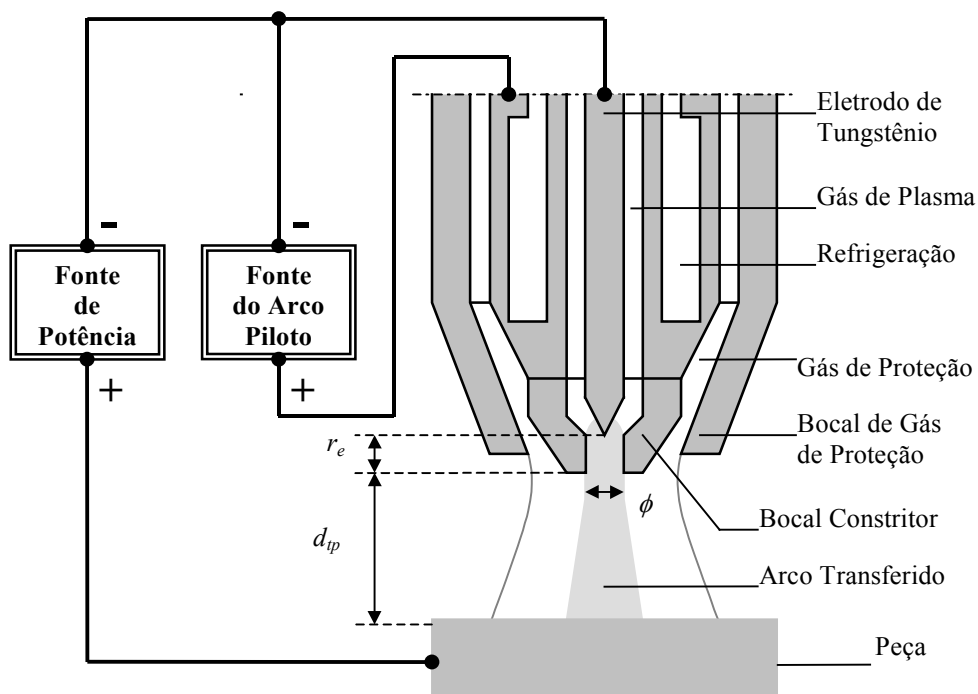


Figura 2.7 - Representação esquemática do processo plasma.

Combinações entre valores do diâmetro do orifício constritor ϕ e de recuo do eletrodo r_e estabelecem o grau de constrição do arco. Menor diâmetro do orifício constritor e maior recuo do eletrodo resulta em um maior grau de constrição, provocando um arco mais concentrado. Isto implica numa menor relação largura/penetração do cordão de solda. Por outro lado, um diâmetro maior do orifício constritor e um menor recuo do eletrodo resulta em um arco de menor densidade de energia e, desta forma, um aumento na relação largura/penetração do cordão de solda [45].

No processo plasma são empregados dois fluxos, que podem ser de gases iguais, ou diferentes. O primeiro é conhecido como gás de plasma, normalmente argônio, circunda o eletrodo de tungstênio, saindo através do orifício do bocal constritor na forma de um jato. Este gás deve ser inerte para não causar a deterioração do eletrodo. Já o gás de proteção, inerte ou uma mistura de gases, passa através do bocal externo. É utilizado para proteger a solda da contaminação atmosférica. Sua composição depende do material a ser soldado [1].

Um ignitor eletrônico é a forma mais usual de abertura do arco plasma. Com o acionamento da fonte do arco piloto este ignitor fornece picos de tensão entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor, gerando um pequeno faiscamento nesta região. Assim, com a passagem do gás de plasma surge um arco elétrico de baixa intensidade entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor, chamado de arco piloto. Por sua vez, o arco piloto forma um caminho de baixa resistência elétrica entre o eletrodo de tungstênio e a peça a ser soldada facilitando o estabelecimento do arco principal quando a fonte de potência for acionada [67].

Existem duas técnicas, bastante diferentes, para soldar peças através do processo plasma: *keyhole* e *melt-in*. Na técnica de soldagem *keyhole* [16,46,70], com uma combinação precisa dos parâmetros de soldagem, o jato plasma fura o metal base formando uma pequena poça de fusão ao seu redor. Neste caso, com a movimentação da tocha de soldagem, o metal fundido pelo arco elétrico é forçado a fluir ao redor do jato plasma no sentido da solidificação da poça de fusão. Na técnica de soldagem *melt-in* [17], tal como é realizada no processo TIG, e aplicada neste trabalho, o calor do arco elétrico transferido é utilizado para fundir o metal base da peça e o metal de adição quando necessário.

2.6 – Processo plasma com alimentação automática de arame

Na soldagem TIG e a plasma pode-se aumentar a produção através da alimentação automática de arame bobinado [38]. Um cabeçote tracionador movimenta o arame com velocidade controlada e de forma contínua até o centro da coluna plasma, conforme mostra a figura 2.8.

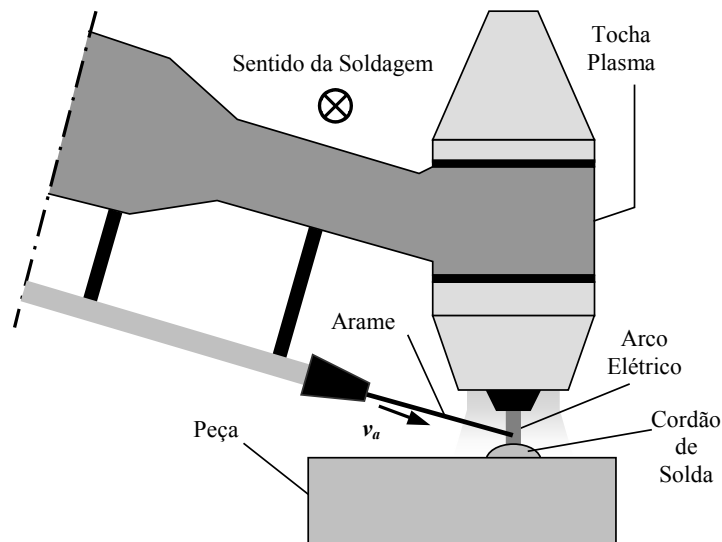


Figura 2.8 - Processo plasma com o direcionador de arame.

Existem dois tipos distintos de alimentação de arame utilizados nos processo plasma e TIG, conhecidos como: arame pré-aquecido ou *hot wire* e arame frio ou *cold wire* [67]. Na alimentação *hot wire* o arame é aquecido por efeito Joule por meio de uma segunda fonte de alimentação controlada e normalmente conectada entre o terminal de cobre do conduíte de arame e a peça. Neste caso, a taxa de deposição é maior que na alimentação *cold wire*, entretanto, a complexidade e o aumento do custo, relativo a adição de mais um equipamento, deve ser levado em consideração. Já na alimentação automática, *cold wire*, a qual é usada neste trabalho, o arame de adição é alimentado à temperatura ambiente, tendo sua velocidade de alimentação basicamente relacionada com a intensidade da corrente elétrica do arco voltaico.

A figura 2.9 mostra que para um determinado nível de corrente elétrica i , existe uma estreita faixa de operação onde se pode variar a velocidade de alimentação do arame v_a [38]. O limite inferior desta faixa, isto é, mínima velocidade do arame $v_{a_{min}}$, ocorre quando a ponta do arame se encontra no início da coluna do arco voltaico, enquanto que o limite superior, ou seja, máxima velocidade do arame $v_{a_{máx}}$, é delimitado quando a ponta sólida do arame só se funde quando começa a atingir o lado oposto da coluna do arco.

Quando a velocidade de alimentação do arame assume valores menores que o limite inferior da faixa ótima, pequenas gotas são formadas e repelidas antes que o arame penetre na coluna do arco. Neste caso, a formação do cordão de solda ocorre de maneira descontínua e marcada pelo excesso de respingos. Por outro lado, quando se aumenta a velocidade de alimentação além do limite superior, o arame irá ultrapassar toda a extensão do arco elétrico sem se fundir.

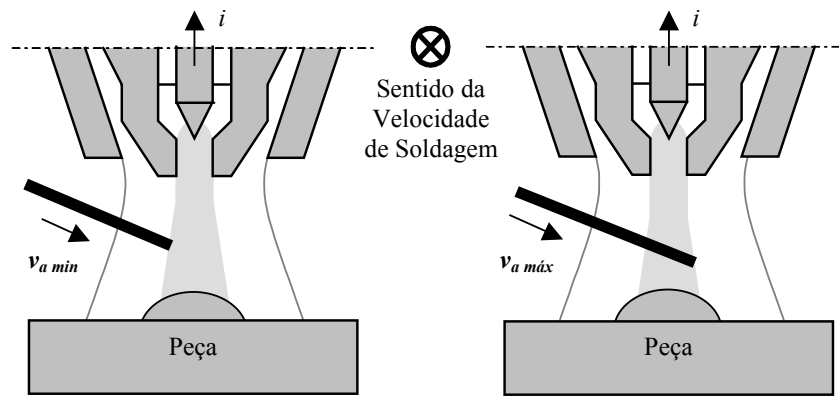


Figura 2.9 - Limites da velocidade de alimentação do arame.

Na região de velocidade otimizada, a transferência metálica ocorre através de pequenas gotas que se destacam do arame dentro dos limites do arco voltaico. Estas gotas são direcionadas à poça de fusão de forma alinhada. Este modo de transferência metálica é denominado de transferência goticular axial.

Dependendo do material usado como arame de adição, e acima de determinado nível de corrente elétrica, ocorre a intensificação do fluxo das pequenas gotas até o ponto de formar um filamento de metal líquido entre a ponta sólida do arame e a poça de fusão. Este modo de transferência metálica ocorre dentro do arco voltaico, sendo denominada de transferência filamentar [43].

Em ambas as transferências metálicas, goticular axial e filamentar, o cordão de solda apresenta excelente aspecto visual e isenção total de respingos. Estes modos de transferências se caracterizam por uma excelente estabilidade e os cordões obtidos apresentam boa regularidade e excelente qualidade. Porém, nas posições de soldagem sobrecabeça a estabilidade destes modos de transferência fica completamente prejudicada em função de pequenas variações na distância tocha peça.

Outra importante vantagem do processo plasma com alimentação automática de arame, é a característica estável e praticamente linear entre tensão elétrica do arco V_a e a distância tocha-peça dtp , conforme mostra a figura 2.10 [13,37].

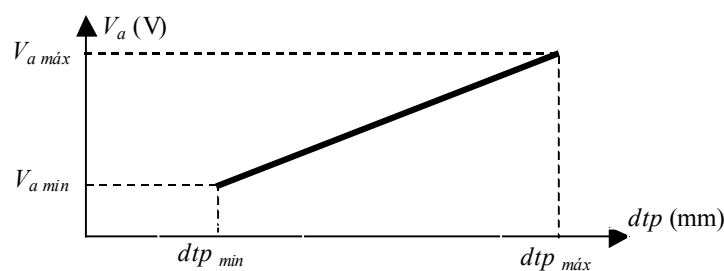


Figura 2.10 - Relação esquemática entre tensão do arco e distância tocha-peça.

A técnica do arco pulsado [3,10,11,45], como mostram os gráficos da figura 2.11, consiste basicamente em estabelecer dois níveis, tanto para a corrente elétrica i , quanto para a velocidade do arame v_a , durante o tempo de soldagem. Esta técnica proporciona uma maior sustentabilidade da poça metálica nas posições desfavoráveis, uma vez que, a diminuição da energia térmica durante o tempo de base t_b , favorece a diminuição da fluidez da poça metálica.

A razão cíclica é definida como sendo a relação entre o tempo de pulso t_p e o período T [59], ou seja:

$$Rc = \frac{t_p}{T} = \frac{t_p}{t_p + t_b} \quad (2.6)$$

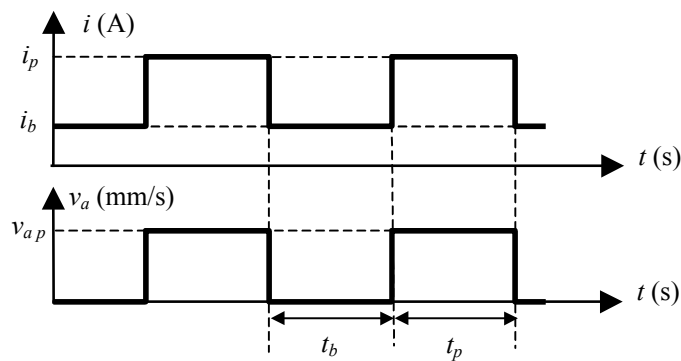


Figura 2.11 – Técnica do arco elétrico pulsado.

2.7 – Síntese deste capítulo

A medição dos pontos das superfícies danificadas por cavitação é apenas a primeira etapa no processo de modelagem de uma superfície livre, porém, necessária e extremamente importante.

Com um sensor óptico a laser de três linhas a aquisição dos pontos de uma superfície danificada por cavitação fica mais rápida e a sua descrição analítica torna-se mais fácil.

A técnica geométrica parametrizada β -Spline apresenta algumas vantagens na modelagem de uma superfície livre em relação a outras técnicas existentes enquanto que a técnica de Coons é mais apropriada para interpolar pontos a partir das informações do contorno de uma superfície livre.

A principal vantagem da soldagem através do processo plasma com alimentação automática de arame é a estabilidade direcional e focal do arco elétrico. Este não sofre mudanças expressivas de suas características quando ocorrem variações da distância, dentro de certos limites, entre a tocha de soldagem e a peça a ser soldada. Este fato possibilita que estas variações do comprimento do arco elétrico não afetem significativamente sua capacidade de fundir o metal de base e o material de adição.

CAPÍTULO 3

ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Optou-se em utilizar a tocha plasma de soldagem manual modelo PWH-4A (70°) por possuir: (a) características geométricas compatíveis com a tarefa de recuperação de superfícies danificadas em pás de turbinas hidráulicas e (b) características elétricas adequadas com a fonte de soldagem microprocessada designada para o projeto Roboturb. Esta tocha de soldagem (figura 3.1) foi também utilizada por Oliveira [43] que, no âmbito de seu trabalho, desenvolveu os elementos mecânicos necessários para a entrada automática do material de adição. Entretanto, problemas na soldagem, como imperfeições geométricas no cordão de solda e excesso de respingos e salpicos, surgem quando pequenas variações na *dtp* são realizadas na posição de soldagem sobrecabeça.



Figura 3.1 – Tocha plasma com direcionador de arame [43].

Os problemas de soldagem citados acima ocorrem quando a fusão da extremidade do arame acontece afastada da poça de fusão em função de um pequeno aumento da *dtp*. Nesta situação, o jato plasma não consegue vencer a força da gravidade para lançar as gotas fundidas para a poça de fusão e, sendo assim, essas gotas deixam de compor o cordão de solda para formar respingos e salpicos.

Diante desta situação, o processo plasma de soldagem com alimentação automática de arame necessita de melhorias que o torne robusto diante de alterações geométrica da superfície a ser soldada. Nesta direção, o presente capítulo apresenta o estudo e as mudanças implementadas relativas aos seguintes aspectos deste processo: (a) posicionamento do arame em relação ao arco elétrico e ao cordão de solda, (b) orientação da tocha em relação a superfície a ser soldada, (c) parâmetros de soldagem e (d) localização e orientação do sistema de coordenadas da tocha. Este capítulo também mostra o resultado de experimentos, realizados em laboratório, nas situações mais críticas do ponto de vista da soldagem de superfícies danificadas em pás de turbinas hidráulicas.

3.1 – Posicionamento do arame em relação ao arco elétrico

A primeira providência tomada na direção de tornar o processo de soldagem mais robusto em relação a variação na *dtp* foi a diminuição do ângulo de incidência do material de adição θ no arco elétrico. A figura 3.2 mostra, à esquerda, a antiga técnica onde o arame é introduzido quase perpendicular ao arco elétrico e, à direita, a nova estratégia na qual o arame penetra com um menor ângulo em relação ao jato plasma.

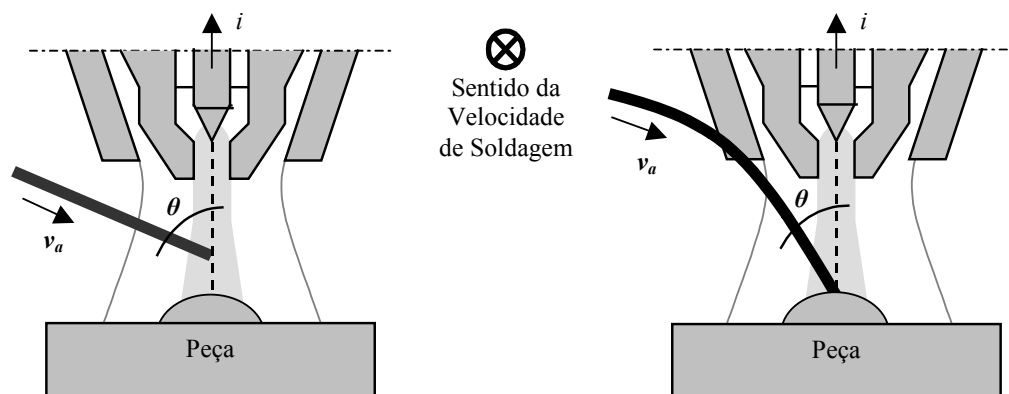


Figura 3.2 – Ângulo de incidência do arame nas técnicas: antiga à esquerda e nova à direita.

Com esta nova estratégia, θ em torno de 30° , é possível realizar depósitos com segurança na posição sobrecabeça em uma faixa de 6 à 10 mm de afastamento entre a tocha e a peça. A figura 3.3 apresenta seis cordões de solda executados de acordo com este novo posicionamento do arame. O primeiro cordão de solda, localizado na posição inferior, foi realizado com uma *dtp* de 6 mm, o segundo cordão de solda, situado ligeiramente acima do primeiro, foi confeccionado com uma *dtp* de 7 mm e assim sucessivamente. Apenas no último cordão de solda, localizado na parte superior da figura e executado a uma *dtp* de 11 mm, surgiram respingos e salpicos.



Figura 3.3 – Variação da dtp na nova estratégia de posicionamento do arame.

3.2 – Posicionamento do arame em relação ao cordão de solda

A soldagem robotizada através do processo plasma, com alimentação automática de arame, possui total liberdade no que diz respeito ao posicionamento do arame em relação ao cordão de solda. A figura 3.4 mostra os quatro principais posicionamentos. Nos posicionamentos (a) e (b), ambas as componentes da velocidade do arame, v_{ax} e v_{ay} , são perpendiculares à direção de soldagem. Nos posicionamentos (c) e (d) apenas a componente v_{ay} da velocidade do arame é perpendicular à direção de soldagem.

Destes quatro tipos principais de posicionamento do arame, em relação ao cordão de solda, apenas o tipo (d) possui a componente da velocidade do arame v_{ax} no mesmo sentido da velocidade de soldagem v_s . Esta característica facilita o deslocamento da poça de fusão, no sentido da velocidade de soldagem e contribui com a geometria do cordão de solda, através do aumento da largura e diminuição da altura. Além disso, toda a frente do arco elétrico, neste tipo de posicionamento, fica livre para fundir somente o metal base.

Com base nos experimentos de soldagem, realizados para diferentes posicionamentos do arame em relação ao cordão de solda e nas vantagens citadas acima, o posicionamento tipo (d), foi o escolhido para ser utilizado neste trabalho.

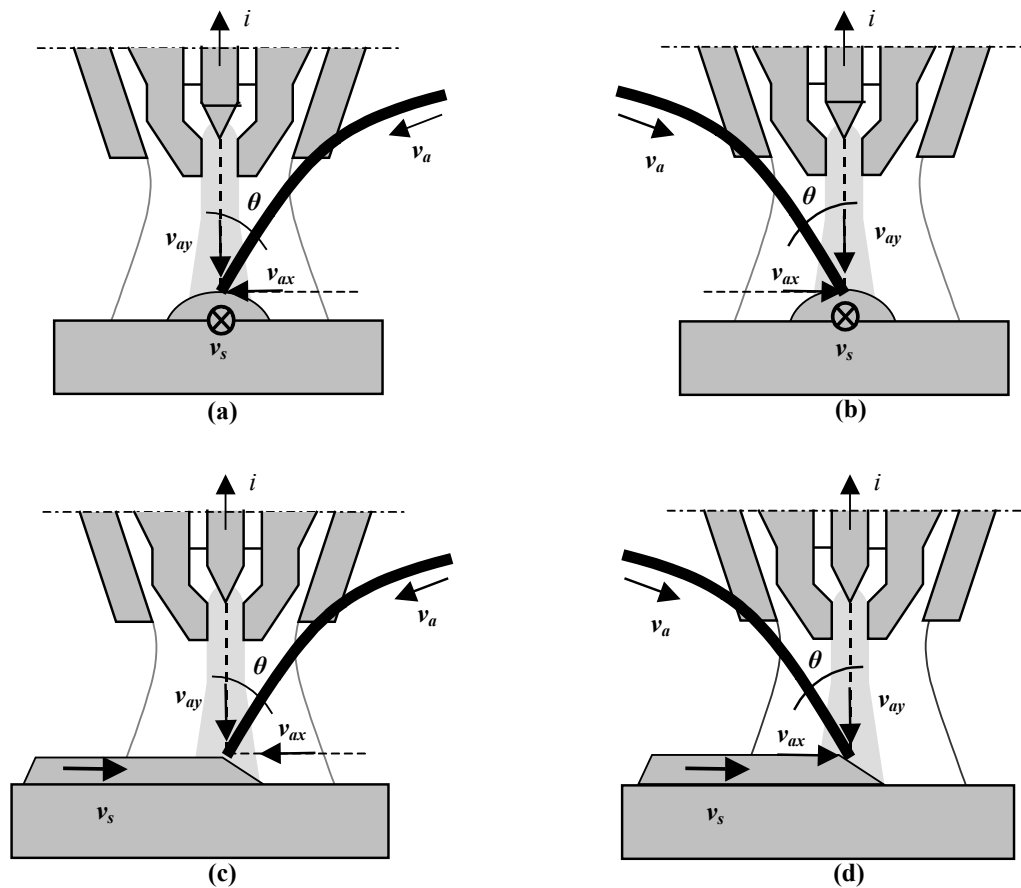


Figura 3.4 – Principais tipos de posicionamento do arame em relação ao cordão de solda.

3.3 – Orientação da tocha de soldagem

A orientação da tocha é definida, neste trabalho, através dos ângulos $\theta 1$ e $\theta 2$ entre a tocha e a superfície a ser soldada, conforme mostra a figura 3.5. O ângulo $\theta 1$ define a inclinação da tocha em relação o sentido de execução dos cordões de solda, enquanto que, o ângulo $\theta 2$ indica a inclinação da tocha em relação a direção perpendicular à execução dos cordões de solda.

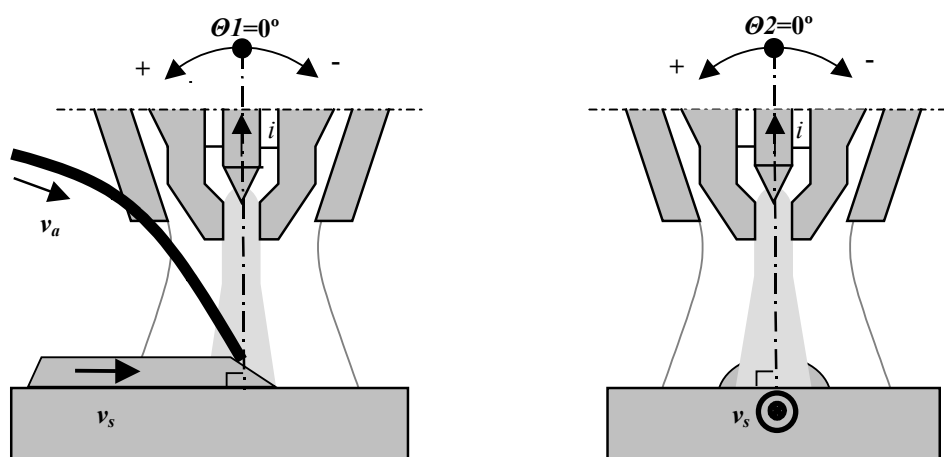


Figura 3.5 – Ângulos de orientação da tocha.

Outra providência tomada foi de usar um ângulo $\theta 1$ positivo, mais precisamente, $\theta 1$ igual a $7,5^\circ$, com o objetivo de se obter pequena penetração e cordões de solda mais largos. Este valor foi obtido por meio de inspeção visual da localização da transferência metálica na poça de fusão durante experimentos de soldagem realizados para diferentes valores de ângulo $\theta 1$.

O ângulo $\theta 2$ está relacionado principalmente com a união lateral de cordões de solda. Quando o ângulo $\theta 2$ assume valores positivos, o jato plasma se inclina e há risco de se ter falta de fusão na base dos cordões de solda. Por outro lado, quando o ângulo $\theta 2$ assume valores negativos, a região de superposição dos cordões de solda aumenta e consequentemente ocorre um incremento na altura da camada depositada.

Diante destas duas situações problemáticas e com base nos depósitos experimentais realizados em laboratório, optou-se em manter nulo o ângulo $\theta 2$.

3.4 – Parâmetros de soldagem

Na posição de soldagem sobre cabeça existem várias possibilidades de escolha da direção de confecção dos cordões de solda. Porém, cada direção necessita um conjunto específico de parâmetros de soldagem. A direção horizontal foi a escolhida por apresentar a melhor estabilidade da poça de fusão e menor possibilidade de incidência de defeitos de soldagem.

Um dos maiores desafios, deste trabalho, foi o de obter um conjunto de parâmetros de soldagem que permitisse realizar depósitos na posição sobre-cabeça com direção horizontal, em uma larga faixa de inclinação em relação ao plano horizontal e, ao mesmo tempo, garantisse uma elevada taxa de deposição.

O ponto de partida, para este desafio, foram os parâmetros de soldagem utilizados no trabalho de Oliveira [43], para o arame maciço de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro. Na posição sobre cabeça, Oliveira utilizou ambos os parâmetros pulsados, corrente elétrica e velocidade de arame, na frequência de 1 Hz e com razão cíclica de 0,5. Os valores médios resultantes para a corrente elétrica e a velocidade do arame foram respectivamente de 130 A e 1,7 m/min. A taxa de deposição obtida, com estes parâmetros, foi de 0,91 kg/h.

Foi possível estabelecer, com as melhorias descritas anteriormente, um novo conjunto de parâmetros de soldagem para o arame E-309L na posição sobre cabeça. Vários ganhos foram obtidos para o processo com este novo conjunto de parâmetros:

- Com uma nova frequência de pulsação de 5 Hz e razão cíclica de 0,5 obteve-se um cordão de solda com melhor acabamento superficial, isto é, mais liso;

- Uma nova corrente média de 160 A permitiu um incremento na velocidade do arame para 2,1 m/min e, consequentemente, um aumento na taxa de deposição para 1,12 kg/h;
- A velocidade do arame deixou de ser intermitente para ser contínua, reduzindo desta forma, o desgaste dos elementos responsáveis pela introdução do arame no arco elétrico.

A figura 3.6 mostra três cordões de solda depositados sobre o material de base, chapa de aço carbono 1020, de acordo com os novos parâmetros de soldagem estabelecidos. Estes cordões de solda foram executados na posição sobre-cabeça e em seqüência, da localização inferior em direção a superior desta figura, com os respectivos ângulos entre o corpo de prova e o plano horizontal: 20° , 45° e 70°.



Figura 3.6 – Soldagem sobre-cabeça com diferentes inclinações.

A figura 3.7 apresenta, de forma correspondente, a seção transversal destes três cordões de solda onde pode-se observar uma insignificante alteração de geometria em função da inclinação do corpo de prova em relação ao plano horizontal.

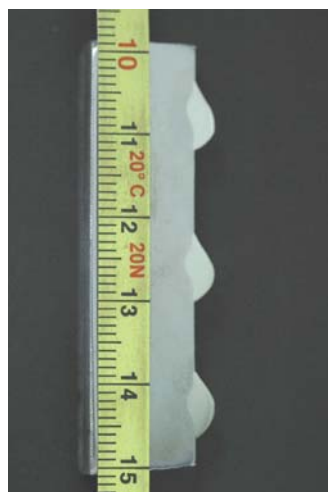


Figura 3.7 – Seção transversal dos cordões de solda da figura 3.6.

A robustez dos parâmetros de soldagem, juntamente com as melhorias realizadas no posicionamento do arame e na orientação da tocha, proporcionaram um excelente acabamento superficial, uma penetração rasa e uma relação largura/altura de 2,7 nos cordões de solda efetuados.

Os parâmetros de soldagem empregados na posição sobre cabeça, para o recobrimento de superfícies através da fusão do arame de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro sobre o aço carbono 1020, estão a seguir apresentados:

- Recuo do eletrodo: 0,8 mm;
- Diâmetro do orifício constritor: 3,7 mm;
- Distância tocha-peça: 8 mm;
- Distância entre cordões: 4,5 mm;
- Gás plasma: Argônio, vazão 2,0 l/min;
- Gás proteção: Argônio + 3% de dióxido de carbono (CO₂), vazão 10 l/min;
- Velocidade de soldagem: 14,4 cm/min;
- Velocidade do arame: 2,1 m/min;
- Frequência de pulsação: 5 Hz;
- Razão cíclica: 0,5;
- Corrente de pulso: 200 A;
- Corrente de base: 120 A.

A figura 3.8 mostra um depósito, de ótima qualidade, realizado com este conjunto de parâmetros, na posição sobre cabeça a 45° com o plano horizontal. O depósito obtido possui uma altura média de 3,5 mm e uma ondulação máxima menor que 1,0 mm.

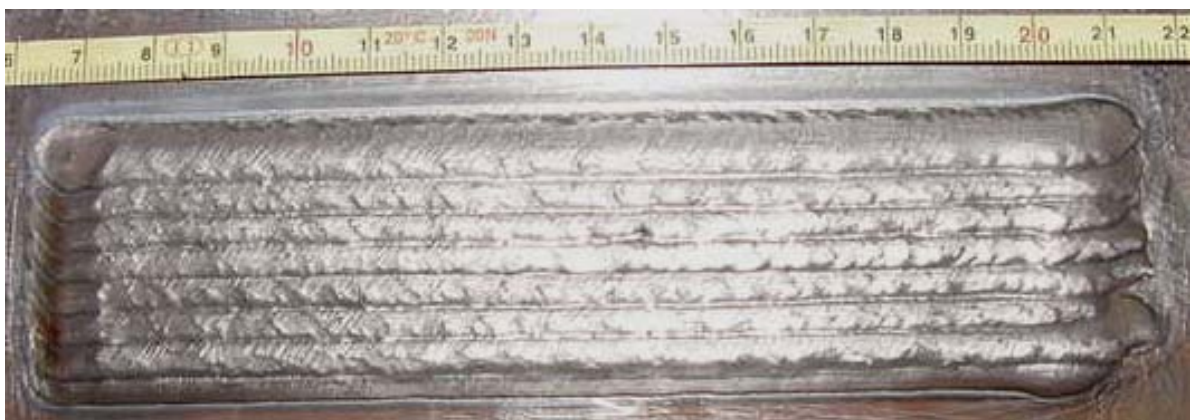


Figura 3.8 – Uma camada depositada com arame E-309L na posição sobre cabeça à 45°.

No recobrimento de superfícies, na posição sobre-cabeça, através da fusão do arame de aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro sobre o próprio aço inoxidável, alguns dos parâmetros de soldagem devem ser alterados em função da diferença de condutibilidade térmica existente entre este material e o aço carbono 1020. Neste caso, as correntes de pulso e de base foram respectivamente reduzidas para os seguintes valores: 180 A e 100 A.

A figura 3.9 apresenta um depósito, constituído de duas camadas sobre uma chapa plana de aço carbono 1020, realizado também na posição sobre-cabeça à 45° com o plano horizontal. A segunda camada deste depósito, também de excelente qualidade, foi executada com os parâmetros de corrente modificados.



Figura 3.9 – Duas camadas depositadas com arame E-309L na posição sobre-cabeça à 45°.

3.5 – Sistema de coordenadas da tocha

Com o auxílio de um braço de medição (figura 3.10) foi determinada a matriz de transformação do sistema de coordenadas da tocha ($0_r-x_t y_t z_t$) em relação ao sistema de coordenadas do flange do robô. A metodologia seguida para obtenção desta matriz é apresentada no anexo B.



Figura 3.10 – Medição de pontos sobre a superfície da tocha através do braço de medição.

Neste trabalho, a origem do sistema de coordenadas da tocha (figura 3.11) foi posicionada no centro da seção circular do arco plasma e distante de 8 mm do bocal constritor. Cabe salientar, que esta distância corresponde ao valor da *dtp* nominal e, ainda, central à faixa na qual se consegue realizar depósitos sem problemas de soldagem.

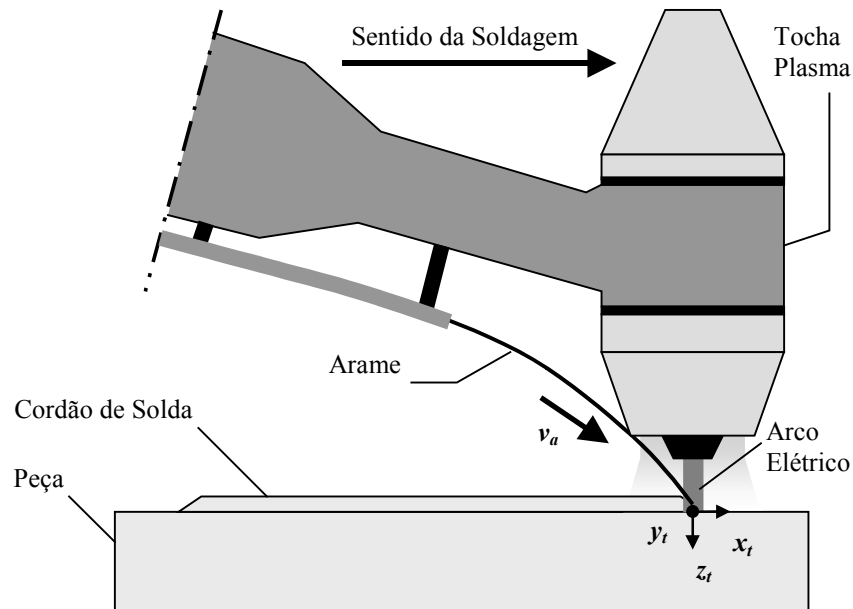


Figura 3.11 – Posição e orientação do sistema de coordenadas da tocha plasma.

3.6 – Síntese deste capítulo

O processo plasma com alimentação automática de arame foi testado em várias situações críticas do ponto de vista da soldagem de superfícies danificadas em pás de turbinas hidráulicas, tais como: na posição sobrecabeça, faixa de 20° à 70° entre o corpo de prova e o plano horizontal, e em diferentes distâncias entre tocha e peça, faixa de 6 mm à 10 mm. Os resultados obtidos nestas situações críticas, através das melhorias realizadas e dos parâmetros de soldagem ajustados, proporcionou a este processo a robustez e a repetitividade desejada para a realização de múltiplas camadas de deposição com aço inoxidável E-309L de 1,2 mm de diâmetro sobre chapas planas de aço carbono 1020.

Os cordões de solda, produzidos por este processo, apresentam as seguintes características: excelente acabamento superficial, ausência de salpicos e respingos, penetração rasa e uma ótima relação largura/altura.

Observa-se sempre a manutenção do valor nominal da *dtp* a cada camada realizada, uma vez que, sempre a tocha se desloca numa distância correspondente à altura média do cordão de solda, na direção normal da superfície e com o sentido de afastamento do corpo de prova.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA RECUPERAÇÃO AUTOMATIZADA DE SUPERFÍCIES DANIFICADAS POR CAVITAÇÃO

No presente capítulo, descreve-se a metodologia e os algoritmos desenvolvidos com o objetivo de recuperar de forma automatizada superfícies danificadas por cavitação em rotores de turbinas hidráulicas de grande porte. Na essência, esta metodologia envolve:

- Medição e descrição de superfícies afetadas por cavitação, através do uso de um sensor óptico de três linhas acoplado a um robô;
- Recuperação destas superfícies, através da deposição por soldagem a plasma, com alimentação automática de arame e arco elétrico pulsado;
- Qualificação geométrica de superfícies recuperadas.

Neste capítulo, as três trajetórias concebidas com finalidades específicas, são descritas em forma de uma seqüência de etapas necessárias para a obtenção de seus parâmetros. São elas:

- Trajetória de medição automatizada da superfície danificada;
- Trajetórias de soldagem de cada camada;
- Trajetória de medição automatizada da superfície recuperada.

4.1 – Medição automatizada da superfície danificada

A medição automatizada de superfícies danificadas por cavitação é aqui estruturada em uma seqüência de cinco etapas:

- Medição inicial;
- Determinação da orientação da medição;
- Delimitação da região danificada;
- Determinação das posições de medição;
- Determinação da trajetória de medição automatizada.

A seguir cada uma destas etapas é descrita em detalhes.

4.1.1 - Medição inicial

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 4.1, deve indicar, 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.

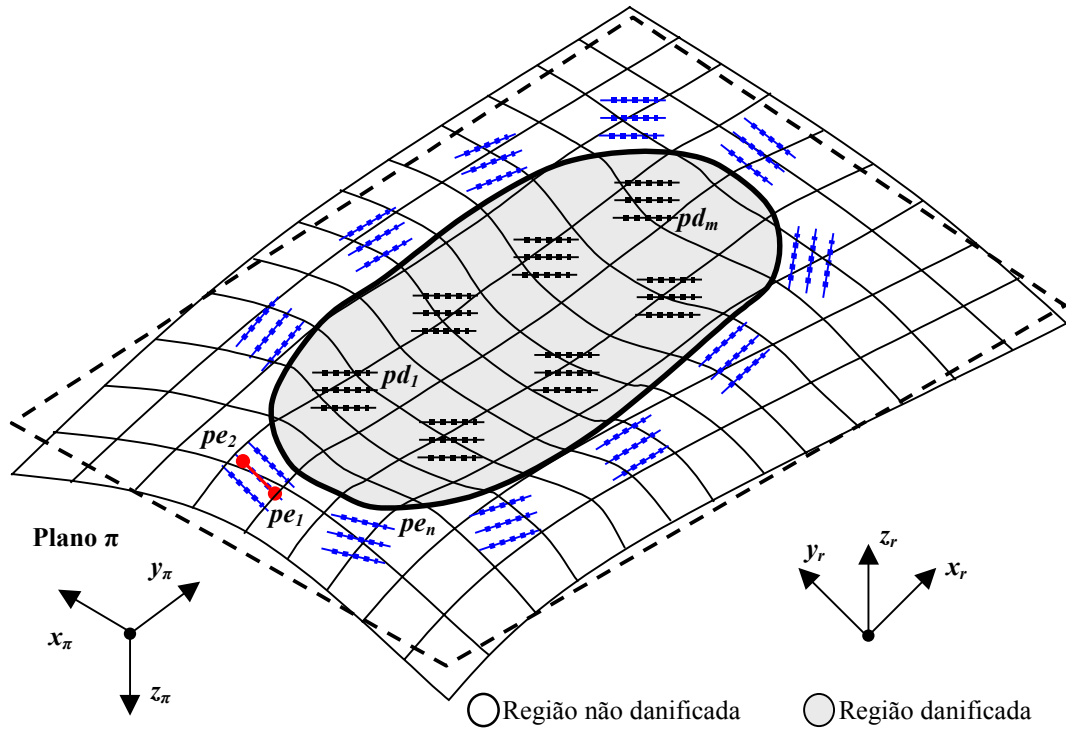


Figura 4.1 - Medição inicial dos pontos.

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 obtido com o objetivo de caracterizar a forma desta região. Este conjunto de pontos é também referenciado ao sistema de coordenadas fixo do robô.

4.1.2 - Determinação da orientação da medição

É ajustado um plano π , como mostra a figura 4.1, pelo método dos mínimos quadrados [28], que melhor se ajusta à região representada pelo conjunto de pontos: $\mathbf{pe}_1, \mathbf{pe}_2, \dots, \mathbf{pe}_n$. Este plano, e seu respectivo vetor normal unitário, são regidos pelas seguintes equações:

$$\text{Plano } \pi : z = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \quad (4.1)$$

$$\text{Vetor Normal : } \mathbf{z}_\pi = \begin{bmatrix} z_x & z_y & z_z \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & -1 \end{bmatrix}}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 1}} \quad (4.2)$$

Os coeficientes do plano a_0, a_1 e a_2 são calculados através da seguinte relação:

$$\mathbf{A} = \left(\mathbf{XY}_\pi^T \cdot \mathbf{XY}_\pi \right)^{-1} \cdot \mathbf{XY}_\pi^T \cdot \mathbf{Z}_\pi \quad (4.3)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{XY}_\pi = \begin{bmatrix} 1 & xe_1 & ye_1 \\ 1 & xe_2 & ye_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & xe_n & ye_n \end{bmatrix} \quad e \quad \mathbf{Z}_\pi = \begin{bmatrix} ze_1 \\ ze_2 \\ \vdots \\ ze_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A seguir são projetados, de forma perpendicular, os pontos: $\mathbf{pe}_1$ e $\mathbf{pe}_2$ sobre o plano π . Os respectivos pontos projetados $\mathbf{pp}_1(xp_1, yp_1, zp_1)$ e $\mathbf{pp}_2(xp_2, yp_2, zp_2)$ são calculados através da seguinte equação [58]:

$$\begin{aligned} \mathbf{pp}_i &= \begin{bmatrix} xp_i & yp_i & zp_i \end{bmatrix} = \mathbf{pe}_i - d(\mathbf{pe}_i, \pi) \cdot \mathbf{z}_\pi \\ \mathbf{pp}_i &= \begin{bmatrix} xe_i & ye_i & ze_i \end{bmatrix} - \frac{a_0 + a_1 \cdot xe_i + a_2 \cdot ye_i - 1 \cdot ze_i}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 1}} \cdot \begin{bmatrix} z_x & z_y & z_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Com : $i = 1 \text{ e } 2$

Onde:

- $d(\mathbf{pe}_i, \pi)$: distância entre o ponto $\mathbf{pe}_i$ e o plano π (mm).

Um segundo vetor unitário $\mathbf{x}_\pi$, localizado sobre o plano π , é obtido através da seguinte equação:

$$\mathbf{x}_\pi = \begin{bmatrix} x_x & x_y & x_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{pp}_2 - \mathbf{pp}_1}{|\mathbf{pp}_2 - \mathbf{pp}_1|} = \frac{\begin{bmatrix} xp_2 - xp_1 & yp_2 - yp_1 & zp_2 - zp_1 \end{bmatrix}}{\sqrt{(xp_2 - xp_1)^2 + (yp_2 - yp_1)^2 + (zp_2 - zp_1)^2}} \quad (4.6)$$

O terceiro vetor unitário $\mathbf{y}_\pi$, também localizado sobre o plano π , é determinado através do produto vetorial entre os vetores $\mathbf{x}_\pi$ e $\mathbf{z}_\pi$.

$$\mathbf{y}_\pi = \begin{bmatrix} y_x & y_y & y_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{z}_\pi \times \mathbf{x}_\pi}{|\mathbf{z}_\pi \times \mathbf{x}_\pi|} \quad (4.7)$$

Durante todo o processo automatizado de medição da superfície, o sistema de referência do sensor óptico $0_s\text{-}x_s y_s z_s$ será orientado nas direções x_s , y_s e z_s pelos respectivos vetores unitários $\mathbf{x}_\pi$, $\mathbf{y}_\pi$ e $\mathbf{z}_\pi$.

4.1.3 – Delimitação da região danificada

Os vetores unitários $\mathbf{x}_\pi$, $\mathbf{y}_\pi$ e $\mathbf{z}_\pi$ formam um sistema de coordenadas $0_\pi\text{-}x_\pi y_\pi z_\pi$ referentes ao plano π . Este sistema de coordenadas possui a mesma origem que o sistema de coordenadas fixo do robô e estão relacionados por uma matriz de rotação $\mathbf{RT}_{r\pi}$. Assim, as coordenadas do conjunto de pontos $\mathbf{pe}_1, \mathbf{pe}_2, \dots, \mathbf{pe}_n$ são expressas no sistema de coordenadas do plano π através da seguinte relação [53]:

$$\mathbf{p}\boldsymbol{\pi}_i^T = \begin{bmatrix} x\pi_i \\ y\pi_i \\ z\pi_i \end{bmatrix} = \mathbf{RT}_{r\pi}^T \cdot \mathbf{pe}_i^T = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x \\ x_y & y_y & z_y \\ x_z & y_z & z_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} xe_i \\ ye_i \\ ze_i \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Com : $i = 1, 2, \dots, n$

O próximo passo, consiste em descobrir, entre os elementos do conjunto de pontos $\mathbf{p}\boldsymbol{\pi}_i$, os limites $\mathbf{pl}\pi_1$, $\mathbf{pl}\pi_2$, $\mathbf{pl}\pi_3$ e $\mathbf{pl}\pi_4$ da superfície danificada, ou seja, os pontos cujos valores de uma de suas coordenadas nas direções x_π ou y_π sejam máximas ou mínimas. Estes pontos são representados da seguinte forma:

$$\mathbf{pl}\pi_1 = \begin{bmatrix} xl\pi_{\min} \\ yl\pi_1 \\ zl\pi_1 \end{bmatrix}^T ; \quad \mathbf{pl}\pi_2 = \begin{bmatrix} xl\pi_{\max} \\ yl\pi_2 \\ zl\pi_2 \end{bmatrix}^T ; \quad \mathbf{pl}\pi_3 = \begin{bmatrix} xl\pi_3 \\ yl\pi_{\min} \\ zl\pi_3 \end{bmatrix}^T ; \quad \mathbf{pl}\pi_4 = \begin{bmatrix} xl\pi_4 \\ yl\pi_{\max} \\ zl\pi_4 \end{bmatrix}^T \quad (4.9)$$

Os pontos limites são expressos, no sistema de coordenadas fixo do robô, através da seguinte equação [53]:

$$\mathbf{pl}_i^T = \begin{bmatrix} xl_i \\ yl_i \\ zl_i \end{bmatrix} = \mathbf{RT}_\pi \cdot \mathbf{pl}_\pi^T \quad (4.10)$$

Com : $i = 1, 2, \dots, 4$

A seguir, os pontos $\mathbf{pl}_i$ são projetados, de forma perpendicular, sobre o plano π . Os respectivos pontos projetados $\mathbf{ppl}_i$, conforme mostra a figura 4.2, são calculados de forma similar ao apresentado na projeção dos pontos $\mathbf{pe}_1$ e $\mathbf{pe}_2$, ou seja:

$$\mathbf{ppl}_i^T = \begin{bmatrix} xpl_i \\ ypl_i \\ zpl_i \end{bmatrix} = \mathbf{pl}_i^T - d(\mathbf{pl}_i, \pi) \cdot \mathbf{z}_\pi^T$$

$$\mathbf{ppl}_i^T = \begin{bmatrix} xl_i \\ yl_i \\ zl_i \end{bmatrix} - \frac{a_0 + a_1 \cdot xl_i + a_2 \cdot yl_i - l \cdot zl_i}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + l^2}} \cdot \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ z_z \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Com : $i = 1, 2, \dots, 4$.

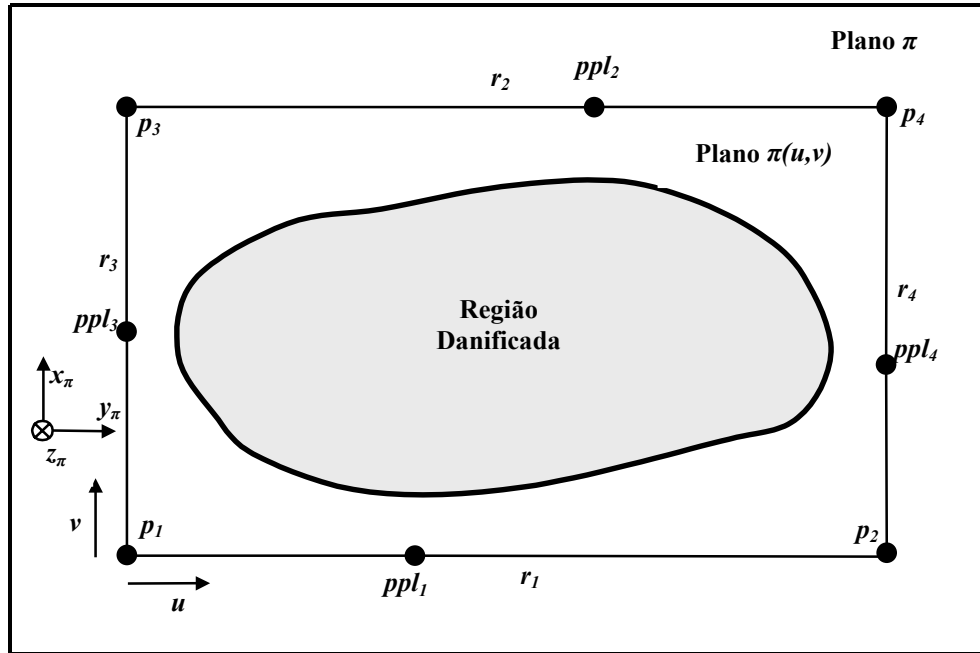


Figura 4.2 - Vista superior da região danificada na direção do vetor normal do plano π .

Por sua vez, as retas $\mathbf{r}_1(t_1)$, $\mathbf{r}_2(t_2)$, $\mathbf{r}_3(t_3)$ e $\mathbf{r}_4(t_4)$, que passam pelos seus respectivos pontos projetados $\mathbf{ppl}_i$, são definidas pelas seguintes equações paramétricas [58]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1(t_1) &= \begin{bmatrix} xpl_1 + y_x \cdot t_1 \\ ypl_1 + y_y \cdot t_1 \\ zpl_1 + y_z \cdot t_1 \end{bmatrix}^T & \mathbf{r}_2(t_2) &= \begin{bmatrix} xpl_2 + y_x \cdot t_2 \\ ypl_2 + y_y \cdot t_2 \\ zpl_2 + y_z \cdot t_2 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{r}_3(t_3) &= \begin{bmatrix} xpl_3 + x_x \cdot t_3 \\ ypl_3 + x_y \cdot t_3 \\ zpl_3 + x_z \cdot t_3 \end{bmatrix}^T & \mathbf{r}_4(t_4) &= \begin{bmatrix} xpl_4 + x_x \cdot t_4 \\ ypl_4 + x_y \cdot t_4 \\ zpl_4 + x_z \cdot t_4 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4.12)$$

Já os vértices $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ e $\mathbf{p}_3$ são respectivamente os pontos de interseção entre as retas: $\mathbf{r}_1$ com $\mathbf{r}_3$, $\mathbf{r}_1$ com $\mathbf{r}_4$ e $\mathbf{r}_2$ com $\mathbf{r}_3$. Estes pontos são representados da seguinte forma:

$$\mathbf{p}_1 = [xp_1 \quad yp_1 \quad zp_1] \quad ; \quad \mathbf{p}_2 = [xp_2 \quad yp_2 \quad zp_2] \quad ; \quad \mathbf{p}_3 = [xp_3 \quad yp_3 \quad zp_3] \quad (4.13)$$

Desta forma, a equação do plano parametrizado $\pi(u,v)$ na região de interesse é definida pela seguinte equação [49]:

$$\pi(u,v) = \begin{bmatrix} xp_1 + (xp_2 - xp_1) \cdot u + (xp_3 - xp_1) \cdot v \\ yp_1 + (yp_2 - yp_1) \cdot u + (yp_3 - yp_1) \cdot v \\ zp_1 + (zp_2 - zp_1) \cdot u + (zp_3 - zp_1) \cdot v \end{bmatrix}^T \quad (4.14)$$

Com : $0 \leq u, v \leq 1$

4.1.4 – Determinação das posições de medição

Este plano parametrizado, por sua vez, é dividido em pedaços com o objetivo de estabelecer uma rede com malhas idênticas e aproximadamente quadradas, conforme mostra a figura 4.3. O número de malhas, $k-2$ vezes $l-2$, e os valores dos incrementos Iu e Iv , em milímetros, são expressos através das seguintes equações:

$$\begin{aligned} \text{Direção } u : k - 2 &= \text{round} \left(\frac{d(p_1, p_2)}{mq} \right); \quad Iu = \frac{d(p_1, p_2)}{k - 2} \\ \text{Direção } v : l - 2 &= \text{round} \left(\frac{d(p_1, p_3)}{mq} \right); \quad Iv = \frac{d(p_1, p_3)}{l - 2} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Onde:

- mq : tamanho desejado da malha quadrada (mm);
- $d(p_1, p_2)$: distância entre os pontos p_1 e p_2 (mm);
- $d(p_1, p_3)$: distância entre os pontos p_1 e p_3 (mm);
- $round$: função de arredondamento numérico que resulta no inteiro mais próximo.

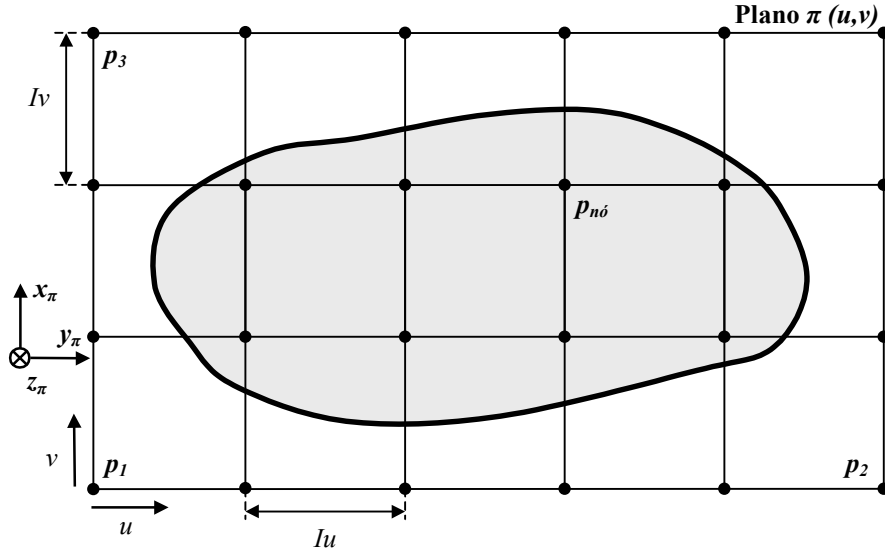


Figura 4.3 - Malhas e nós do plano parametrizado $\pi(u,v)$.

A seguir, é realizado o ajuste, pelo método dos mínimos quadrados [28], de uma única superfície quádrlica φ que se aproxima da região representada pelos dois conjuntos de pontos: $pe_1, pe_2, \dots, pe_n$ e $pd_1, pd_2, \dots, pd_m$. O objetivo da criação desta superfície é permitir que a medição de toda a região danificada permaneça dentro dos limites da faixa de medição do sensor óptico. A superfície quádrlica φ é descrita pela seguinte equação [58]:

$$\text{Superfície } \varphi : z = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x \cdot y + b_5 \cdot y^2 \quad (4.16)$$

Os coeficientes desta superfície $b_0, b_1, \dots, b_5$ são calculados através da seguinte relação:

$$B = (XY_\varphi^T \cdot XY_\varphi)^{-1} \cdot XY_\varphi^T \cdot Z_\varphi \quad (4.17)$$

Onde:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{XY}_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & xe_1 & ye_1 & xe_1^2 & xe_1 \cdot ye_1 & ye_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & xe_n & ye_n & xe_n^2 & xe_n \cdot ye_n & ye_n^2 \\ 1 & xd_1 & yd_1 & xd_1^2 & xd_1 \cdot yd_1 & yd_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & xd_m & yd_m & xd_m^2 & xd_m \cdot yd_m & yd_m^2 \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{Z}_\varphi = \begin{bmatrix} ze_1 \\ \vdots \\ ze_n \\ zd_1 \\ \vdots \\ zd_m \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Durante o processo de medição automatizada, a origem do sistema de referência do sensor $0_s\text{-}x_s y_s z_s$ será localizado nas interseções entre a superfície φ e as retas $\mathbf{r}_{u,v}(t_{u,v})$ que passam nos pontos de nó $\mathbf{p}_{nó}(u,v)$ da rede com direção do vetor unitário $\mathbf{z}_\pi$. Estas retas possuem equações paramétricas [58] da seguinte forma:

$$\mathbf{r}_{u,v}(t_{u,v}) = \begin{bmatrix} x_{u,v}(t_{u,v}) \\ y_{u,v}(t_{u,v}) \\ z_{u,v}(t_{u,v}) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{nó}(u,v) + a_1 \cdot t_{u,v} \\ y_{nó}(u,v) + a_2 \cdot t_{u,v} \\ z_{nó}(u,v) - l \cdot t_{u,v} \end{bmatrix}^T \quad (4.19)$$

$$\text{Com : } u = 0, \frac{1}{k-2}, \frac{2}{k-2}, \dots, 1 \quad \text{e} \quad v = 0, \frac{1}{l-2}, \frac{2}{l-2}, \dots, 1$$

Substituindo (4.19) em (4.16) se obtém a equação de segundo grau em função do parâmetro $t_{u,v}$ que define a interseção entre as retas $\mathbf{r}_{u,v}(t_{u,v})$ e a superfície φ .

$$k_1 \cdot t_{u,v}^2 + k_2 \cdot t_{u,v} + k_3 = 0 \quad (4.20)$$

Onde :

$$k_1 = b_5 \cdot a_2^2 + b_4 \cdot a_1 \cdot a_2 + b_3 \cdot a_1^2$$

$$k_2 = 2 \cdot b_5 \cdot a_2 \cdot y_{nó} + b_4 \cdot a_1 \cdot y_{nó} + b_4 \cdot a_2 \cdot x_{nó} + 2 \cdot b_3 \cdot a_1 \cdot x_{nó} + b_2 \cdot a_2 + b_1 \cdot a_1 + l$$

$$k_3 = b_5 \cdot y_{nó}^2 + b_4 \cdot x_{nó} \cdot y_{nó} + b_3 \cdot x_{nó}^2 + b_2 \cdot y_{nó} + b_1 \cdot x_{nó} + b_0 - z_{nó}$$

Resolvendo a equação (4.20) se obtém como solução dois valores do parâmetro $t_{u,v}$ onde a reta $\mathbf{r}_{u,v}(t_{u,v})$ intercepta a superfície φ :

$$t_{u,v} = \frac{-k_2 \pm \sqrt{k_2^2 - 4 \cdot k_1 \cdot k_3}}{2 \cdot k_1} \quad (4.21)$$

A seguir, escolhe-se o menor valor absoluto $tc_{u,v}$ entre as duas soluções da equação (4.21) e substitui este valor na equação (4.19) para se obter as coordenadas de cada ponto de interseção $pc_{u,v}$.

$$pc_{u,v} = \begin{bmatrix} xc_{u,v} \\ yc_{u,v} \\ zc_{u,v} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{nó}(u,v) + a_1 \cdot tc_{u,v} \\ y_{nó}(u,v) + a_2 \cdot tc_{u,v} \\ z_{nó}(u,v) - l \cdot tc_{u,v} \end{bmatrix}^T \quad (4.22)$$

$$\text{Com : } u = 0, \frac{1}{k-2}, \frac{2}{k-2}, \dots, 1 \quad e \quad v = 0, \frac{1}{l-2}, \frac{2}{l-2}, \dots, 1$$

4.1.5 – Determinação da trajetória de medição automatizada

A figura 4.4 mostra a trajetória, do tipo zig-zag, utilizada para realizar, através do sensor óptico de três linhas, a medição automatizada da superfície danificada. Cada elemento desta trajetória é composto por uma sequência dos seguintes parâmetros fornecidos ao robô: (a) as coordenadas de cada ponto $pc_{u,v}$, (b) a orientação fornecida pelos vetores unitários do plano (x_π , y_π e z_π), (c) a velocidade de execução da trajetória e (d) o tempo de aquisição em cada ponto $pc_{u,v}$ da trajetória.

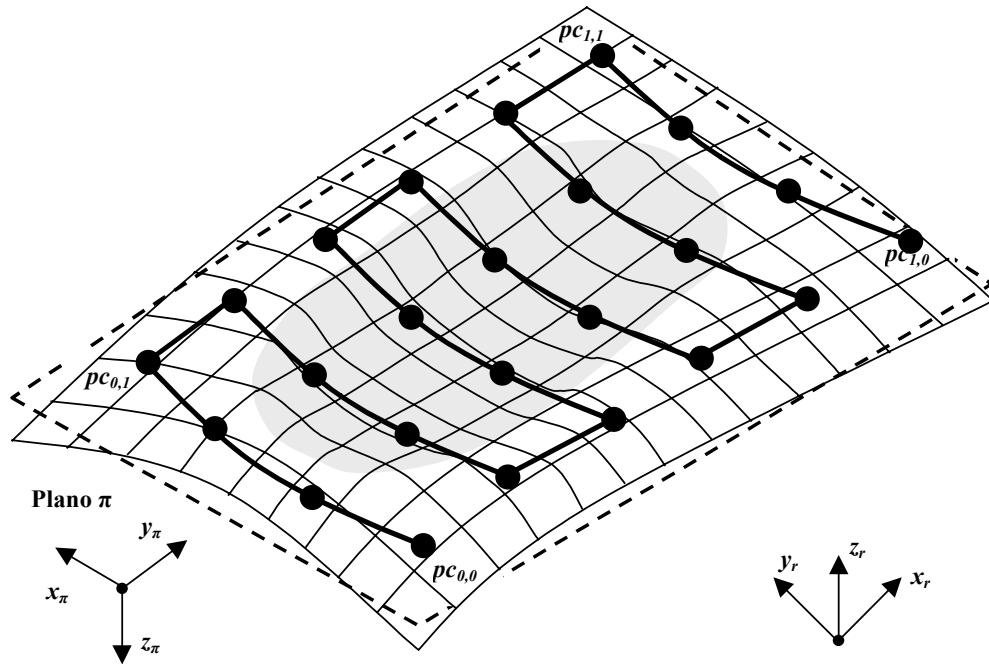


Figura 4.4 – Trajetória de medição automatizada tipo zig-zag.

4.2 – Deposição automatizada em superfícies danificadas

O preenchimento automatizado por soldagem de superfícies danificadas por cavitação é aqui estruturado em uma sequência de seis etapas:

- Determinação dos pontos representantes e suas derivadas;
- Obtenção de uma estimativa da superfície original;
- Obtenção da descrição paramétrica da superfície danificada;
- Determinação da localização inicial dos cordões de solda;
- Determinação do número de camadas de soldagem;
- Determinação das trajetórias de soldagem.

A seguir cada uma destas etapas é descrita em detalhes.

4.2.1 – Determinação dos pontos representantes e suas derivadas

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 $pc_{u,v}$.

A origem do sistema de coordenadas do sensor óptico de três linhas localiza-se, de acordo com a trajetória de medição automatizada, em cada posição de medição $pc_{u,v}$ e orienta-se de acordo com os vetores unitários do sistema de coordenadas do plano π .

As coordenadas dos pontos de cada matriz lida estão referenciadas em relação ao sistema de coordenadas do robô $0_r-x_r y_r z_r$ e são posteriormente expressas no sistema de coordenadas do plano π de forma similar ao apresentado na equação (4.8) do item 4.1.3.

A seguir, para cada matriz de pontos, é ajustada pelo método dos mínimos quadrados [28] uma superfície quádrlica $\psi_{u,v}$:

$$\text{Superfície } \psi_{u,v} : z = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot x^2 + c_4 \cdot x \cdot y + c_5 \cdot y^2 \quad (4.23)$$

$$\text{Com : } u = 0, \frac{1}{k-2}, \frac{2}{k-2}, \dots, 1 \quad e \quad v = 0, \frac{1}{l-2}, \frac{2}{l-2}, \dots, 1$$

Este procedimento tem como finalidade minimizar o erro aleatório presente nos pontos extraídos e as irregularidades da superfície local. Desta forma, um ponto representante ps é extraído de cada matriz. A localização deste ponto é central à superfície $\psi_{u,v}$, ou seja, sobre o eixo z_s do sensor óptico. Assim, suas coordenadas são:

$$\mathbf{ps}_{u,v} = \begin{bmatrix} xps \\ yps \\ c_0 + c_1 \cdot xps + c_2 \cdot yps + c_3 \cdot xps^2 + c_4 \cdot xps \cdot yps + c_5 \cdot yps^2 \end{bmatrix}^T \quad (4.24)$$

Já os vetores, derivada de primeira ordem, nas direções u e v e o vetor derivada de segunda ordem misto, nos pontos representantes, possuem as seguintes componentes:

$$1^0 \text{ ordem} \begin{cases} \mathbf{ps}_{u,v}^u = [0 & 1 & c_2 + c_4 \cdot xps + 2 \cdot c_5 \cdot yps] \\ \mathbf{ps}_{u,v}^v = [1 & 0 & c_1 + c_4 \cdot yps + 2 \cdot c_3 \cdot xps] \end{cases} \quad (4.25)$$

$$2^0 \text{ ordem} \{ \mathbf{ps}_{u,v}^{uv} = \mathbf{ps}_{u,v}^{vu} = [0 \quad 0 \quad c_4] \} \quad (4.26)$$

Os resultados obtidos nas equações 4.24 à 4.26 são calculados agora em relação ao sistema de coordenadas de referência do robô de forma similar ao descrito na equação (4.10) do item 4.1.3, ou seja:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(u,v)^T &= \mathbf{RT}_{r\pi} \cdot \mathbf{ps}_{u,v}^T \quad ; \quad \mathbf{p}^{uv}(u,v)^T = \mathbf{RT}_{r\pi} \cdot \mathbf{ps}_{u,v}^{uvT} \\ \mathbf{p}^u(u,v)^T &= \mathbf{RT}_{r\pi} \cdot \mathbf{ps}_{u,v}^{uT} \quad ; \quad \mathbf{p}^v(u,v)^T = \mathbf{RT}_{r\pi} \cdot \mathbf{ps}_{u,v}^{vT} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Com : $u = 0, \frac{1}{k-2}, \frac{2}{k-2}, \dots, 1$ e $v = 0, \frac{1}{l-2}, \frac{2}{l-2}, \dots, 1$

4.2.2 – Obtenção de uma estimativa da superfície original

Para reconstruir a superfície original é preciso, em primeiro lugar, interpolar pontos internos $\mathbf{p}_i$ com as informações somente do contorno inteiramente localizado na região não danificada da superfície afetada por cavitação, conforme mostra a figura 4.5. Esta interpolação é realizada utilizando a equação que descreve uma superfície do tipo Coon bicúbica [69]:

$$\mathbf{pi}(u,v) = - \begin{bmatrix} -1 & f_1(u) & f_2(u) & f_3(u) & f_4(u) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 & \mathbf{p}(u,0) & \mathbf{p}(u,1) & \mathbf{p}^v(u,0) & \mathbf{p}^v(u,1) \\ \mathbf{p}(0,v) & \mathbf{p}(0,0) & \mathbf{p}(0,1) & \mathbf{p}^v(0,0) & \mathbf{p}^v(0,1) \\ \mathbf{p}(1,v) & \mathbf{p}(1,0) & \mathbf{p}(1,1) & \mathbf{p}^v(1,0) & \mathbf{p}^v(1,1) \\ \mathbf{p}^u(0,v) & \mathbf{p}^u(0,0) & \mathbf{p}^u(0,1) & \mathbf{p}^{uv}(0,0) & \mathbf{p}^{uv}(0,1) \\ \mathbf{p}^u(1,v) & \mathbf{p}^u(1,0) & \mathbf{p}^u(1,1) & \mathbf{p}^{uv}(1,0) & \mathbf{p}^{uv}(1,1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ f_1(v) \\ f_2(v) \\ f_3(v) \\ f_4(v) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\text{Com : } u = \frac{1}{k-2}, \frac{2}{k-2}, \dots, \frac{k-3}{k-2} \quad \text{e} \quad v = \frac{1}{l-2}, \frac{2}{l-2}, \dots, \frac{l-3}{l-2}$$

Onde :

$$f_1(u) = 2 \cdot u^3 - 3 \cdot u^2 + 1 ; \quad f_1(v) = 2 \cdot v^3 - 3 \cdot v^2 + 1 ; \quad \mathbf{p}_0 = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$f_2(u) = -2 \cdot u^3 + 3 \cdot u^2 ; \quad f_2(v) = -2 \cdot v^3 + 3 \cdot v^2$$

$$f_3(u) = u^3 - 2 \cdot u^2 + u ; \quad f_3(v) = v^3 - 2 \cdot v^2 + v$$

$$f_4(u) = u^3 - u^2 ; \quad f_4(v) = v^3 - v^2$$

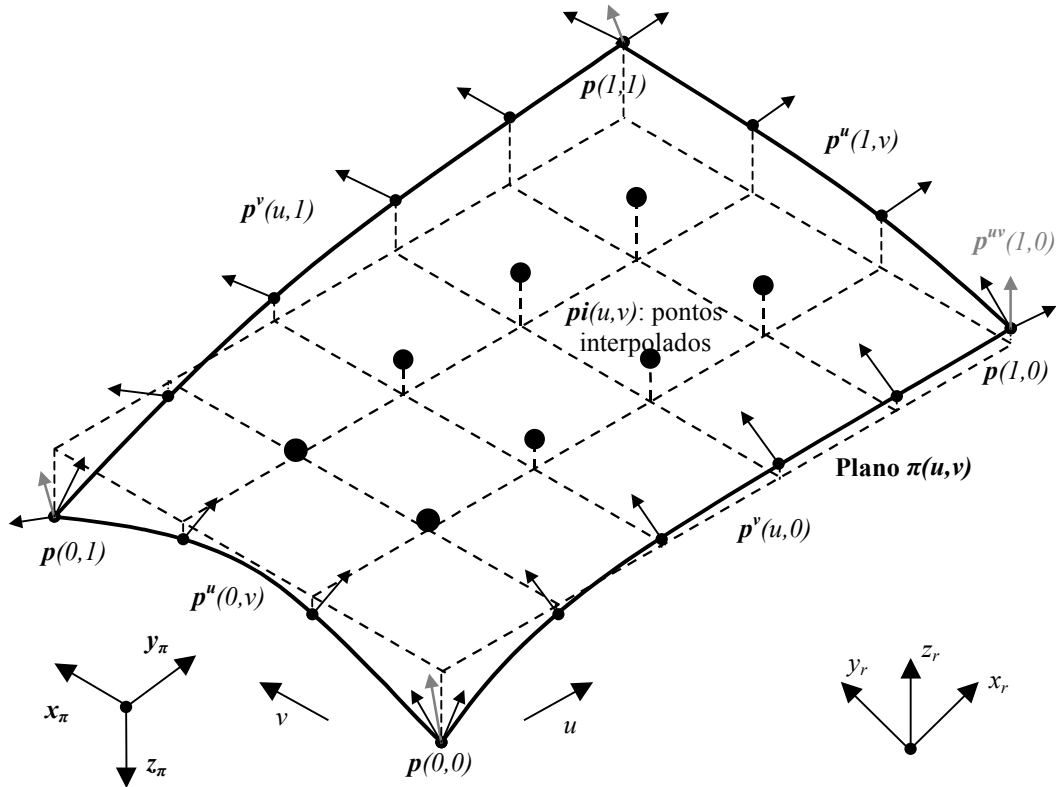


Figura 4.5 - Pontos interpolados para obtenção de uma estimativa da superfície original.

Com as informações do contorno, localizado na região não danificada, que envolve a superfície afetada por cavitação e também dos pontos interpolados $\mathbf{pi}$ na região central, é gerada a superfície original estimada composta, do tipo B-spline uniforme bicúbica. Este tipo de superfície, como mostra a figura 4.6, é formada por um conjunto de $(k-2) \times (l-2)$ pedaços nas direções u e v respectivamente. Cada pedaço $\mathbf{r}_{i,j}(u,v)$ de superfície é regido pela seguinte equação [49]:

$$\mathbf{r}_{i,j}(u,v) = [N_{4,0}(u) \quad N_{4,1}(u) \quad N_{4,2}(u) \quad N_{4,3}(u)] \cdot \mathbf{R}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} N_{4,0}(v) \\ N_{4,1}(v) \\ N_{4,2}(v) \\ N_{4,3}(v) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Com : $0 \leq u, v \leq 1$; $i = 1, \dots, k-2$; $j = 1, \dots, l-2$

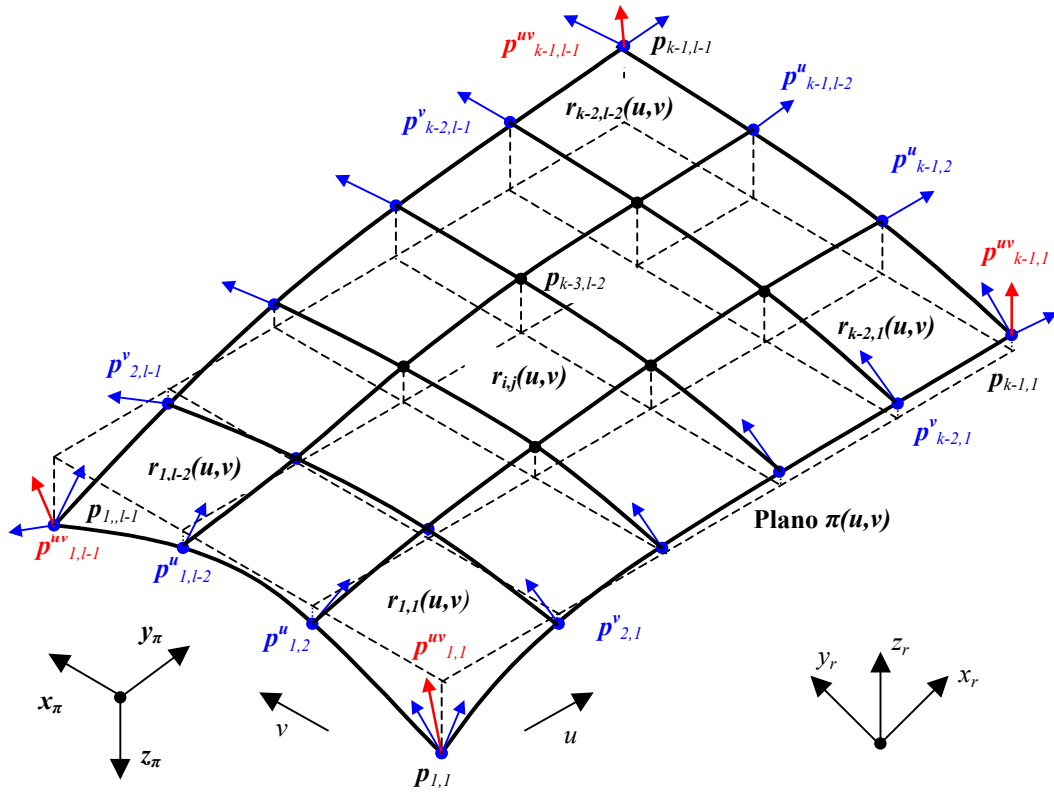


Figura 4.6 – Estimativa da superfície original.

A matriz $\mathbf{R}$, com dimensão $(k+1) \times (l+1)$, é formada por todos os vértices de controle da superfície original estimada, enquanto que a matriz $\mathbf{R}_{ij}$, com dimensão 4×4 , é formada somente pelos vértices de controle de cada pedaço $r_{ij}(u,v)$, isto é:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} V_{1,1} & \cdots & V_{1,l+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{k+1,1} & \cdots & V_{k+1,l+1} \end{bmatrix} \\
 &\Downarrow \\
 \mathbf{R}_{1,1} &= \begin{bmatrix} V_{1,1} & \cdots & V_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{4,1} & \cdots & V_{4,4} \end{bmatrix} \quad \cdots \quad \mathbf{R}_{1,l-2} = \begin{bmatrix} V_{1,l-2} & \cdots & V_{1,l+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{4,l-2} & \cdots & V_{4,l+1} \end{bmatrix} \\
 &\vdots \quad \ddots \quad \vdots \\
 \mathbf{R}_{k-2,1} &= \begin{bmatrix} V_{k-2,1} & \cdots & V_{k-2,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{k+1,1} & \cdots & V_{k+1,4} \end{bmatrix} \quad \cdots \quad \mathbf{R}_{k-2,l-2} = \begin{bmatrix} V_{k-2,l-2} & \cdots & V_{k-2,l+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{k+1,l-2} & \cdots & V_{k+1,l+1} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Por sua vez, as funções cúbicas N nas variáveis u e v são definidas da seguinte forma:

$$\begin{cases} N_{4,0}(u) = \frac{1}{6} \cdot (1 - 3 \cdot u + 3 \cdot u^2 - u^3) & ; \quad N_{4,0}(v) = \frac{1}{6} \cdot (1 - 3 \cdot v + 3 \cdot v^2 - v^3) \\ N_{4,1}(u) = \frac{1}{6} \cdot (4 - 6 \cdot u^2 - 3 \cdot u^3) & ; \quad N_{4,1}(v) = \frac{1}{6} \cdot (4 - 6 \cdot v^2 - 3 \cdot v^3) \\ N_{4,2}(u) = \frac{1}{6} \cdot (1 + 3 \cdot u + 3 \cdot u^2 - 3 \cdot u^3) & ; \quad N_{4,2}(v) = \frac{1}{6} \cdot (1 + 3 \cdot v + 3 \cdot v^2 - 3 \cdot v^3) \\ N_{4,3}(u) = \frac{1}{6} \cdot (u^3) & ; \quad N_{4,3}(v) = \frac{1}{6} \cdot (v^3) \end{cases} \quad (4.31)$$

Uma vez obtida a matriz de vértices de controle $\mathbf{R}$, a superfície original $\mathbf{r}_{ij}(u,v)$ estará definida através da equação 4.29. Os elementos desta matriz são obtidos em dois passos.

No primeiro passo são calculados os vértices ($\mathbf{Q}_{ij}$, com $i=1, 2, \dots, k+1$ e $j=1, 2, \dots, l-1$) das curvas do tipo B-spline apenas na direção u da superfície original, conforme mostra a figura 4.7. Estes vértices são obtidos através da solução do seguinte sistema de equações [49]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{1,j} \\ \mathbf{Q}_{2,j} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{k,j} \\ \mathbf{Q}_{k+1,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 & 0 & \cdots & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ 0 & \cdots & 0 & 2/3 & 1/3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1,j} - 1/3 \cdot \mathbf{p}_{1,j}^u \\ \mathbf{p}_{1,j} \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{k-1,j} \\ \mathbf{p}_{k-1,j} + 1/3 \cdot \mathbf{p}_{k-1,j}^u \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Com : $j = 1, 2, \dots, l-1$

Os valores das derivadas dos vértices de controle ($\mathbf{Q}'_{ij}$, com $i=1, 2, \dots, k+1$ e $j=1$ e $l-1$), na direção v , são obtidos através da solução dos seguintes sistemas de equações [49]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}'_{1,1} \\ \mathbf{Q}'_{2,1} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}'_{k,1} \\ \mathbf{Q}'_{k+1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ 0 & 0 & -1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1,1}^{uv} \\ \mathbf{p}_{1,1}^v \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{k-1,1}^v \\ \mathbf{p}_{k-1,1}^{uv} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}'_{1,l-1} \\ \mathbf{Q}'_{2,l-1} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}'_{k,l-1} \\ \mathbf{Q}'_{k+1,l-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ 0 & 0 & -1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1,l-1}^{uv} \\ \mathbf{p}_{1,l-1}^v \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{k-1,l-1}^v \\ \mathbf{p}_{k-1,l-1}^{uv} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

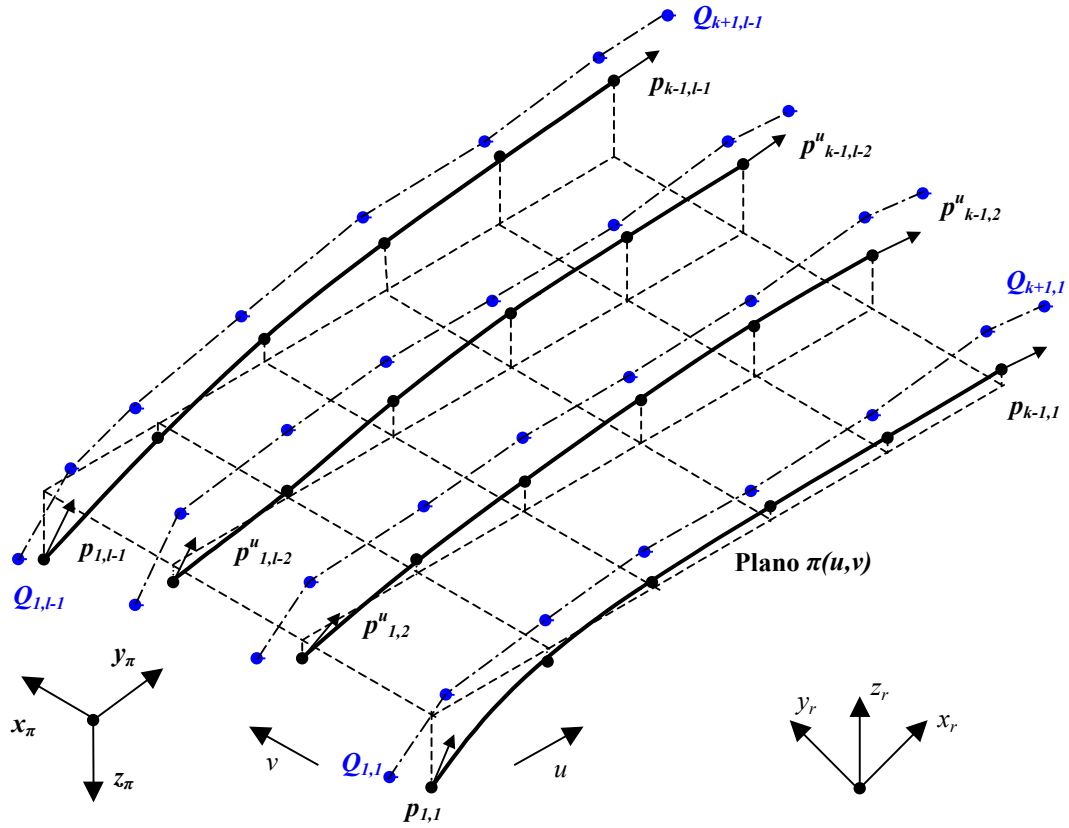


Figura 4.7 – Vértices de controle das curvas na direção u .

No segundo passo, os vértices de controle (V_{ij} , com $i=1, 2, \dots, k+1$ e $j=1, 2, \dots, l+1$) da superfície original, como mostra a figura 4.8, são calculados na direção v a partir dos valores obtidos nas equações 4.32, 4.33 e 4.34. Estes vértices de controle são determinados resolvendo o seguinte sistema de equações [49]:

$$\begin{bmatrix} V_{i,1} \\ V_{i,2} \\ \vdots \\ V_{i,l} \\ V_{i,l+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 & 0 & \cdots & 0 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 1/6 & 2/3 & 1/6 \\ 0 & \cdots & 0 & 2/3 & 1/3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Q_{i,l} - 1/3 \cdot Q'_{i,l} \\ Q_{i,l} \\ \vdots \\ Q_{i,l-1} \\ Q_{i,l-1} + 1/3 \cdot Q'_{i,l-1} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Com : $i = 1, 2, \dots, k+1$

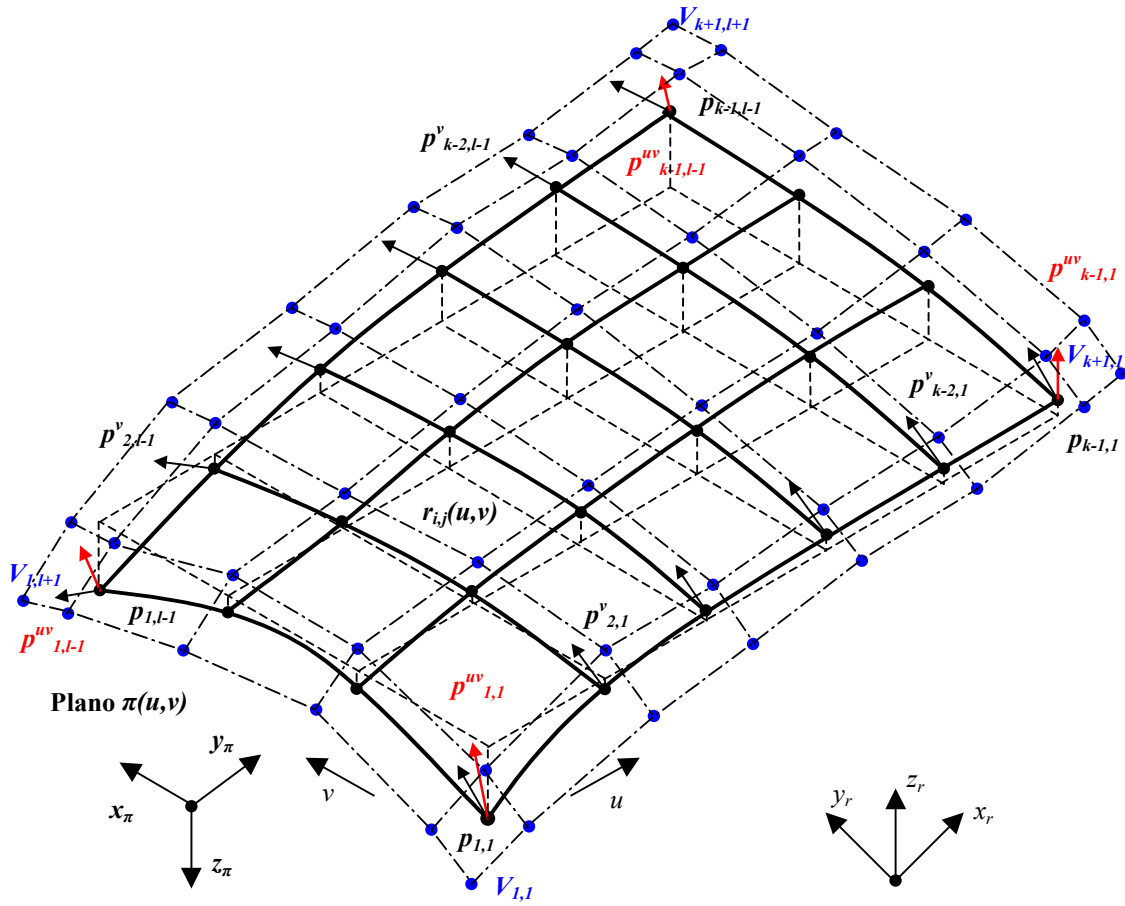


Figura 4.8 – Vértices de controle da superfície original.

O vetor normal em um ponto da superfície original $r_{ij}(u,v)$ é obtido através do produto vetorial dos vetores tangentes nas direções u e v . Por sua vez, os vetores tangentes são obtidos derivando a equação 4.29:

$$\mathbf{r}_{i,j}^u(u,v) = \frac{\partial}{\partial u} \mathbf{r}_{i,j}(u,v) = \begin{bmatrix} N'_{4,0}(u) & N'_{4,1}(u) & N'_{4,2}(u) & N'_{4,3}(u) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} N_{4,0}(v) \\ N_{4,1}(v) \\ N_{4,2}(v) \\ N_{4,3}(v) \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\mathbf{r}_{i,j}^v(u,v) = \frac{\partial}{\partial v} \mathbf{r}_{i,j}(u,v) = \begin{bmatrix} N_{4,0}(u) & N_{4,1}(u) & N_{4,2}(u) & N_{4,3}(u) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} N'_{4,0}(v) \\ N'_{4,1}(v) \\ N'_{4,2}(v) \\ N'_{4,3}(v) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Com : $0 \leq u, v \leq 1$; $i = 1, 2, \dots, k-2$; $j = 1, 2, \dots, l-2$

$$\mathbf{N}_{i,j}(u,v) = \mathbf{r}_{i,j}^u(u,v) \times \mathbf{r}_{i,j}^v(u,v) \quad (4.38)$$

$$\mathbf{n}_{i,j}(u,v) = \frac{\mathbf{N}(u,v)}{|\mathbf{N}(u,v)|} \quad (4.39)$$

Com : $0 \leq u, v \leq 1$; $i = 1, 2, \dots, k - 2$; $j = 1, 2, \dots, l - 2$

4.2.3 – Obtenção da descrição paramétrica da superfície danificada

A superfície afetada por cavitação $s_{ij}(o,w)$ 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: $p(u,v)$, com $u = 1/(k-2), 2/(k-2), \dots, (k-3)/(k-2)$ e $v = 1/(l-2), 2/(l-2), \dots, (l-3)/(l-2)$.

Sua equação é definida de forma similar ao apresentado anteriormente para a superfície original, ou seja:

$$s_{i,j}(o,w) = \begin{bmatrix} N_{4,0}(o) & N_{4,1}(o) & N_{4,2}(o) & N_{4,3}(o) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} N_{4,0}(w) \\ N_{4,1}(w) \\ N_{4,2}(w) \\ N_{4,3}(w) \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Com : $0 \leq o, w \leq 1$; $i = 1, 2, \dots, k - 2$; $j = 1, 2, \dots, l - 2$

A superfície danificada $s_{ij}(o,w)$, conforme mostra a figura 4.9, possui uma curva limite fechada que separa a região cavitada da não afetada pela cavitação.

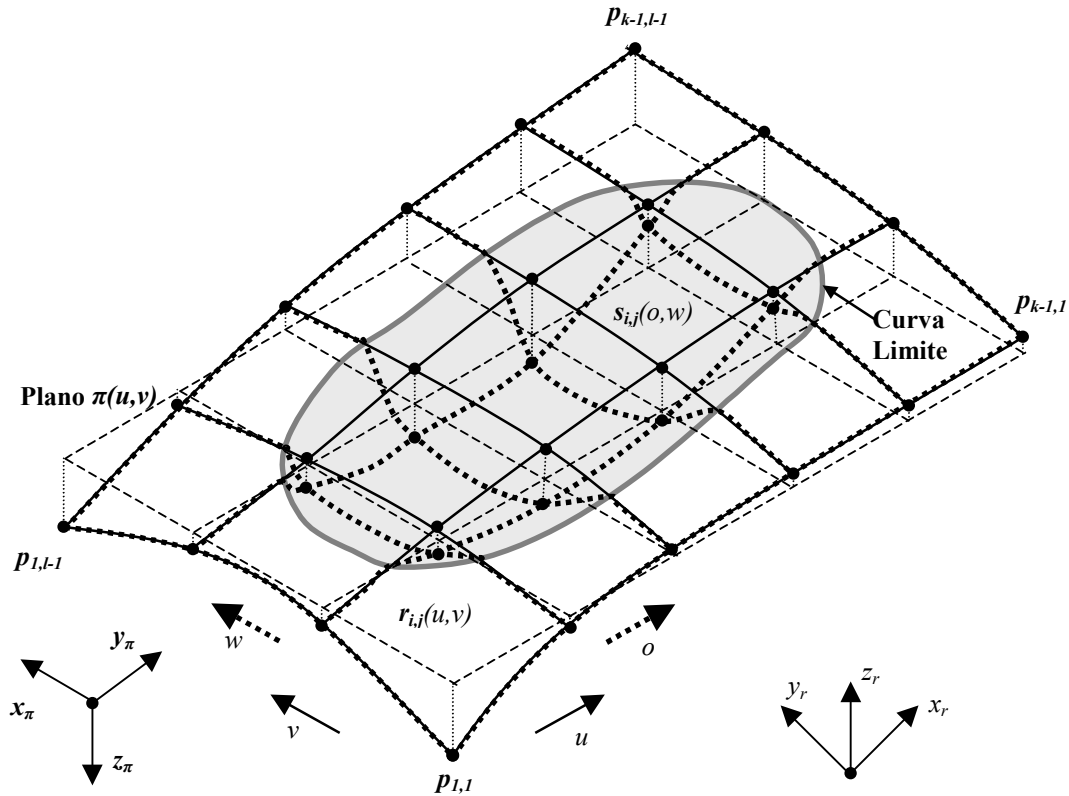


Figura 4.9 – Curva limite entre região cavitada e não afetada pela cavitação.

4.2.4 – Determinação da localização inicial dos cordões de solda

Existem varias técnicas desenvolvidas para geração de trajetórias de ferramentas em usinagem de superfícies [52,61], tais como: *iso-parametric*, *iso-planar*, *iso-scallop*, etc... Como o processo de soldagem de superfícies se distingue, em alguns aspectos estruturais e operacionais do processo de usinagem, foi decidido desenvolver, neste trabalho, uma nova técnica de geração de trajetórias melhor adaptada às especificidades do processo de soldagem.

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 , conforme mostra a figura 4.10. 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 apenas pelo conjunto de cordões ímpares, enquanto que, as camadas de soldagem pares são formadas 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 ($L/2$), como mostra a figura 4.10.

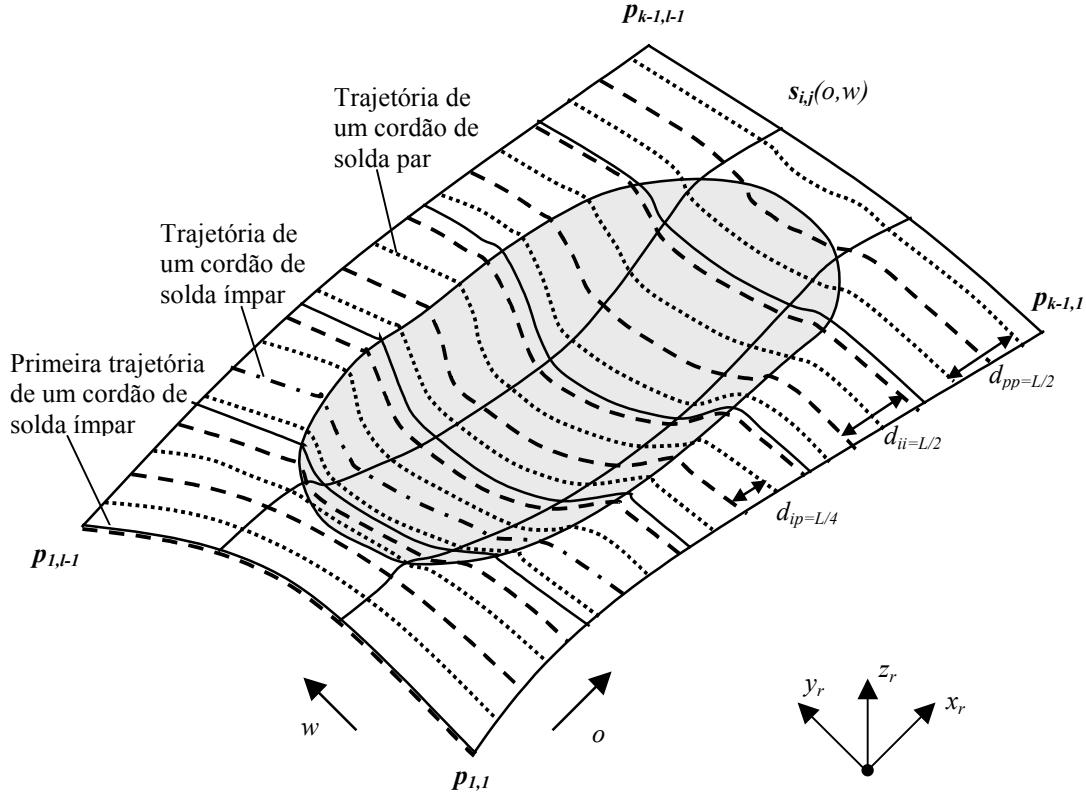


Figura 4.10 – Localização inicial dos pontos pertencentes às trajetórias dos cordões de solda.

A primeira trajetória, referida ao primeiro cordão de solda ímpar, é formada pelos pontos pertencentes a curva $s_{i,j}(0,w)$, com $j=1, 2, \dots, l-1$ e $w=0, \Delta w, \dots, l$. A segunda trajetória, referida ao primeiro cordão de solda par, e as próximas trajetórias, são determinadas através de um algoritmo matemático desenvolvido que utiliza a posição dos pontos pertencentes a trajetória anterior.

Este algoritmo estabelece, em primeiro lugar, a equação de um plano λ que passe por um ponto conhecido $p^*(o,w)$ da trajetória anterior e que seja perpendicular, neste ponto, ao vetor tangente p^{*w} , conforme mostra a figura 4.11. Em segundo lugar, uma superfície esférica γ , é estabelecida com centro no ponto conhecido $p^*(o,w)$ e raio igual à distância entre as trajetórias de dois cordões de solda adjacentes d_{ip} .

O respectivo ponto $p^{**}(o,w)$, sobre a trajetória do próximo cordão de solda, é obtido através da interseção das seguintes superfícies: pedaço de superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$ onde esta localizado o ponto p^* , plano λ e superfície esférica γ . As equações destas superfícies são expressas por:

$$\text{Superfície } s_{i,j} : s_{i,j}(o,w) = [x_{i,j}(o,w) \quad y_{i,j}(o,w) \quad z_{i,j}(o,w)] \quad (4.41)$$

$$\text{Plano } \lambda : d_0 \cdot x + d_1 \cdot y + d_2 \cdot z + d_3 = 0 \quad (4.42)$$

$$\text{Esfera } \gamma : (x - x_*)^2 + (y - y_*)^2 + (z - z_*)^2 - d_{ip}^2 = 0 \quad (4.43)$$

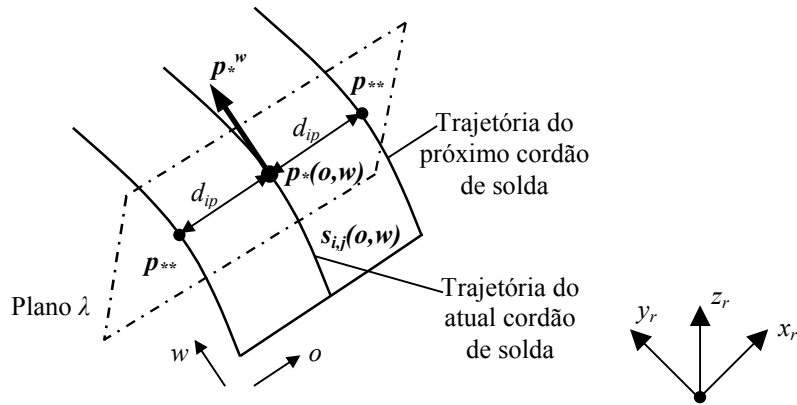


Figura 4.11 – Determinação dos pontos da trajetória de um cordão de solda.

Substituindo a equação 4.41 em 4.42 e 4.43 se obtém o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} f_1(o,w) = d_0 \cdot x_{i,j}(o,w) + d_1 \cdot y_{i,j}(o,w) + d_2 \cdot z_{i,j}(o,w) + d_3 = 0 \\ f_2(o,w) = (x_{i,j}(o,w) - x_*)^2 + (y_{i,j}(o,w) - y_*)^2 + (z_{i,j}(o,w) - z_*)^2 - d_{ip}^2 = 0 \end{cases} \quad (4.44)$$

Com : $0 \leq o, w \leq l$

O método de solução de Newton-Raphson [49] é empregado para resolver o sistema definido pelas equações 4.44. A solução deste sistema, composto de duas equações e duas incógnitas, é buscada através de um certo número de iterações n_i .

$$o^{q+1} = o^q - \frac{Do}{D} \quad ; \quad w^{q+1} = w^q - \frac{Dw}{D} \quad (4.45)$$

Com : $o^l = l$, $w^l = w$ do ponto p^* e $q = l, 2, \dots, n_i$

Onde os determinantes D , Do e Dw são obtidos da seguinte forma:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial o} & \frac{\partial f_1}{\partial w} \\ \frac{\partial f_2}{\partial o} & \frac{\partial f_2}{\partial w} \end{vmatrix} ; \quad Do = \begin{vmatrix} f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial w} \\ f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial w} \end{vmatrix} ; \quad Dw = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial o} & f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial o} & f_2 \end{vmatrix} \quad (4.46)$$

Através deste algoritmo matemático desenvolvido é obtido o ponto $\mathbf{p}^{**}(o,w)$, sobre o próximo cordão de solda. Se o parâmetro obtido o do ponto $\mathbf{p}^{**}(o,w)$ encontrado for maior que o parâmetro o do ponto $\mathbf{p}^*(u,v)$ significa que esta solução é válida. Mas, se o parâmetro o não for encontrado ou for menor que o parâmetro o do ponto $\mathbf{p}^*(o,w)$ significa que o ponto $\mathbf{p}^{**}(o,w)$ procurado pode estar localizado em um dos seguintes pedaços de superfície: $s_{i,j-1}(o,w)$, $s_{i,j+1}(o,w)$, $s_{i+1,j-1}(o,w)$, $s_{i+1,j}(o,w)$ e $s_{i+1,j+1}(o,w)$. Neste caso deve ser reformulado o sistema de equações 4.44 afim de se obter a solução desejada.

4.2.5 – Determinação do número de camadas de soldagem

Para cada ponto $\mathbf{p}^*(o,w)$, pertencente à superfície danificada $s_{i,j}(o,w)$, é determinada, na direção de seu respectivo vetor normal unitário $\mathbf{n}^*(o,w)$, a sua distância em relação à superfície original reconstruída $\mathbf{r}_{i,j}(u,v)$. Esta distância é o próprio valor do parâmetro t no ponto de interseção (t^*) entre: a reta $\mathbf{r}_{p^*}(t)$ que passa pelo ponto $\mathbf{p}^*(o,w)$, com direção do vetor normal unitário $\mathbf{n}^*(o,w)$ e a superfície original reconstruída $\mathbf{r}_{i,j}(u,v)$. Suas equações são expressas por:

$$\text{Reta } \mathbf{r}_{p^*} : \mathbf{r}_{p^*}(t) = \begin{bmatrix} x_{p^*}(t) & y_{p^*}(t) & z_{p^*}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p^*} + nx_{p^*} \cdot t & y_{p^*} + ny_{p^*} \cdot t & z_{p^*} + nz_{p^*} \cdot t \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$$\text{Superfície } \mathbf{r}_{i,j} : \mathbf{r}_{i,j}(u,v) = \begin{bmatrix} x_{i,j}(u,v) & y_{i,j}(u,v) & z_{i,j}(u,v) \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Igualando as equações 4.47 e 4.48, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} f_1(t,u,v) = x_{p^*} + nx_{p^*} \cdot t - x_{i,j}(u,v) = 0 \\ f_2(t,u,v) = y_{p^*} + ny_{p^*} \cdot t - y_{i,j}(u,v) = 0 \\ f_3(t,u,v) = z_{p^*} + nz_{p^*} \cdot t - z_{i,j}(u,v) = 0 \end{cases} \quad (4.49)$$

Com : $0 \leq u, v \leq l$

Novamente, o método de solução de Newton-Raphson [49], é empregado para resolver o sistema definido pelas equações 4.49. A solução deste sistema, composto de três equações e três incógnitas, é buscada através de um certo número de iterações n_i :

$$\mathbf{t}^{q+1} = \mathbf{t}^q - \frac{D\mathbf{t}}{D} \quad ; \quad \mathbf{u}^{q+1} = \mathbf{u}^q - \frac{Du}{D} \quad ; \quad \mathbf{v}^{q+1} = \mathbf{v}^q - \frac{Dv}{D} \quad (4.50)$$

Com : $t^l = 0$, $u^l = v^l = 0,5$ e $q = 1, 2, \dots, n_i$

Onde os determinantes D , Dt , Du e Dv são obtidos da seguinte forma:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & \frac{\partial f_3}{\partial u} & \frac{\partial f_3}{\partial v} \end{vmatrix}; Dt = \begin{vmatrix} f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \\ f_3 & \frac{\partial f_3}{\partial u} & \frac{\partial f_3}{\partial v} \end{vmatrix}; Du = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial v} \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & f_3 & \frac{\partial f_3}{\partial v} \end{vmatrix}; Dv = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & \frac{\partial f_1}{\partial u} & f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & \frac{\partial f_2}{\partial u} & f_2 \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & \frac{\partial f_3}{\partial u} & f_3 \end{vmatrix} \quad (4.51)$$

A distância máxima t_m , entre os pontos $\mathbf{p}^*(o,w)$ e à superfície original reconstruída $\mathbf{r}_{ij}(u,v)$, é obtida mediante a verificação do maior parâmetro t^* entre todos os elementos do conjunto de parâmetros t^* dos respectivos pontos de interseção. Por sua vez, o número de camadas de soldagem nc , figura 4.12, é determinado através da seguinte equação:

$$nc = \text{ceil} \left(\frac{t_m + 0,5 \cdot \Delta h}{h_{méd}} \right) \quad (4.52)$$

Onde:

- $h_{méd}$: altura média da camada de solda (mm);
- Δh : ondulação da camada de solda (mm);
- ceil : função de arredondamento numérico que resulta num valor inteiro na direção de mais infinito.

4.2.6 – Determinação das trajetórias de soldagem

As trajetórias de soldagem definitivas, para cada camada ($cs=1, 2, \dots, nc$), são determinadas a partir do deslocamento dos pontos $\mathbf{p}^*(o,w)$ pertencentes as trajetórias iniciais correspondentes, na direção de seus respectivos vetores normais unitários $\mathbf{n}^*(o,w)$, conforme mostra a figura 4.12.

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

$$t_* > h_{méd} \cdot (cs - 1) \quad (4.53)$$

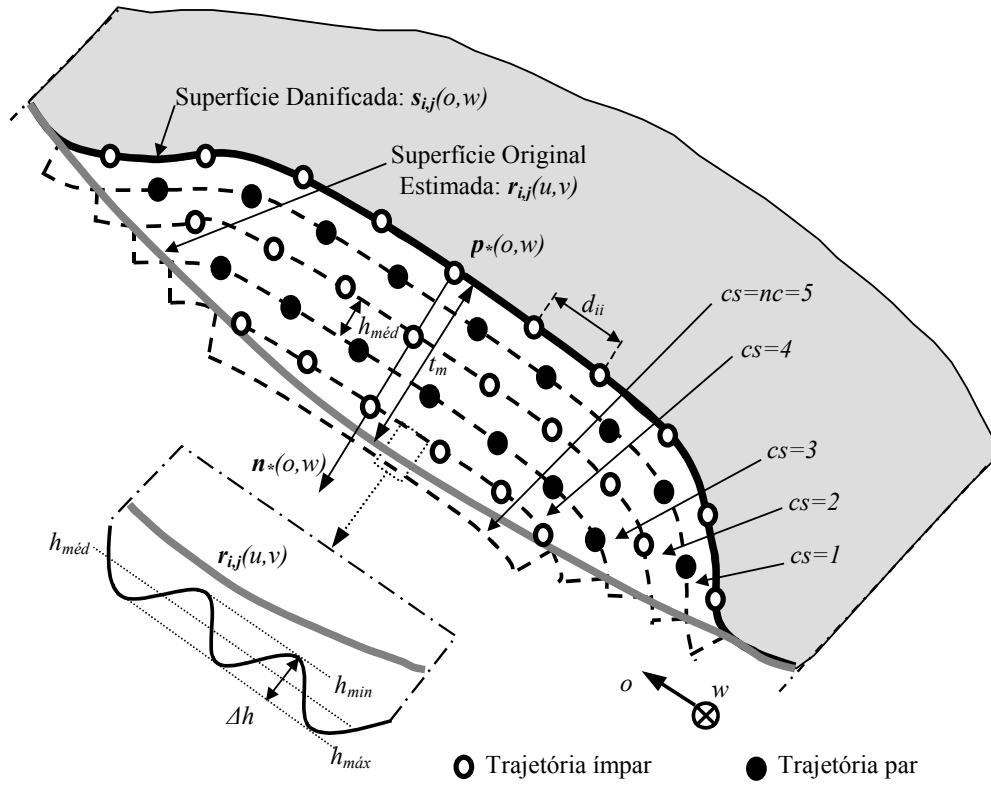


Figura 4.12 – Seção transversal das camadas de soldagem e trajetórias definitivas.

Cada camada de soldagem é realizada no sentido o da superfície danificada $s_{ij}(o, w)$. 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 $0_{I-X_I Y_I Z_I}$ sobre a posição dos pontos pertencente à trajetória definitiva dos mesmos.

O vetor normal Vn em um ponto da trajetória de soldagem, figura 4.13, é obtido através do produto vetorial entre o vetor binormal Vb e o vetor tangente Vt . Por sua vez, os vetores unitários de orientação da tocha de soldagem são obtidos da seguinte forma:

- O vetor binormal unitário vb é obtido a partir do vetor binormal Vb , porém com sentido contrário;
- O vetor normal unitário vn é o resultado da rotação de ΘI , do vetor normal Vn ao redor do vetor binormal unitário vb ;
- O vetor tangente unitário vt é resultado do produto vetorial entre os vetores vb e vn .

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 $\mathbf{vt}$, $\mathbf{vb}$ e $\mathbf{vn}$, como mostra a figura 4.13.

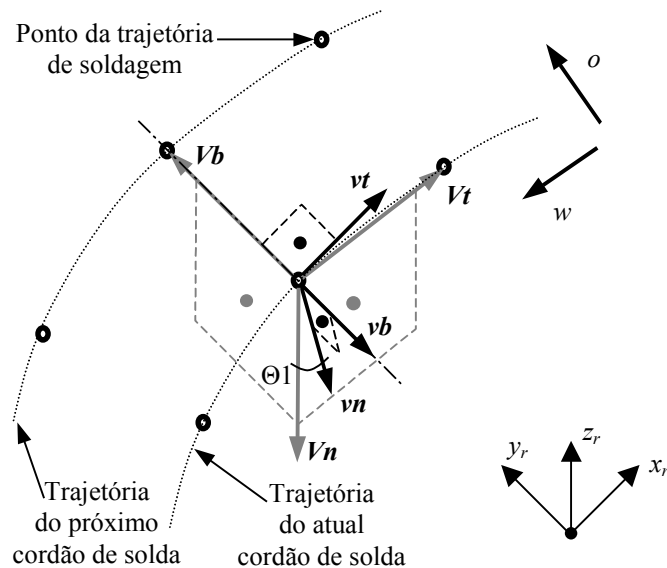


Figura 4.13 – Posição e orientação das trajetórias de soldagem de cada camada.

Cada elemento de uma trajetória de soldagem definitiva é formado por uma sequência dos seguintes parâmetros fornecidos ao robô: (a) as coordenadas de cada ponto deslocado $\mathbf{p}^*(o,w)$, (b) a orientação fornecida pelos vetores unitários $\mathbf{vt}$, $\mathbf{vb}$ e $\mathbf{vn}$, (c) a velocidade de soldagem v_s ou a velocidade de retorno para o próximo cordão de solda, (d) o comando de acionamento ou desacionamento da fonte de soldagem microprocessada e (e) o tempo de espera do movimento do robô no início de cada cordão de solda.

4.3 – Qualificação geométrica de superfícies recuperadas

O processo de qualificação geométrica tem como objetivo aceitar ou não uma superfície recuperada do ponto de vista geométrico e, também identificar regiões recuperadas que necessitam de esmerilhamento mais ou menos intenso, ou ainda, adição de material via soldagem. Numa avaliação geral de uma recuperação, além da verificação geométrica, deve-se ainda realizar uma verificação da existência ou não de descontinuidades, como poros, trincas, falta de fusão e inclusão de escórias, no material depositado por soldagem. Este processo de qualificação geométrica é aqui estruturado em uma sequência de três etapas:

- Determinação da trajetória de medição da superfície recuperada;
- Obtenção da descrição paramétrica da superfície recuperada;
- Avaliação geométrica da recuperação.

A seguir cada uma destas etapas é descrita em detalhes.

4.3.1 – Determinação da trajetória de medição da superfície recuperada

A figura 4.14 mostra a trajetória, do tipo zig-zag, utilizada para realizar, através do sensor óptico de três linhas, a medição automatizada da superfície recuperada. Cada elemento desta trajetória é composto por uma seqüência dos seguintes parâmetros fornecidos ao robô: (a) as coordenadas de cada ponto interpolado $pi(u,v)$ pertencente à superfície reconstruída $r_{ij}(u,v)$, (b) a orientação fornecida pelos vetores unitários tangente e normal da superfície reconstruída $r_{ij}(u,v)$ em cada ponto $pi(u,v)$, (c) a velocidade de execução da trajetória e (d) o tempo de aquisição em cada ponto $pi(u,v)$ da trajetória.

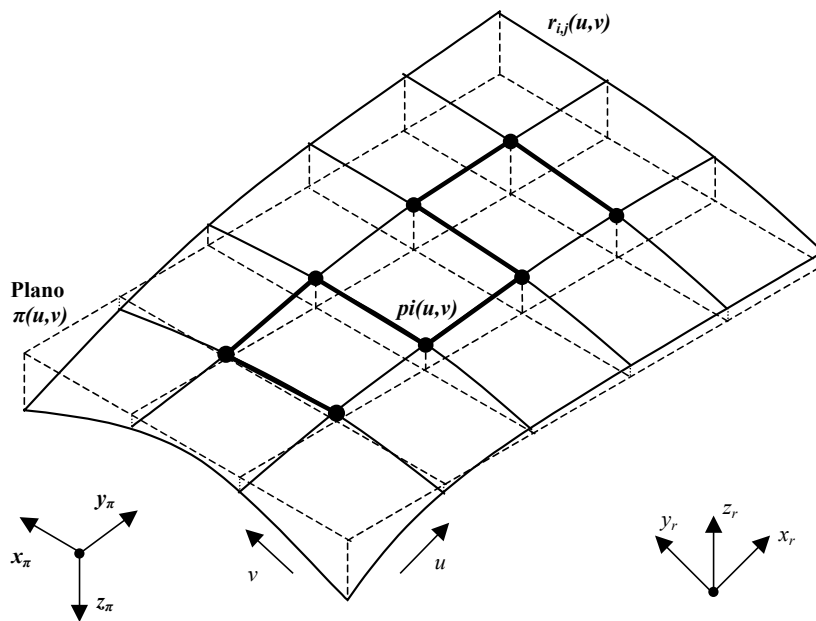


Figura 4.14 – Trajetória de medição da superfície recuperada.

4.3.2 – Obtenção da descrição paramétrica da superfície recuperada

A superfície recuperada $k_{ij}(e,h)$ é obtida utilizando o mesmo conjunto de parâmetros do contorno que envolve a superfície original, mais o conjunto de pontos representantes obtidos durante a execução da trajetória de medição da superfície recuperada. Sua equação é definida de forma similar ao apresentado anteriormente para a superfície original, ou seja:

$$k_{ij}(e,h) = \begin{bmatrix} N_{4,0}(e) & N_{4,1}(e) & N_{4,2}(e) & N_{4,3}(e) \end{bmatrix} \cdot K_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} N_{4,0}(h) \\ N_{4,1}(h) \\ N_{4,2}(h) \\ N_{4,3}(h) \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Com : $0 \leq e, h \leq l$; $i = 1, 2, \dots, k-2$; $j = 1, 2, \dots, l-2$

4.3.3 – Avaliação geométrica da recuperação

Para avaliar geometricamente uma recuperação é necessário, em primeiro lugar, estabelecer um conjunto de pontos $\mathbf{pr}(u,v)$ distribuídos de forma homogênea sobre a superfície original estimada $\mathbf{r}_{i,j}(u,v)$.

Para cada ponto $\mathbf{pr}(u,v)$, pertencente à superfície original estimada $\mathbf{r}_{i,j}(u,v)$, é determinada, na direção de seu respectivo vetor normal unitário $\mathbf{nr}(u,v)$, a sua distância em relação à superfície recuperada $\mathbf{k}_{i,j}(e,h)$. Esta distância é o próprio valor do parâmetro t no ponto de interseção ti entre: a reta $\mathbf{r}(t)$ que passa pelo ponto $\mathbf{pr}(u,v)$, com direção do vetor normal unitário $\mathbf{nr}(u,v)$ e à superfície recuperada $\mathbf{k}_{i,j}(e,h)$. Suas equações são expressas por:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} xpr(u,v) + nr_x(u,v) \cdot t & ypr(u,v) + nr_y(u,v) \cdot t & zpr(u,v) + nr_z(u,v) \cdot t \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$\mathbf{k}_{i,j}(e,h) = \begin{bmatrix} x_{i,j}(e,h) & y_{i,j}(e,h) & z_{i,j}(e,h) \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Igualando as equações 4.55 e 4.56, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} f_1(t,e,h) = xpr(u,v) + nr_x(u,v) \cdot t - x_{i,j}(e,h) = 0 \\ f_2(t,e,h) = ypr(u,v) + nr_y(u,v) \cdot t - y_{i,j}(e,h) = 0 \\ f_3(t,e,h) = zpr(u,v) + nr_z(u,v) \cdot t - z_{i,j}(e,h) = 0 \end{cases} \quad (4.57)$$

Com : $0 \leq e, h \leq 1$

Outra vez, o método de solução de Newton-Raphson [49], é empregado para resolver o sistema definido pelas equações 4.57. A solução deste sistema, composto de três equações e três incógnitas, é buscada através de um certo número de iterações n_i :

$$t^{q+1} = t^q - \frac{Dt}{D} \quad ; \quad e^{q+1} = e^q - \frac{De}{D} \quad ; \quad h^{q+1} = h^q - \frac{Dh}{D} \quad (4.58)$$

Com : $t^1 = 0, e^1 = h^1 = 0,5$ e $q = 1, 2, \dots, n_i$

Onde os determinantes D, Dt, De e Dh são obtidos da seguinte forma:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & \frac{\partial f_1}{\partial e} & \frac{\partial f_1}{\partial h} \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & \frac{\partial f_2}{\partial e} & \frac{\partial f_2}{\partial h} \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & \frac{\partial f_3}{\partial e} & \frac{\partial f_3}{\partial h} \end{vmatrix}; Dt = \begin{vmatrix} f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial e} & \frac{\partial f_1}{\partial h} \\ f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial e} & \frac{\partial f_2}{\partial h} \\ f_3 & \frac{\partial f_3}{\partial e} & \frac{\partial f_3}{\partial h} \end{vmatrix}; De = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial h} \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial h} \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & f_3 & \frac{\partial f_3}{\partial h} \end{vmatrix}; Dh = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial t} & \frac{\partial f_1}{\partial e} & f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} & \frac{\partial f_2}{\partial e} & f_2 \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} & \frac{\partial f_3}{\partial e} & f_3 \end{vmatrix} \quad (4.59)$$

Uma recuperação é classificada como excelente do ponto de vista geométrico, quando todas as distâncias ti entre os pontos $pr(u,v)$, pertencente a superfície reconstruída $r_{ij}(u,v)$, e a superfície recuperada $k_{ij}(e,h)$ satisfazem a seguinte relação:

$$0 \leq ti \leq h_{m\acute{a}x} \quad (4.60)$$

O excesso de metal depositado por soldagem é verificado quando o valor da distância de um ou mais ti forem superiores a altura máxima de um cordão de solda $h_{m\acute{a}x}$. Neste caso, a recuperação é aceita porém, o esmerilhamento em algumas regiões da superfície recuperada deve ser mais intenso com o intuito de se aproximar da superfície reconstruída.

Por outro lado, a falta de metal depositado é verificada quando o valor da distância de um ou mais ti forem negativos. Nesta situação, a recuperação realizada não é aceita e deve-se retornar novamente ao início da metodologia proposta, isto é, medição inicial ou realizar a deposição de material por soldagem manual nas regiões com falta de material.

4.4 – Síntese deste capítulo

Ambas as trajetórias de medição automatizada, da superfície danificada e da superfície recuperada, são do tipo zig-zag e cada ponto destas trajetórias são descritos por um conjunto dos seguintes parâmetros: (a) as coordenadas do ponto, (b) a orientação do sensor óptico de três linhas, (c) a velocidade de execução da trajetória e (d) o tempo de aquisição.

As trajetórias de soldagem de cada camada possuem um único sentido de execução e cada ponto destas trajetórias é descrito por um conjunto dos seguintes parâmetros: (a) as coordenadas do ponto, (b) a orientação da tocha de solda plasma, (c) a velocidade de soldagem (d) o comando de acionamento ou desacionamento da fonte de soldagem e (e) o tempo de espera do movimento do robô no início de cada cordão de solda.

A defasagem existente entre as trajetórias dos cordões de solda de duas camadas adjacentes tem como objetivo proporcionar uma menor ondulação da superfície formada pelos cordões de solda da mesma camada.

Uma superfície recuperada é aceita, do ponto de vista geométrico, se a diferença, em todos os pontos avaliados, entre esta superfície recuperada e a superfície original reconstruída for positiva, ou seja, existe sobre-metal.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os principais equipamentos utilizados e as características do corpo de prova empregado para avaliar experimentalmente a sistemática concebida. Toda a metodologia, desenvolvida e descrita no capítulo anterior, é aqui aplicada através de algoritmos computacionais implementados em ambiente de programação Matlab. São também apresentados, ao final deste capítulo, os experimentos realizados e os respectivos resultados obtidos.

5.1 - Descrição da bancada

No âmbito do projeto Roboturb, no qual este trabalho está inserido, foi decidido recuperar um outro robô industrial de seis graus de liberdade da fundação CERTI, figura 5.1, denominado de Reis RV-15. A finalidade desta recuperação foi acelerar o desenvolvimento do projeto Roboturb através da criação de mais uma frente de trabalho, ou seja, enquanto uma frente de trabalho valida, com o robô desenvolvido no projeto Roboturb, os algoritmos de cinemática direta e inversa, do trilho moldável e de colisão a outra frente de trabalho, com o robô Reis RV-15, implementa a metodologia desenvolvida de recuperação de superfícies danificadas.



Figura 5.1 - Robô Reis Rv-15, armário de acionamento e microcomputador ao fundo.

Os dispositivos mecânicos do robô Reis RV-15 encontravam-se em perfeitas condições de uso, enquanto que, os circuitos elétricos e eletrônicos estavam danificados.

Diante desta situação, foram executadas, no âmbito deste trabalho, as seguintes ações para viabilizar a recuperação do robô Reis RV-15:

- Documentação e manutenção dos circuitos elétricos responsáveis pela lógica de acionamento do robô;
- Recuperação das placas eletrônicas de potência responsáveis pela amplificação dos sinais de comando e acionamento dos motores elétricos;
- Substituição das placas eletrônicas de controle, comando, realimentação, entrada e saídas digitais por duas placas de controle de movimentos, PCI-7344 da *National Instrument*, alocadas no barramento do microcomputador, Pentium 4, que gerencia as tarefas a serem executadas pelo robô;
- Desenvolvimento dos programas, em linguagem de programação C++, relativo ao novo sistema operacional do robô.

A fonte de soldagem microprocessada MTE Digitec 600 e o módulo plasma, figura 5.2, juntamente com o sensor óptico a laser de três linhas e a tocha de soldagem plasma PWH-4A 70° com alimentação automática de arame, figura 5.3, completam a lista dos principais equipamentos da bancada implementada.

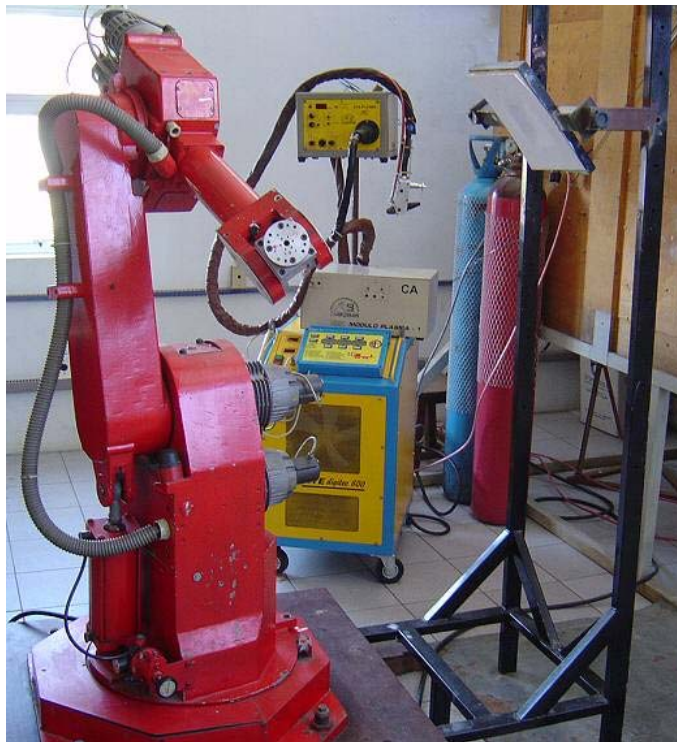


Figura 5.2 – Fonte de soldagem microprocessada e módulo plasma.



Figura 5.3 – Efetuadores do rôbo Reis: (a) Sensor óptico de três linhas e (b) Tocha plasma

5.2 - Descrição do corpo de prova

Com o objetivo de validar a metodologia proposta foi confeccionado, um corpo de prova em uma fresadora CNC, figura 5.4, com características geométricas e de composição química, semelhantes às superfícies danificadas encontradas em rotores de turbinas hidráulicas de grande porte.

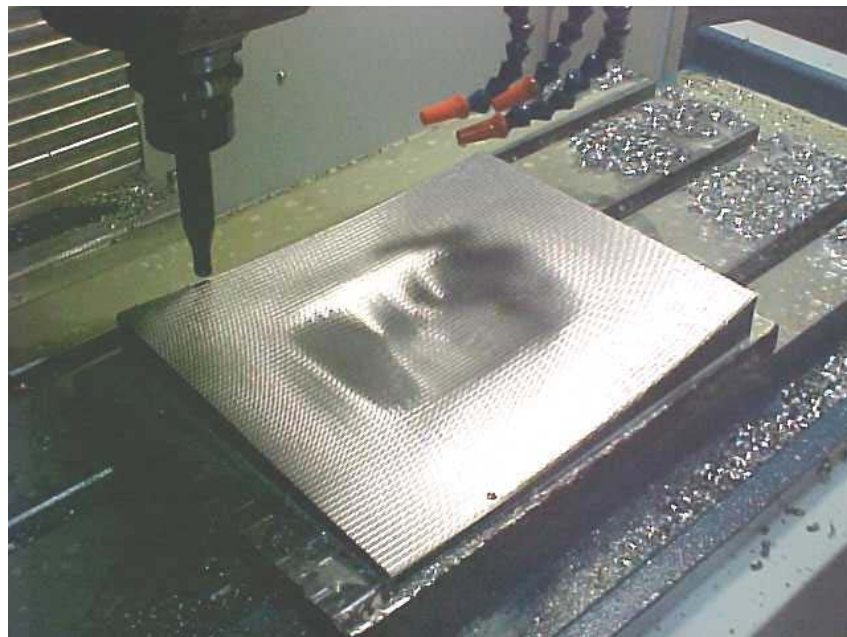


Figura 5.4 – Vista frontal do corpo de prova sendo usinado.

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 8,5 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 5.5. A finalidade destas vigas é aumentar a rigidez do conjunto e minimizar as deformações causadas pela soldagem no corpo de prova.

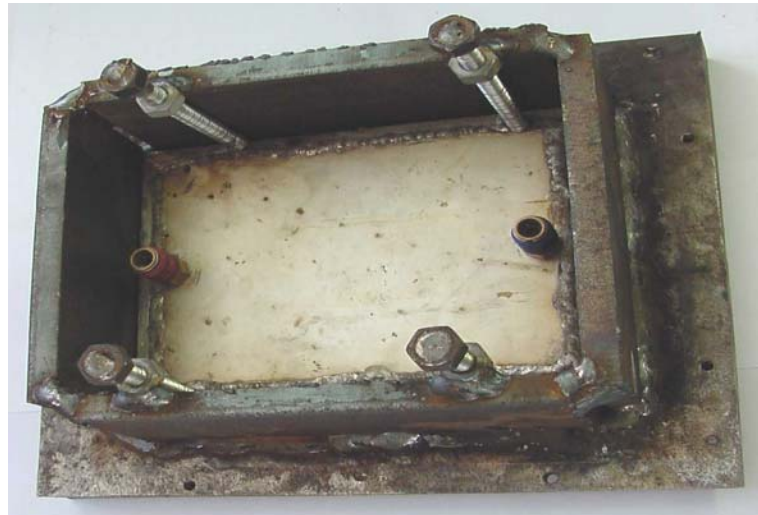


Figura 5.5 – Vista da parte de trás do corpo de prova.

O corpo de prova é também refrigerado através de um trocador de calor por onde circula água, fixado por quatro parafusos, como mostra a figura 5.5, 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.

5.3 – Resultados obtidos

Inicialmente o corpo de prova é fixado, como mostra a figura 5.2, na posição sobrecabeça com uma inclinação de 45° em relação ao plano horizontal, através de parafusos, em uma estrutura metálica que, por sua vez, está presa à base do robô Reis.

Com o sensor óptico de três linhas fixado ao robô Reis, figura 5.3 (a), foi realizado a medição inicial (figura 5.6) 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 e a reta que passa pelos pontos, em vermelho, definem a direção dos cordões de solda.

A figura 5.7 apresenta o plano parametrizado que limita a região de operação, estabelece o número de medições a serem realizadas e fornece a orientação para a aquisição dos pontos de forma automatizada. A figura 5.8 mostra a trajetória, do tipo zig-zag, para realizar a medição automatizada da cavidade do corpo de prova.

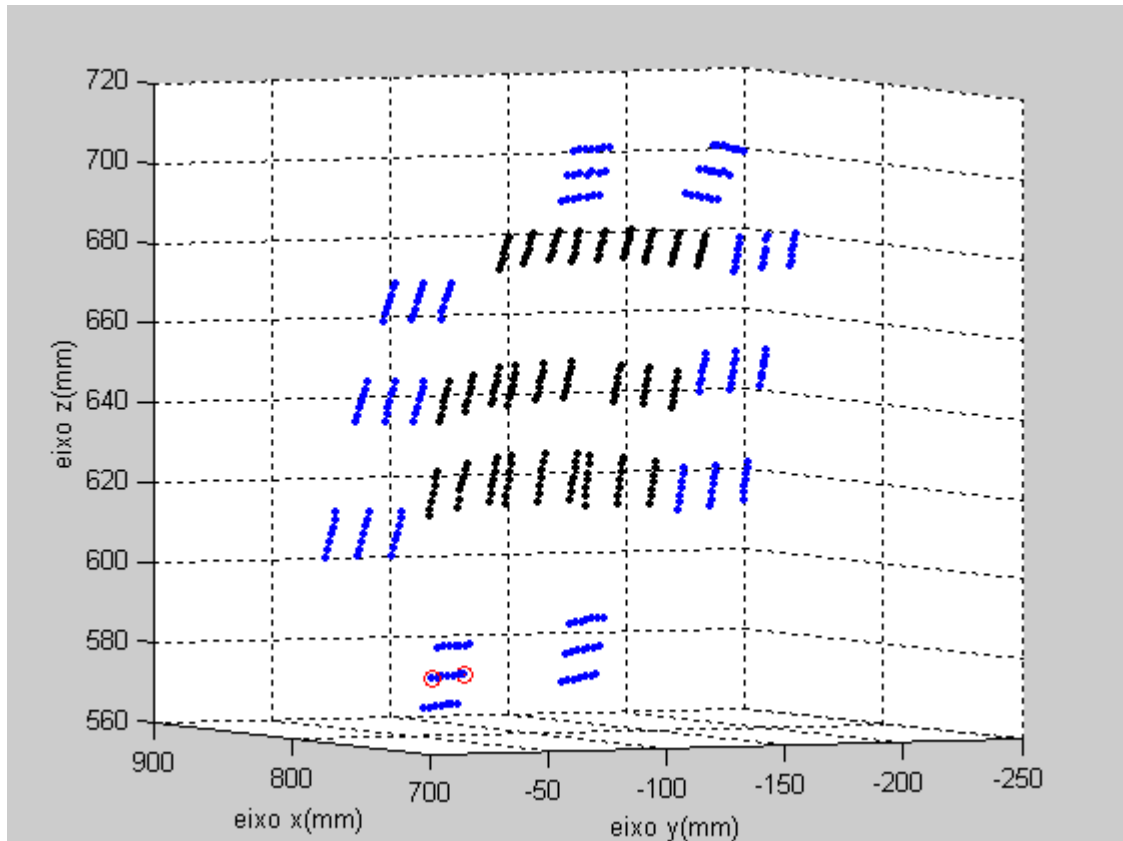


Figura 5.6 - Medição inicial da superfície danificada: região externa e interna.

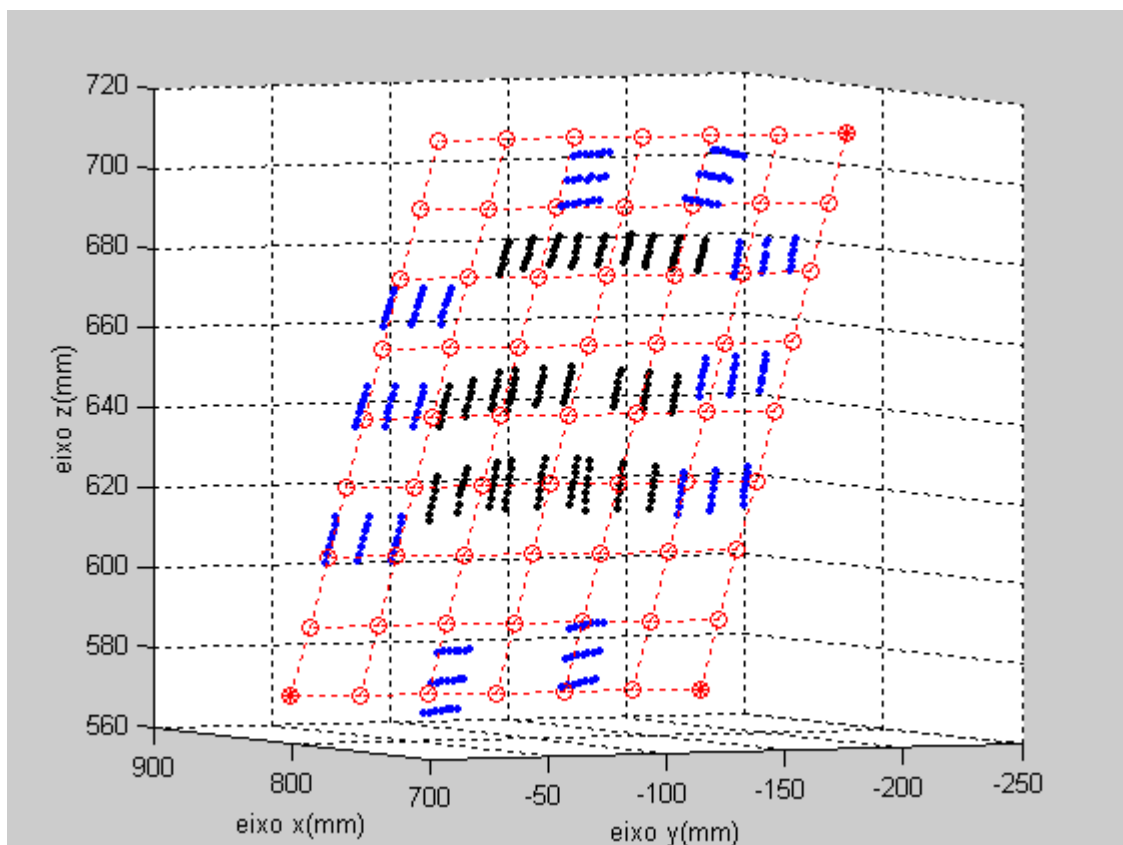


Figura 5.7 - Malhas e nós do plano parametrizado.

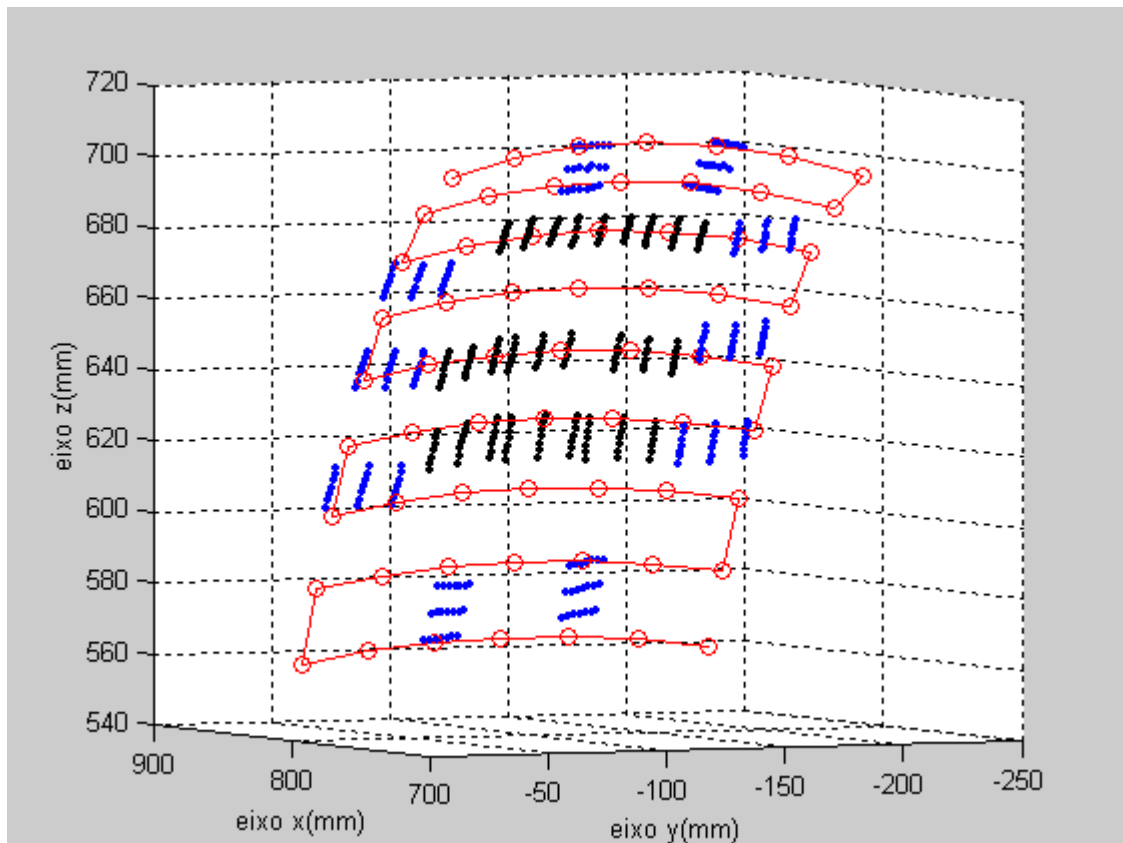


Figura 5.8 - Trajetória para efetuar a medição automatizada da superfície danificada.

As superfícies danificada e original reconstruída, figuras 5.10 e 5.11, foram determinadas a partir do conjunto de pontos obtidos na medição automatizada, figura 5.9. A máxima profundidade existente, calculada a partir da diferença entre a superfície original reconstruída e a superfície danificada, foi de 8,4 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.

As figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram a superfície danificada e a localização dos pontos, em preto, referentes às trajetórias dos cordões de solda da primeira, segunda e terceira camada de soldagem.

Com a tocha de soldagem plasma fixada ao robô Reis, figura 5.3 (b), 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 5.12 a 5.14.

As excelentes camadas de soldagem obtidas, figuras 5.15 a 5.17, foram realizadas segundo os parâmetros e as estratégias de soldagem descritos no terceiro capítulo deste trabalho.

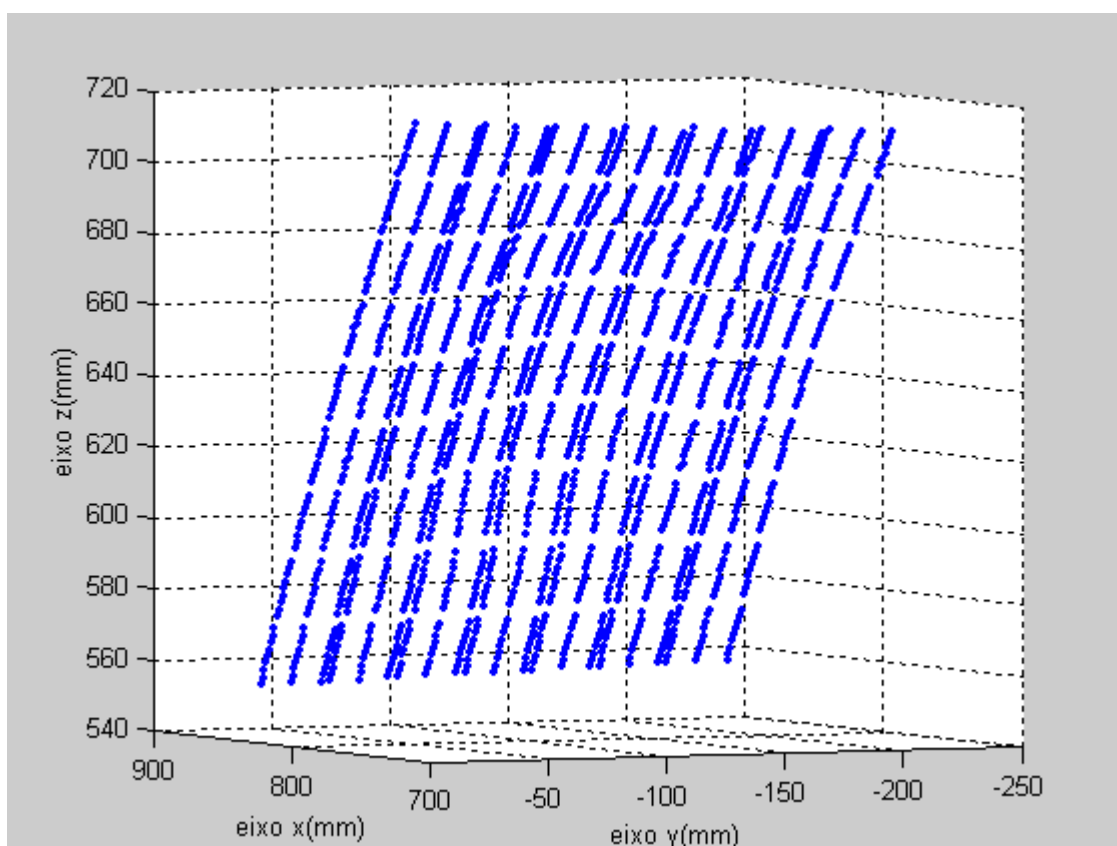


Figura 5.9 - Pontos obtidos da medição automatizada.

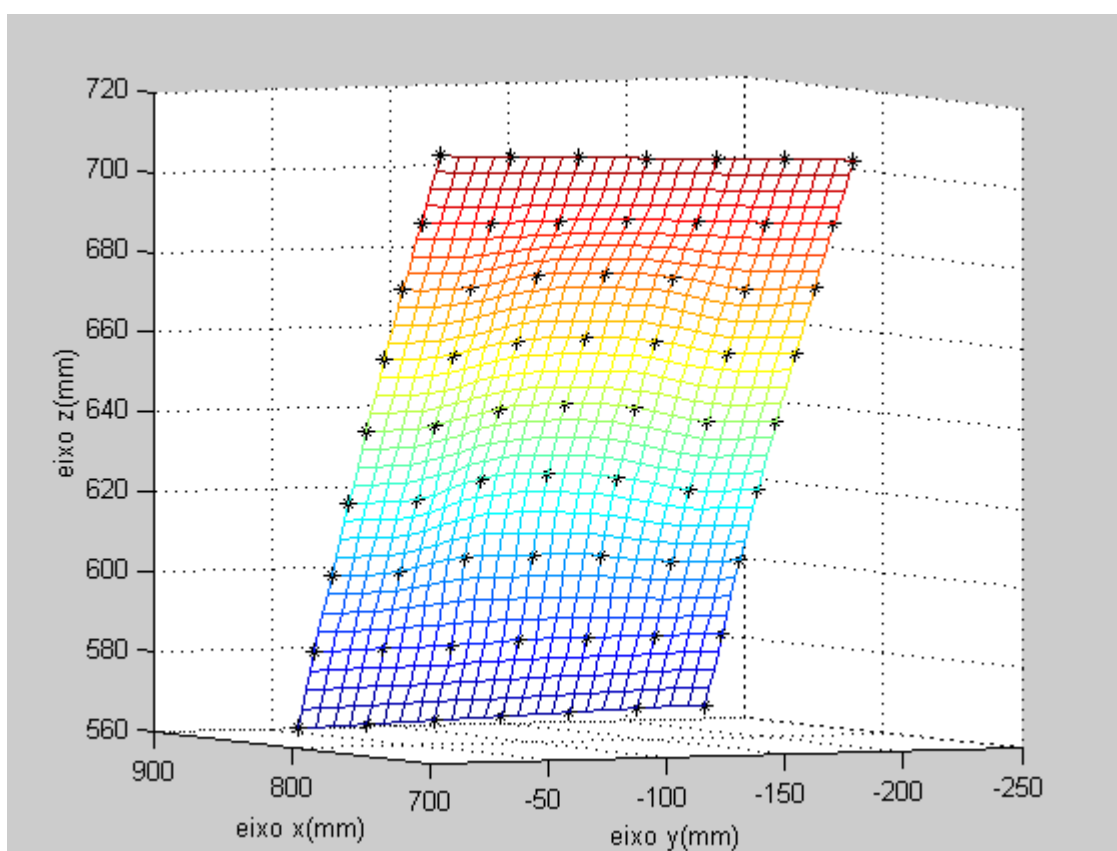


Figura 5.10 – Representação da superfície danificada e seus pontos representantes.

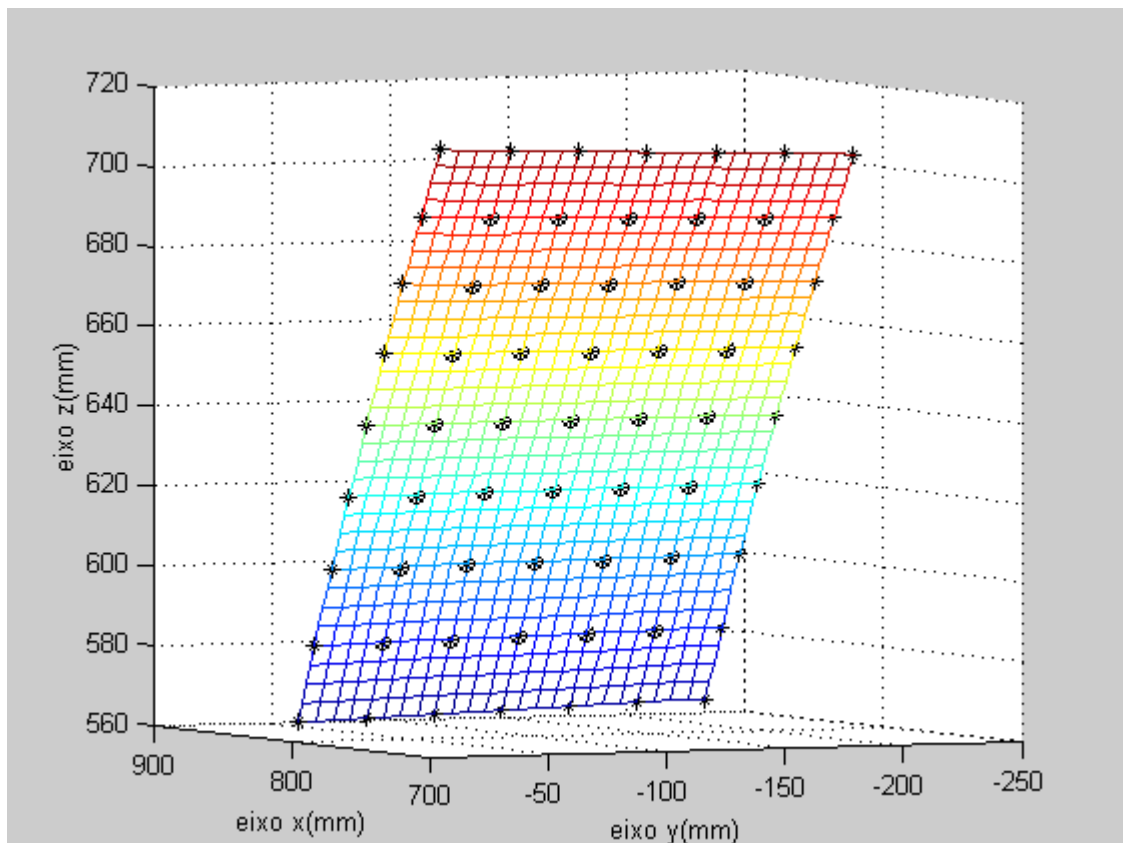


Figura 5.11 – Representação da superfície original reconstruída com seus pontos representantes e interpolados.

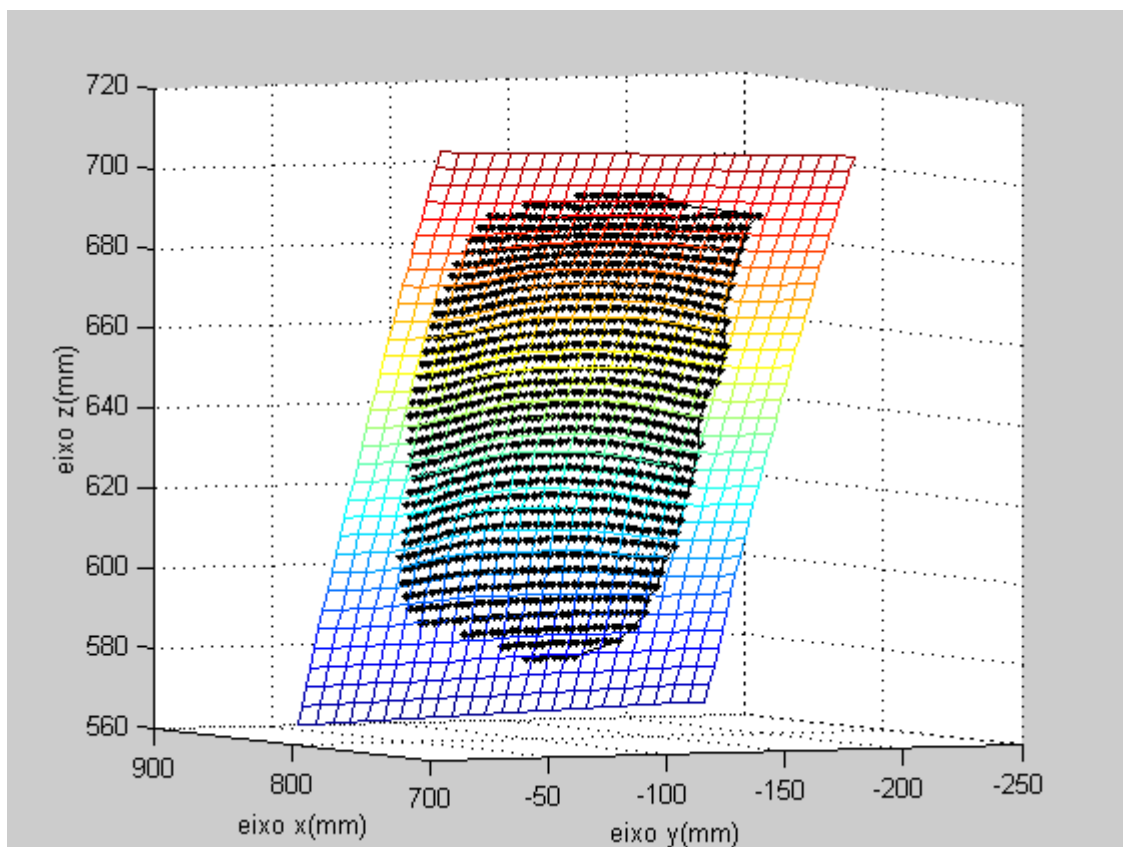


Figura 5.12 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à primeira camada.

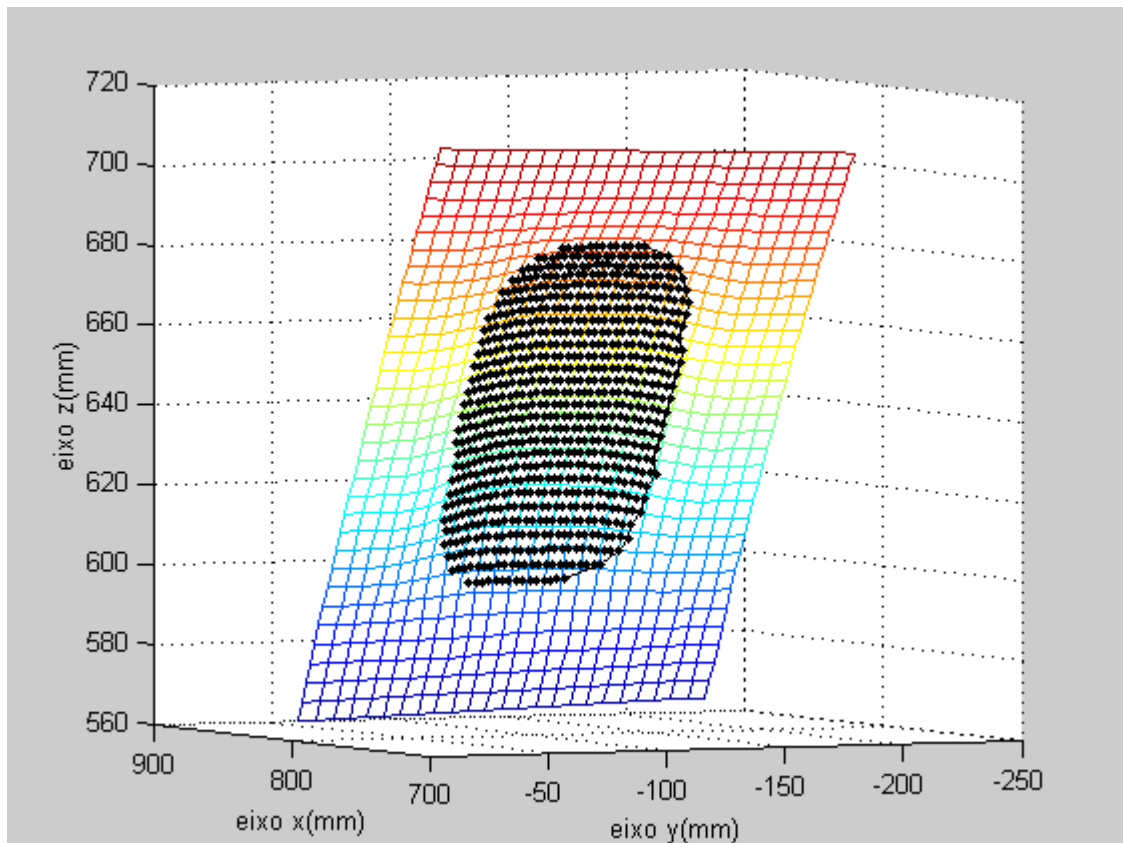


Figura 5.13 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à segunda camada.

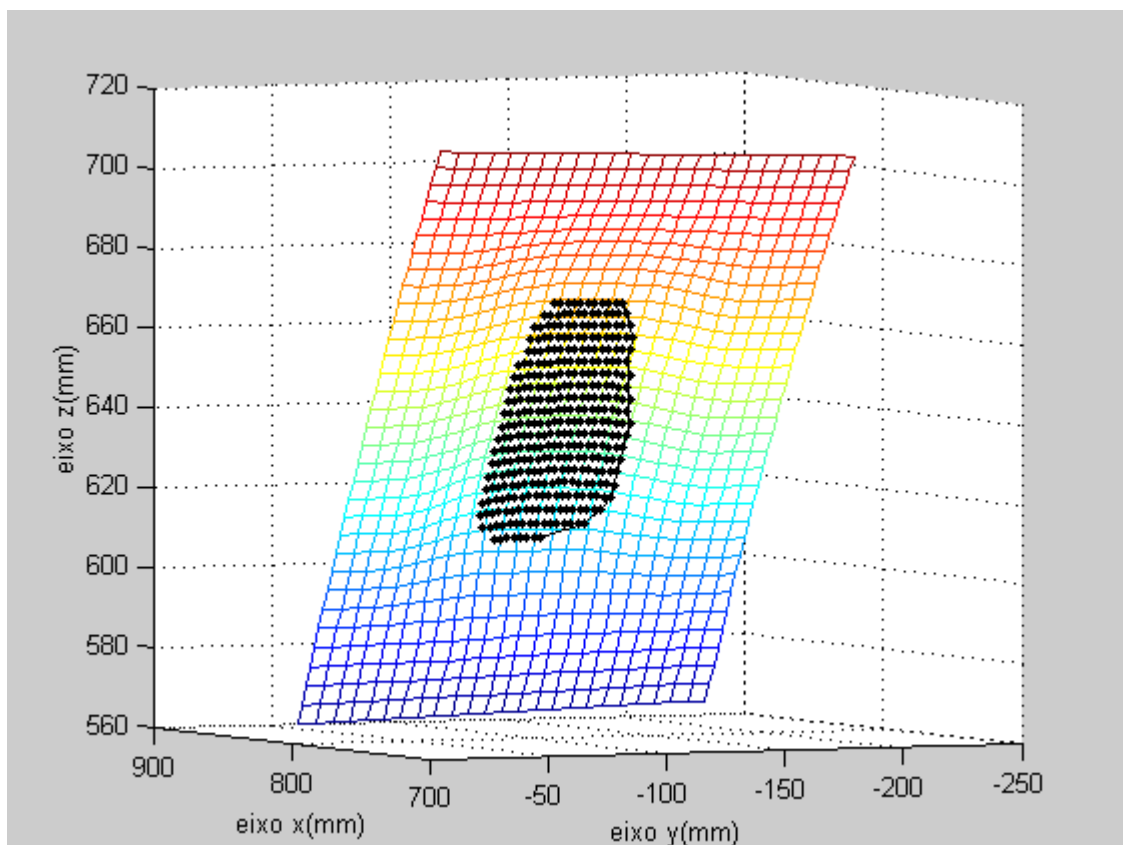


Figura 5.14 - Pontos da trajetória dos cordões de solda referentes à terceira camada.



Figura 5.15 – Primeira camada de solda.



Figura 5.16 – Segunda camada de solda acrescida à primeira.



Figura 5.17 – Terceira camada de solda acrescida às anteriores.

Uma radiografia, conforme mostra a figura 5.18, foi realizada com o objetivo de detectar descontinuidades, 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 descontinuidades presentes nesta radiografia, o depósito realizado por soldagem plasma, apresentado na figura 5.17, é considerado aceitável.

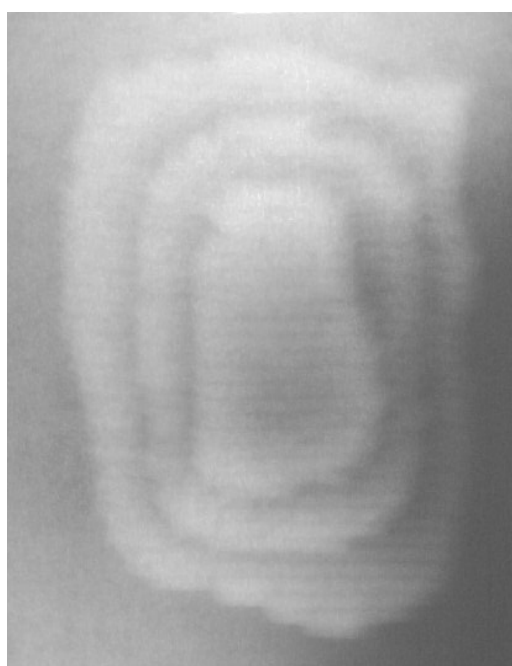


Figura 5.18 – Radiografia do corpo de prova soldado.

Com o sensor óptico de três linhas, fixado novamente ao robô Reis, foi realizada a medição automatizada da superfície já recuperada, conforme a trajetória apresentada pela figura 5.19. A superfície recuperada e seus pontos representantes, figura 5.20, foram determinadas a partir do conjunto de pontos obtidos na medição automatizada desta superfície.

A avaliação geométrica da superfície recuperada foi realizada conforme descrita no item 4.3.3 deste trabalho. Um excelente resultado foi obtido, conforme mostra a figura 5.21, 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 5.21, com o objetivo de se obter a superfície final, figura 5.22, o mais próxima da superfície original reconstruída.

Por fim, toda a experiência adquirida com o robô Reis, durante a implantação da metodologia desenvolvida, foi passada para o robô construído no projeto Roboturb. A figura 5.23 mostra este robô aplicando a metodologia de recuperação de superfícies danificadas no corpo de prova.

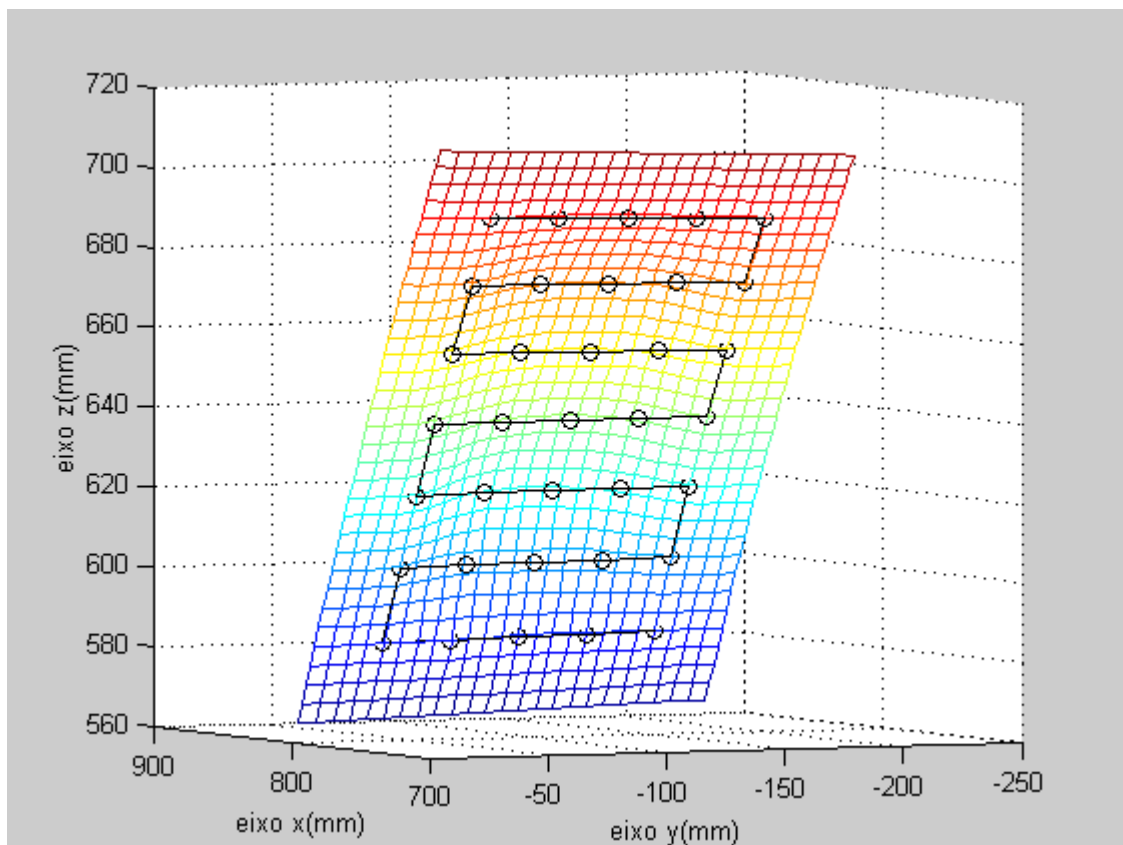


Figura 5.19 - Trajetória para efetuar a medição automatizada da superfície recuperada.

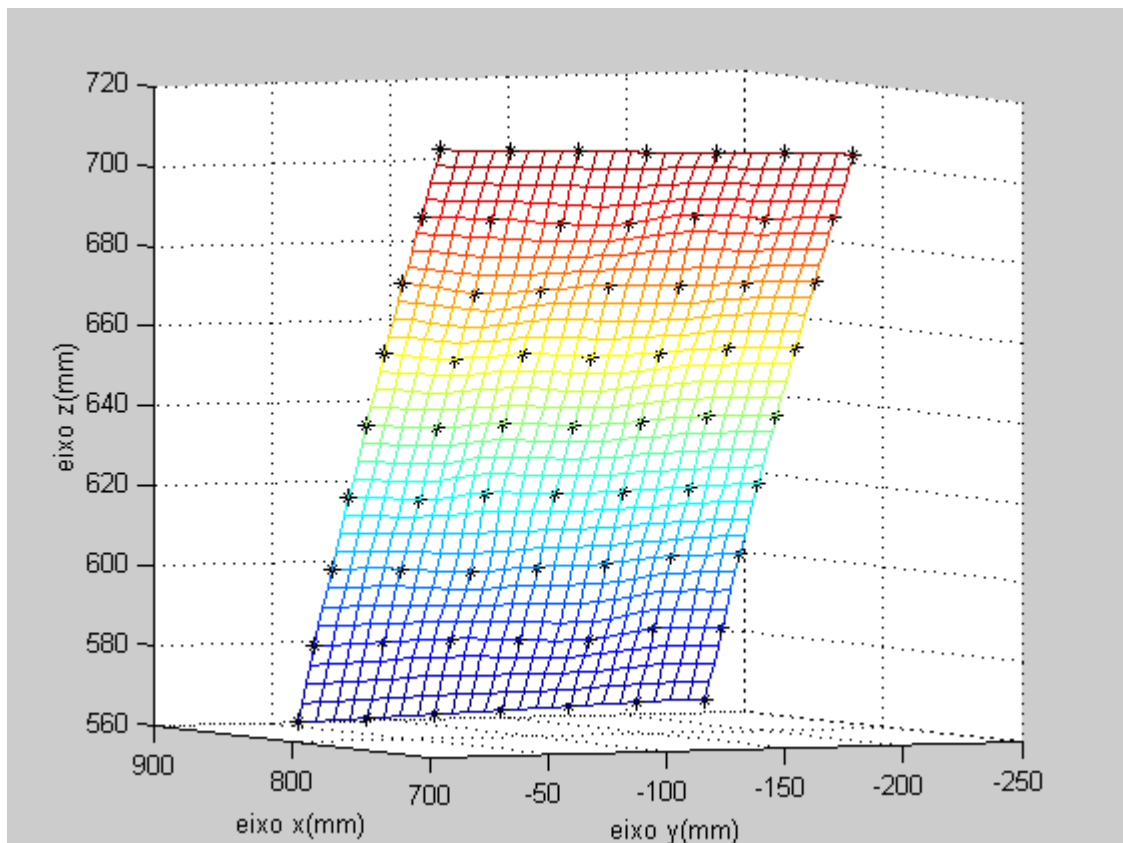


Figura 5.20 – Representação da superfície recuperada e seus pontos representantes.

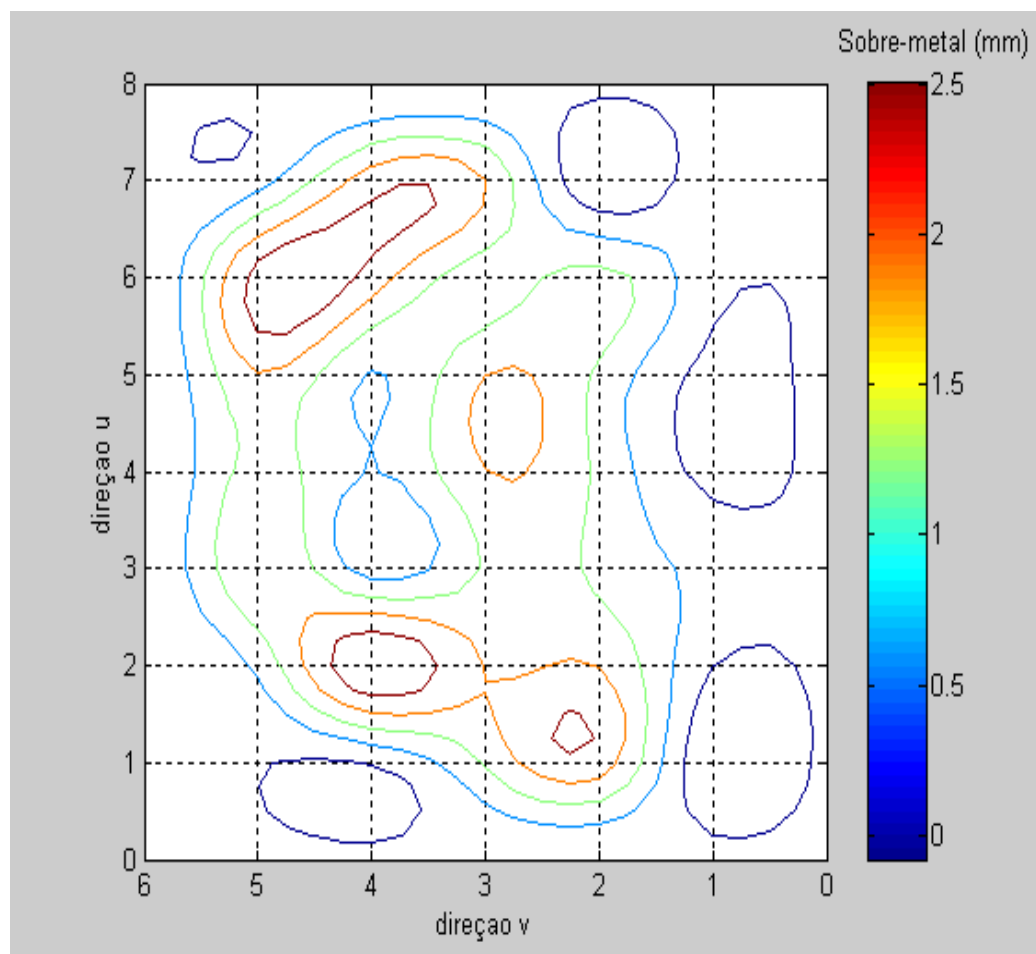
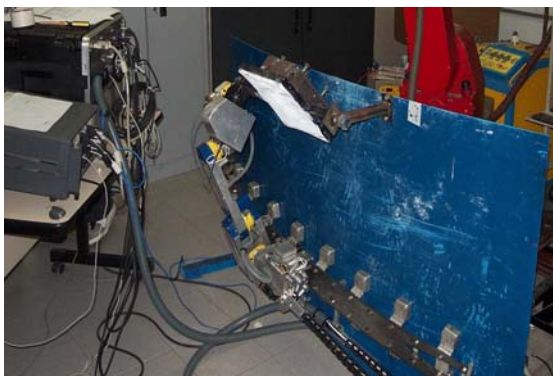


Figura 5.21 – Avaliação geométrica da recuperação realizada.



Figura 5.22 – Superfície final obtida após esmerilhamento.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.23 – Robô do projeto Roboturb: (a) Com o sensor óptico de três linhas, (b) Com a tocha plasma e (c) Realizando a primeira camada de solda.

5.4 – Discussão dos resultados

No âmbito deste trabalho pode-se citar como resultado secundário positivo a recuperação do robô industrial Reis RV-15. Este robô, tornou-se muito mais flexível, na execução de tarefas, em virtude da confecção e implantação de programas que permitem receber trajetórias em forma de arquivo de dados viabilizando, com isso, a sua utilização no desenvolvimento de futuros trabalhos de pesquisa.

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. Além disso, as camadas de solda produzidas pelo processo robotizado de soldagem plasma com alimentação automática de arame, possuem pequena ondulação, excelente acabamento superficial e ausência de respingos e salpicos.

A aplicação da metodologia desenvolvida, na recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação, produz superfícies recuperadas com qualidade geométrica superior, se comparado com às superfícies recuperadas pelos processos manuais de soldagem, figura 5.24.



Figura 5.24 – Camadas de solda produzida pelo processo manual de soldagem MIG.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O trabalho, aqui apresentado, representou um esforço associativo de várias áreas do conhecimento em engenharia. Ele não se constituiu num mero cumprimento de ritual para obtenção de um grau acadêmico. Por ter um compromisso principal na solução de um problema de alta complexidade numa área multidisciplinar da engenharia, o trabalho requereu, inclusive, a aquisição de sensibilidades inerentes a mestres de alta experiência prática. Isto foi especialmente requerido na determinação do procedimento de soldagem.

Para que o trabalho fosse realizado no tempo regulamentar de um programa de pós-graduação, vários passos intermediários tiveram de ser realizados, entre eles, a total recuperação de um robô comercial, o qual é mais um subproduto deste trabalho. Foi com auxílio deste robô que foram realizados os principais ensaios constantes do presente texto.

O presente capítulo apresenta as conclusões deste trabalho de pesquisa e aponta possíveis trabalhos futuros.

Os objetivos propostos, citados na introdução deste trabalho, foram atingidos, como atestam os resultados apresentados no capítulo anterior, cabendo aqui alguns destaques:

- A metodologia desenvolvida foi validada através da execução dos algoritmos matemáticos implementados em ambiente de programação Matlab. Estes algoritmos que foram gerados, durante este trabalho, são flexíveis podendo ser aplicados, adaptados ou expandidos, para solucionar problemas similares de recuperação automatizada de superfícies.
- A velocidade da medição inicial não foi tão rápida, porque o acionamento do robô no modo de ensinamento movia uma junta de cada vez. A solução mais adequada, que deve ser adotada, é o acionamento de acordo com o sistema de coordenadas do efetuador. Nesta modalidade de acionamento, os movimentos no sensor óptico são realizados somente na direção e ao redor dos vetores do seu respectivo sistema de coordenadas.

- 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 valor de 25 mm, para a distância entre pontos consecutivos da trajetória de medição, mostrou-se conveniente. Um aumento neste valor, corresponde a uma perda de definição da superfície medida. A diminuição deste valor, implica somente em um aumento no tempo aquisição e de processamento.
- A técnica de Coons, para reconstrução de superfícies livres, foi testada em laboratório através do uso de uma máquina de medir por coordenadas e mostrou-se muito adequada. Em uma superfície livre, com tamanho aproximado de 150 mm por 200 mm, a diferença máxima encontrada, entre a superfície real e a superfície interpolada, foi menor que 0,8 mm. Este nível de erro é plenamente satisfatório para determinar a localização de pontos em regiões centrais de superfícies estimadas.
- O processo automatizado de soldagem plasma com alimentação automática de arame, aperfeiçoado neste trabalho, mostrou-se robusto e repetitivo na recuperação de cavidades semelhantes às 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.
- A eficiência de deposição obtida com este processo de soldagem é próxima de 100% e as melhorias implementadas: posicionamento do arame, orientação da tocha e parâmetros de soldagem, proporcionaram um aumento de 23 % na taxa de deposição em relação à técnica desenvolvida por Oliveira [43].
- Todas as trajetórias, de medição e de soldagem, produzidas pelos algoritmos matemáticos desenvolvidos, proporcionaram visualmente a correta localização, posição e orientação dos efetadores, sensor óptico e tocha plasma, durante a recuperação automatizada da superfície danificada do corpo de prova.

- A recuperação realizada no corpo de prova é aceitável, tanto do ponto de vista geométrico, quanto do ponto de vista das descontinuidades presentes nos depósitos realizados. Verificou-se ainda, que o resultado da avaliação geral desta recuperação realizada, independe do tipo de robô empregado, robô Reis ou robô do projeto Roboturb.

A metodologia desenvolvida, o sistema de medição e o processo de soldagem com plasma alimentado, que foram aqui apresentados, poderão servir como ponto de partida para futuros trabalhos nas áreas: de geração de trajetórias, de soldagem robotizada e de metrologia. O detalhamento de algumas propostas de trabalho é apresentada a seguir:

- Pesquisar a viabilidade de substituição do sensor óptico a laser de três linhas paralelas por um de duas linhas perpendiculares. O objetivo desta substituição é o de facilitar, ainda mais, a tarefa de medição inicial dos pontos externos;
- Desenvolver um novo *layout* para o sensor óptico a laser para evitar possíveis colisões entre este sensor e o punho do robô manipulador.
- Desenvolver uma metodologia de preenchimento de cavidades com a utilização de mais de um tipo de arame. Esta nova metodologia tem como finalidade obter revestimentos mais resistentes ao fenômeno da cavitação;
- Verificar a possibilidade de incluir um terceiro efetuador, uma esmerilhadeira, ao sistema automatizado de recuperação de rotores de turbinas de grande porte. As vantagens obtidas com a inclusão desta ferramenta são: melhorar o acabamento final das superfícies e o controle da geometria das pás da turbina.
- Automatizar também, o processo de deposição por soldagem MIG, com o objetivo de realizar de forma mais rápida, a recuperação de superfícies danificadas por cavitação;
- Pesquisar a viabilidade do emprego do processo de soldagem à plasma com alimentação de pó, visando eliminar o processo de esmerilhamento através da confecção de cordões de solda de altura reduzida e da operação de refusão da superfície soldada;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ALMENDRA, A. C. **Soldagem - Coleção Tecnologia Senai**. Org.Selma Ziedas e Ivanisa Tatini, São Paulo, 1997.
- [02] AMAT, J., AYZA, J., BASAÑEZ, L., FERRATÉ, G., FERRER, F., HUBER, R. & TORRES, C. **Robótica Industrial**. Marcombo, 1986.
- [03] AMIN, M. **Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding**. Metal Construction, v. 15, n. 5, p. 272 – 277, 1983.
- [04] ARAÚJO, P. V. **Geometria Diferencial**. Instituto de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro, 1998.
- [05] BARRA, S. R. **Influência dos Procedimentos de Soldagem sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1998.
- [06] BOCCANERA, L. F. **Resistência a Erosão por Cavitação de Revestimentos Depositados por Soldagem e Aspersão Térmica**. Tese de Doutorado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1999.
- [07] BOLMSJO, G., OLSSON, M., CEDERBERG, P. **Robotic Arc Welding - Trends and Developments for Higher Autonomy**. Industrial Robot, v. 29, n. 2, p. 98 – 104, 2002.
- [08] BRADLEY, C., VICKERS, G. W. **Free-form Surface Reconstruruction for Machine Vision Rapid Prototyping**. Optical Engineering, v. 32, p. 2191 – 2200, 1993.
- [09] 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.

- [10] CHEN, S. B., LOU, Y. J., WU, L. & ZHAO, D. B. **Intelligent Methodology for Sensing, Modeling and Control of Pulsed GTAW: part 1 – Bead-on-Plate Welding.** Welding Journal, v. 79, n. 6, p. 151 – 163, June, 2000.
- [11] CHEN, S. B., LOU, Y. J., WU, L. & ZHAO, D. B. **Intelligent Methodology for Sensing, Modeling and Control of Pulsed GTAW: Part 2 – Butt Joint Welding.** Welding Journal, v. 79, n. 6, p. 164 – 174, June, 2000.
- [12] CLARK, J. **Implementing Non-Contact Digitisation Techniques Within the Mechanical Design Process.** Sensor Review, v. 20, n. 3, p. 195 – 201, 2000.
- [13] COOK, G. E. **Robotic Arc Welding: Research in Sensory Feedback Control.** IEEE, Transactions of Industrial Electronics, v. IE-3, n. 3, p. 252 – 268, 1983.
- [14] CURLESS, B., LEVOY, M. **Better Optical Triangulation Through Spacetime Analysis.** International Conference on Computer Vision, p. 987 – 994, june, 1995.
- [15] DÍAZ, V. M. V. **Estudo e Desenvolvimento do Processo de Soldagem Plasma Transferido Alimentado com Pó (PTAP).** Exame de Qualificação para Doutorado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2002.
- [16] DIAZ, V. M. V. **Influência de Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma sobre as Características da Solda com Ênfase na Análise da Abertura e no Fechamento do Keyhole.** Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1999.
- [17] FUERSCHBACH, P. W., KNOROVSKY, G. A. **A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding.** Welding Journal, v. 70, n. 11, p. 287 – 297, November, 1991.
- [18] GONÇALVES JUNIOR, A. A. **Sistema Automatizado para Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte.** Projeto Ministério da Ciência e Tecnologia – PADCT - CDT, UFSC, Florianópolis, 1998.

- [19] GOOCH, R. **Optical Metrology in Manufacturing Automation**. Sensor Review, v. 18, n. 2, p. 81 – 87, 1998.
- [20] GROOVER, M. P., WEISS, M., NAGEL, R. N. & ODREY, N. G. **Robótica: Tecnologia e Programação**. McGraw-Hill, 1998.
- [21] 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.
- [22] HUANG, S., LIN, C. **A Three-Dimensional Non-Contact Measurement System**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 13, nº 6, p. 419 - 425, 1997.
- [23] HÜHNE, H. & REBELLO, J. M. A. **Resistência à Cavitação de Recobrimentos Soldados**. Trabalho Técnico da Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, 1987.
- [24] INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA: **Sistema Automatizado para Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte**, Documento disponível on-line: <http://www.labsolda.ufsc.br/roboturb.html>
- [25] INVENSYS COMPANY. **Heavy Metal Fabrication Robotics**. Vision & Robotics Solutions to Accelerate your Business, May, 2004. Disponível on-line em: <http://www.solutions2accelerate.com/robotics/pages/accelerator/hmfabrobo.asp>
- [26] INVENSYS COMPANY. **Multi-Process Robots Help Improve Welding Quality**. Industrial News Room_{sm}, June, 2003. Disponível on-line em: <http://www.industrialnewsroom.com/fullstory/23728>
- [27] IP, W. L. R., LOFTUS, M. **Adaptive and Compensation Methods in Free-form Surface Assessment**. International Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 210, p. 135 - 145, 1996.

- [28] JOHNSON, R.A. **Miller and Freund's Probability and Statistics for Engineers**. Prentice-Hall, 1994.
- [29] KENNEDY, W. P. **The Basic of Triangulation Sensors**. The Journal of Applied Sensing Technology, 1998.
- [30] KOWARSHIK, R., KÜHMSTEDT, P., SCHREIBER, W. **3-Coordinate Measurement with Structured Light**. Fringe 93 – 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, p. 204 - 208, Bremen, Alemanha, 1993.
- [31] KUTAY, A., WEISS, L. **Economic-Analysis of Robotic Operations – A Case-Study of Thermal Spraying Robot**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 9, n. 3, p. 279 – 287, June, 1992.
- [32] LACERDA, J. **Estudo de uma Estrutura com Três Graus de Liberdade de Orientação Visando seu Uso como Simulador de Vôo**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1997.
- [33] LAFRATTA, F. H.. **Metodologia e Instrumentação para Qualificação de Robôs Industriais – Ensaio de Repetibilidade**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1990.
- [34] LasirisTM SNF Lasers: **Structured Light Projectors**, Documento disponível on-line: <http://www.lasiris.com>
- [35] LEITHOLD, L. **O Cálculo com Geometria Analítica**. Harper & Row do Brasil LTDA, 1977.
- [36] LEWANDOWSKI, J., MÉNARD, B., HENNEQUIN, D. **Triangulation with Simultaneous Recording of Reference and Object Fringe**. SPIE, v. 2065, p. 211 - 218, 1994.

- [37] LHO, T. -J., UM, D. -G., NA, S. -J. **A Study on Arc Characteristics and Its Application to Height Control in Plasma Arc Cutting.** Welding Journal, v. 71, n. 8, p. 277 – 282, August, 1992.
- [38] MARANTZ, D. R. & KOWALS, K. A. **Wire Arc Plasma: a New Contender in Metal Spraying.** Welding Journal, v. 70, n. 8, p. 46 – 50, ago, 1991.
- [39] MATSUMOTO, É.Y. **Matlab 6: Fundamentos de Programação.** Érica, São Paulo, 2001.
- [40] MICHEL, C. **Simulation des Réparations In-situ Réalisées par le Robot Scompi.** Magazine Circuit Industriel, Avril, 2004. Disponível on-line em:
[http:// www.magazinemci.com/articles/chroniques/ 2004/04/robot_scompi.htm](http://www.magazinemci.com/articles/chroniques/2004/04/robot_scompi.htm)
- [41] MIGUEL, P. A. C., ABACKERLI, A. J. **Princípios da Medição por Coordenadas.** Núcleo de Gestão da Qualidade & Metrologia, Centro de Tecnologia – UNIMEP, 1997.
- [42] NEROSKY, L. A. R. **Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” em um Braço de Medição.** Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2001.
- [43] OLIVEIRA, M. A. **Estudo do Processo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame, Visando sua Utilização em Revestimentos Metálicos.** Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2001.
- [44] OLIVEIRA, M. A. **Estudo e Desenvolvimento do Processo Plasma-MIG para Soldagem de Aço e Alumínio.** Exame de Qualificação para Doutorado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2004.
- [45] OMAR, A. A., LUNDIN, C. D. **Pulsed Plasma-Pulsed GTA Arc: a Study of the Process Variables.** Welding Journal, v. 58, n. 4, p. 408 – 420, 1976.

- [46] PAULA Jr., O. S. **Desenvolvimento e Aplicação da Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1997.
- [47] PEREIRA, A. G., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Robotizada de Andaimés Tubulares**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Agosto, 2002.
- [48] PROCOPIAK, L. A. J. **Resistência à Cavitação de Três Revestimentos Soldados**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1997.
- [49] QIULIN, D. & DAVIES, B. J. **Surface Engineering Geometry for Computer-Aided Design and Manufacture**. Ellis Horwood Limited, 1987.
- [50] ROSA, E. **O Uso de Polinômios Cúbicos de Hermite no Planejamento de Trajetórias de Manipuladores**. Tese de Doutorado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 1991.
- [51] RZEZNIK, T. **In-Line Laser Measurement in the Assembly Process**. Industrial Robot, v. 24, n. 1, p. 16 – 23, 1997.
- [52] SARMA, R., DUTTA, D. **The Geometry and Generation of NC Tool Paths**. Journal of Mechanical Design, v. 119, n. 6, p. 253 – 258, June, 1997.
- [53] SCIAVICCO, L. & SICILIANO, B. **Modeling and Control of Robot Manipulators**. McGraw-Hill, 1996.
- [54] **Scompi**, filme em fita VHS produzido pela instituto de pesquisa Hydro-Québec's (IREQ).
- [55] SINGHAL, A. K., ATHAVALE, M. M., Li, H. Y. & JIANG Y. **Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model**. Journal of Fluids Engineering – Transactions of the ASME, v. 3, p. 617 – 624, September, 2002.
- [56] SNOW, M. **Laser Triangulation Sensors in the Tire Industry**. Sensors, March, 2002. Documento disponível on-line: <http://www.sensorsmag.com/articles/0302/tire/main.shtml>

- [57] SOUZA, A. R. **Medição por Coordenadas**. Laboratório de Metrologia, Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/SC, 1998.
- [58] STEINBRUCH, A. & WINTERLE, P. **Geometria Analítica**. McGraw-Hill, 1987.
- [59] SUBRAMANIAM, S., WHITE, D. R., JONES, J. E. & LYONS, D. W. **Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW**. Welding Journal, v. 78, n. 5, p. 166 – 172, May, 1999.
- [60] SUENAGA, Y. **3D Measurement Technologies for Computer Animation**. Computer Animation'96, p. 167 – 174, Genova, Suíça, Junho, 1996.
- [61] SURESH, K., YANG, D. C. H. **Constant Scallop-height Machining of Free-form Surfaces**. Journal of Engineering for Industry, v. 116, n. 5, p. 253 – 259, May, 1994.
- [62] TENENBLAT, K. **Introdução à Geometria Diferencial**. Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1988.
- [63] **The ScompiTM Technology for Hydraulic Turbine Maintenance**, documento disponível on-line http://www.ireq.ca/an/publications/index_publica_prod.html
- [64] TOLEDO, L. B. **Uma Interface CAD/CAM para a Programação Fora de Linha de Robôs Industriais**. Dissertação de Mestrado do Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2000.
- [65] 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.
- [66] TREVELYAN, J. P. **Robots for Shearing Sheep: Shear Magic**. Oxford University Press, 1992.

- [67] WAINER, E., BRANDI, S. D. & MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.
- [68] Welding Handbook. AWS, **Welding Processes**. Eighth Edition, v. 2, 1991.
- [69] ZEID, I. **CAD/CAM Theory and Practice**. McGraw-Hill, 1991.
- [70] ZHANG, Y. M., ZHANG, S. B. **Observation of the Keyhole during Plasma Arc Welding**. Welding Journal, p. 53 – 58, February, 1999.
- [71] ZHU, P. Y., RADOS, M., SIMPSON, S. W. **A Theoretical-Study of a Gas Metal Arc-Welding System**. Plasma Sources Science & Technology, v. 4, n. 3, p. 495 – 500, 1995.

ANEXO A

TEORIA DE CURVAS E SUPERFÍCIES

Neste anexo será feita uma breve descrição das características e propriedades das curvas e superfícies com o objetivo de proporcionar um melhor entendimento dos aspectos relevantes envolvidos neste trabalho. Uma descrição mais detalhada sobre as técnicas geométricas de curvas e superfícies, como Bezier, Spline, B-spline e outras, podem ser obtidas nas referências [49,69].

As curvas e superfícies constituem a base teórica para as técnicas que envolvem modelagem de superfícies. Por serem muito concisas, as equações vetoriais são freqüentemente empregadas na descrição destes elementos geométricos.

Equação vetorial de curvas

Em uma função vetorial $\mathbf{r}$, como indica a equação A.1, a magnitude e a direção depende do valor da variável paramétrica t . As componentes desta função vetorial são funções escalares $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$. Desta forma, os conceitos como limites, continuidade, diferenciação e integração para funções escalares podem ser aplicados diretamente em funções vetoriais.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (\text{A.1})$$

Com : $t_i \leq t \leq t_f$

Os vetores unitários $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ e $\mathbf{k}$, conforme mostra a figura A.1, estão alinhados nas direções dos respectivos eixos x , y e z do sistema de coordenadas cartesianas.

As componentes $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$, da equação vetorial da curva, são conhecidas como a representação paramétrica da curva. Uma função vetorial também pode ser escrita na forma matricial [4]:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} x(t) & y(t) & z(t) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Com : $t_i \leq t \leq t_f$

Um ponto $p(x_p, y_p, z_p)$ no espaço pode ser descrito por um vetor $\mathbf{r}$, referenciado ao sistema de coordenadas cartesiana $0-xyz$, como mostra a figura A.1. Os termos “ponto” e “vetor” são intercambiáveis. Assim, um ponto, ao se deslocar no espaço, descreve uma curva, a qual pode ser representada por uma função vetorial.

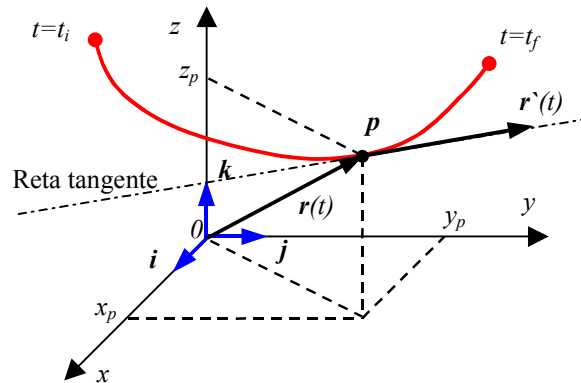


Figura A.1 – Função vetorial parametrizada em t .

Vetores tangentes

Derivando a função vetorial da curva na sua forma matricial, equação A.2, em relação ao parâmetro t , obtém-se:

$$\mathbf{r}'(t) = \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} = [x'(t) \quad y'(t) \quad z'(t)] \quad (\text{A.3})$$

Este vetor derivada é conhecido com vetor tangente, porque sua direção coincide com a reta tangente, como mostra a figura A.1. Cabe ainda ressaltar, que o vetor derivada de uma função vetorial também é uma função vetorial [69].

O comprimento de arco s é uma variável paramétrica intrínseca da curva e independe de qualquer sistema de coordenadas. Dado um ponto inicial $\mathbf{r}(s)$ da curva, como mostra a figura A.2, a variação do comprimento de arco irá definir completamente a curva $\mathbf{r}$.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(s) = [x(s) \quad y(s) \quad z(s)] \quad (\text{A.4})$$

Com : $s_i \leq s \leq s_f$

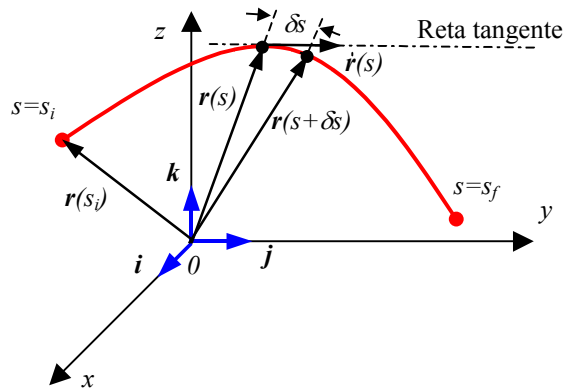


Figura A.2 – Função vetorial parametrizada em s .

O vetor tangente unitário $T(s)$ da curva $r(s)$ é definido por [49]:

$$T(s) = \frac{dr(s)}{ds} = \dot{r}(s) \quad (\text{A.5})$$

Sistema de coordenada local

A origem do sistema de coordenadas local, como mostra a figura A.3, é um ponto que se desloca ao longo da curva. As direções dos eixos deste sistema de coordenadas não é fixa.

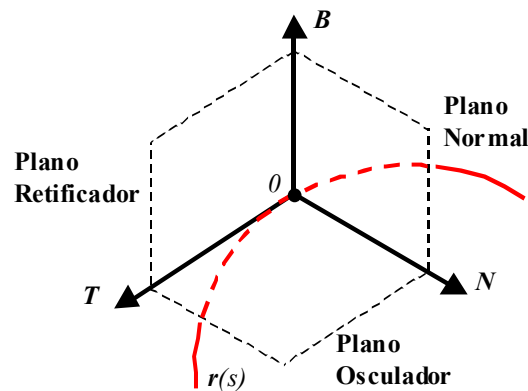


Figura A.3 – Sistema de coordenadas local.

Os vetores que compõem este sistema de coordenadas local são:

- O vetor tangente unitário $T(s)$;
- O vetor normal unitário $N(s)$;
- O vetor binormal unitário $B(s)$.

Os vetores normal e binormal unitário são definidos através das seguintes equações [49]:

$$\mathbf{N}(s) = \frac{\ddot{\mathbf{r}}(s)}{|\ddot{\mathbf{r}}(s)|} = \frac{\dot{\mathbf{T}}(s)}{|\dot{\mathbf{T}}(s)|} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{B}(s) = \mathbf{T}(s) \times \mathbf{N}(s) \quad (\text{A.7})$$

Curvatura e torção

Curvatura e torção são propriedades intrínsecas da curva em si e não estão relacionadas ao sistema de referência. A taxa de variação da direção do vetor tangente com respeito ao comprimento do arco é chamada de curvatura. Se a curva é descrita em função da variável paramétrica comprimento de arco, a curvatura é determinada através da seguinte equação [62]:

$$k(s) = |\dot{\mathbf{T}}(s)| = |\ddot{\mathbf{r}}(s)| = \sqrt{\ddot{x}(s)^2 + \ddot{y}(s)^2 + \ddot{z}(s)^2} \quad (\text{A.8})$$

Se a curva é descrita em função da variável paramétrica t , a curvatura é determinada através da seguinte equação [62]:

$$k(t) = \frac{|\mathbf{r}'(t) \times \mathbf{r}''(t)|}{|\mathbf{r}'(t)|^3} \quad (\text{A.9})$$

A taxa que o vetor binormal gira em relação ao comprimento de arco é chamada de torção. Torção é uma medida de quanto a curva no espaço torce no plano osculador. Se a curva é descrita em função da variável paramétrica comprimento de arco, a curvatura é determinada através da seguinte equação [4]:

$$\tau(s) = \left| \frac{d\mathbf{B}(s)}{ds} \right| = |\dot{\mathbf{B}}(s)| \quad (\text{A.10})$$

Se a curva é descrita em função da variável paramétrica t , a curvatura é determinada através da equação [4]:

$$\tau(t) = \frac{(\mathbf{r}'(t) \times \mathbf{r}''(t)) \cdot \mathbf{r}'''(t)}{(\mathbf{r}'(t) \times \mathbf{r}''(t))^2} \quad (\text{A.11})$$

Equação vetorial de superfícies

Superfícies podem ser descritas de diversas maneiras [49]:

- Forma explícita: $z = f(x,y)$;
- Forma implícita: $F(x,y,z) = 0$;
- Forma paramétrica: $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u,v)$.

As formas explícita e implícita não são as mais convenientes quando se quer controlar a forma da superfície. Na modelagem de superfícies, a forma que se mostra mais conveniente é a paramétrica, conforme mostra a figura A.4.

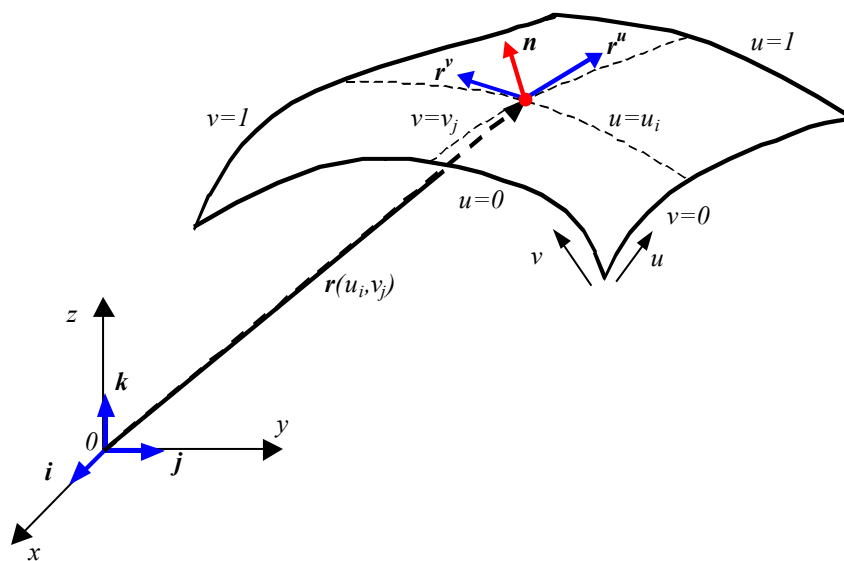


Figura A.4 – Descrição paramétrica de um pedaço de superfície.

Como nas equações de curvas, uma superfície pode ser definida, por duas variáveis paramétricas: u e v . A equação vetorial da superfície em termos de suas funções componentes é dada por:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u,v) = x(u,v)\mathbf{i} + y(u,v)\mathbf{j} + z(u,v)\mathbf{k} \quad (\text{A.12})$$

Com : $0 \leq u, v \leq l$

A equação vetorial da superfície também pode ser descrita na forma matricial [69]:

$$\mathbf{r}(u,v) = \begin{bmatrix} x(u,v) & y(u,v) & z(u,v) \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Com : $0 \leq u, v \leq l$

Os valores dos parâmetros u e v variam num intervalo entre 0 e 1. Fixando o valor de um dos parâmetros se define uma curva paramétrica sobre a superfície. Fixando o valor dos dois parâmetros se define um ponto sobre esta superfície.

Derivando a equação vetorial da superfície, expressão (A.13), em relação aos parâmetros u e v , obtém-se:

$$\mathbf{r}^u(u, v) = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(u, v)}{\partial u} & \frac{\partial y(u, v)}{\partial u} & \frac{\partial z(u, v)}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\mathbf{r}^v(u, v) = \frac{\partial \mathbf{r}(u, v)}{\partial v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(u, v)}{\partial v} & \frac{\partial y(u, v)}{\partial v} & \frac{\partial z(u, v)}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

Os vetores tangentes $\mathbf{r}^u(u, v)$ e $\mathbf{r}^v(u, v)$ definem um plano tangente a superfície num ponto. O vetor normal unitário a este plano, como mostra a figura A.4, é determinado através da seguinte equação [69]:

$$\mathbf{n}(u, v) = \frac{\mathbf{r}^u(u, v) \times \mathbf{r}^v(u, v)}{|\mathbf{r}^u(u, v) \times \mathbf{r}^v(u, v)|} \quad (\text{A.16})$$

Curvaturas de uma superfície

Seja $\mathbf{r}(t)$ uma curva arbitrária sobre a superfície $\mathbf{r}(u, v)$. A equação desta curva pode ser escrita como:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(u(t), v(t)) \quad (\text{A.17})$$

A curvatura k desta curva é definida, equação A.18, como a curvatura normal k_n da superfície na direção da curva $\mathbf{r}(t)$ [49].

$$k(t) = k_n(t) = \frac{\begin{bmatrix} u'(t) & v'(t) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{D} \cdot \begin{bmatrix} u'(t) \\ v'(t) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} u'(t) & v'(t) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} u'(t) \\ v'(t) \end{bmatrix}} \quad (\text{A.18})$$

Onde:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^u(u,v) \cdot \mathbf{r}^u(u,v) & \mathbf{r}^u(u,v) \cdot \mathbf{r}^v(u,v) \\ \mathbf{r}^u(u,v) \cdot \mathbf{r}^v(u,v) & \mathbf{r}^v(u,v) \cdot \mathbf{r}^v(u,v) \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}(u,v) \cdot \mathbf{r}^{uu}(u,v) & \mathbf{n}(u,v) \cdot \mathbf{r}^{uv}(u,v) \\ \mathbf{n}(u,v) \cdot \mathbf{r}^{uv}(u,v) & \mathbf{n}(u,v) \cdot \mathbf{r}^{vv}(u,v) \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

As matrizes $\mathbf{G}$ e $\mathbf{D}$ são respectivamente a primeira e a segunda matriz fundamental da superfície. Estas matrizes são determinadas pela própria superfície.

Da equação A.18, obtém-se:

$$|\mathbf{G}| \cdot K_n^2(t) - (g_{11} \cdot d_{22} + d_{11} \cdot g_{22} - 2 \cdot g_{12} \cdot d_{12}) \cdot K_n(t) + |\mathbf{D}| = 0 \quad (\text{A.21})$$

As curvaturas máxima e mínima, $k_{n,m\acute{a}x}(t)$ e $k_{n,m\acute{i}n}(t)$, em um ponto da superfície são obtidas através da solução da equação quadrática A.21. Estes valores são conhecidas como as principais curvaturas da superfície. O produto das curvaturas máxima e mínima é conhecido como curvatura Gaussiana da superfície [49], conforme mostra a seguinte equação:

$$k_g(t) = k_{n,m\acute{a}x}(t) \cdot k_{n,m\acute{i}n}(t) = \frac{|\mathbf{D}|}{|\mathbf{G}|} \quad (\text{A.22})$$

ANEXO B

MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DA TOCHA

O presente anexo descreve o procedimento empregado para a obtenção da matriz de transformação do sistema de coordenadas da tocha, $0_t-x_t y_t z_t$, em relação ao sistema de coordenadas do flange do robô, $0_f-x_f y_f z_f$.

O braço de medição utilizado para esta tarefa possui um sistema de coordenadas denominado por $0_b-x_b y_b z_b$ e suas principais características são:

- Modelo: Romer 2200;
- Número de eixos: 6;
- Massa: 11 kg;
- Desvio padrão: menor que 0,05 mm;
- Espaço de trabalho (diâmetro da esfera): 2200 mm.

A figura B.1 mostra o sistema de coordenadas do braço de medição juntamente com as origens, of e ot , e os vetores unitários dos sistemas de coordenadas do flange (xf , yf e zf) e da tocha (xt , yt e zt) com suas respectivas coordenadas expressas no sistema de coordenadas do braço de medição, $0_b-x_b y_b z_b$.

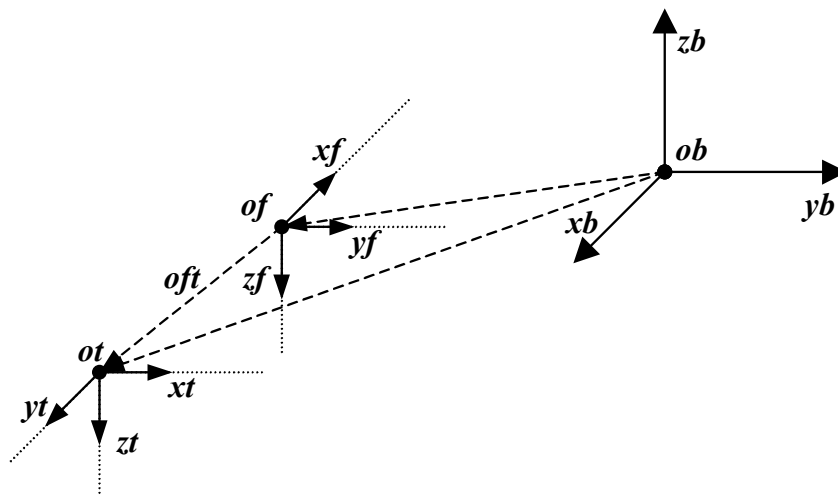


Figura B.1 – Sistemas de coordenadas envolvidos.

A matriz de rotação do sistema de coordenadas do flange em relação ao sistema de coordenadas do braço de medição, $\mathbf{RT}_{bf}$, é dada pela seguinte relação [66]:

$$\mathbf{RT}_{bf}^T = \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.1})$$

A origem do sistema de coordenadas da tocha em relação ao sistema de coordenadas do flange, oft , é obtida por meio da seguinte equação [53]:

$$oft^T = \mathbf{RT}_{bf}^T \cdot ot^T - \mathbf{RT}_{bf}^T \cdot of^T = \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} ot_x \\ ot_y \\ ot_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} of_x \\ of_y \\ of_z \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Os vetores unitários do sistema de coordenadas da tocha em relação ao sistema de coordenadas do flange (xft , yft e zft) são calculados através das seguintes equações [66]:

$$xft^T = \mathbf{RT}_{bf}^T \cdot xt^T = \begin{bmatrix} xft_x \\ xft_y \\ xft_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} xt_x \\ xt_y \\ xt_z \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$yft^T = \mathbf{RT}_{bf}^T \cdot yt^T = \begin{bmatrix} yft_x \\ yft_y \\ yft_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} yt_x \\ yt_y \\ yt_z \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

$$zft^T = \mathbf{RT}_{bf}^T \cdot zt^T = \begin{bmatrix} zft_x \\ zft_y \\ zft_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xf_x & yf_x & zf_x \\ xf_y & yf_y & zf_y \\ xf_z & yf_z & zf_z \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} zt_x \\ zt_y \\ zt_z \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Por fim, a matriz de transformação [53] desejada é formada pelo resultado proveniente das equações B.2 a B.5, ou seja:

$$\mathbf{T}_{ft}^T = \begin{bmatrix} xft_x & yft_x & zft_x & oft_x \\ xft_y & yft_y & zft_y & oft_y \\ xft_z & yft_z & zft_z & oft_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.6})$$

ANEXO C

FLUXOGRAMAS DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

O presente anexo refere-se aos três programas desenvolvidos e aperfeiçoados, em ambiente de programação Matlab, ao longo da execução deste trabalho. Estes programas são processados de forma sequencial e são denominados de acordo com sua função. São eles:

- Programa de geração da trajetória de medição automatizada da superfície danificada;
- Programa de geração das trajetórias de soldagem e de medição automatizada da superfície recuperada;
- Programa de qualificação geométrica da superfície recuperada.

A seguir o fluxograma simplificado de cada programa é apresentado:

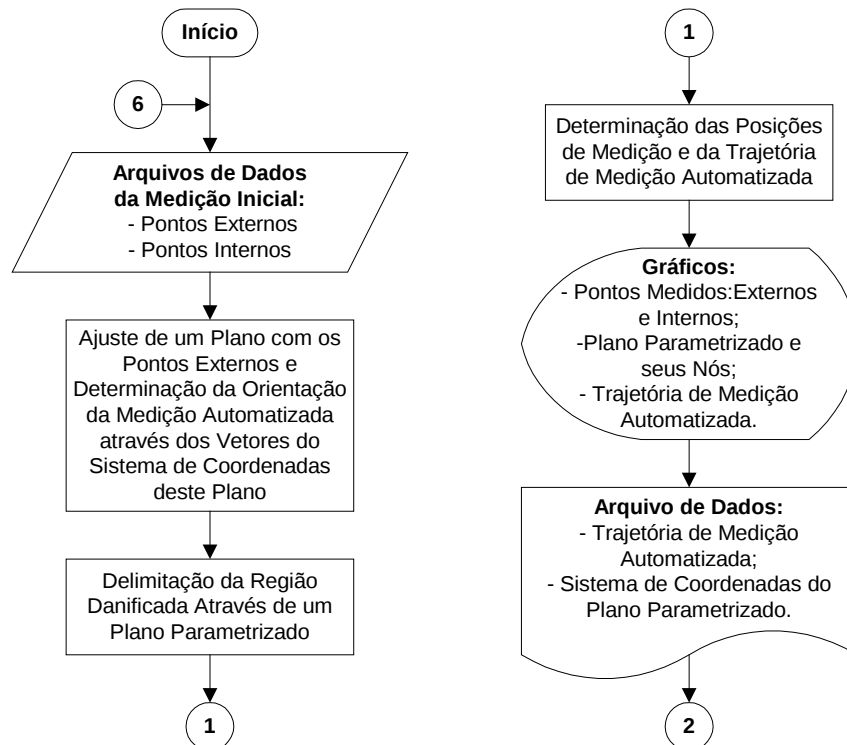


Figura C.1 – Fluxograma de geração da trajetória de medição automatizada da superfície danificada.

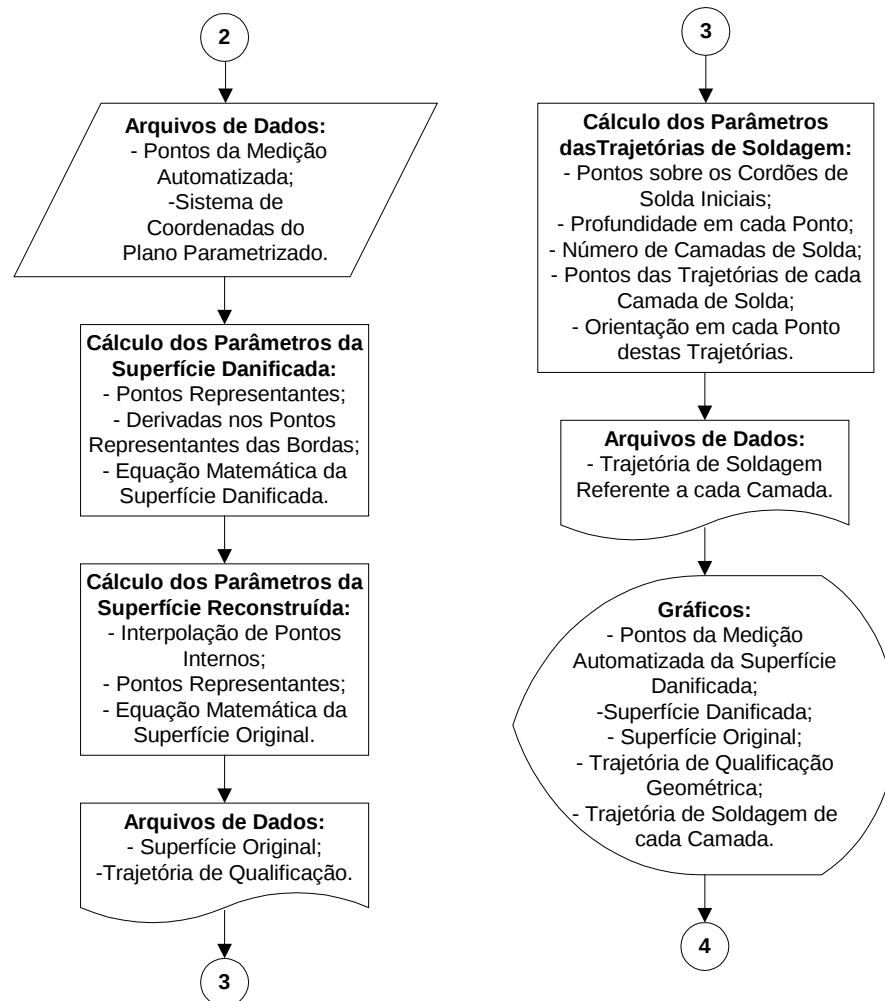


Figura C.2 – Fluxograma de geração das trajetórias de soldagem e de medição automatizada da superfície recuperada.

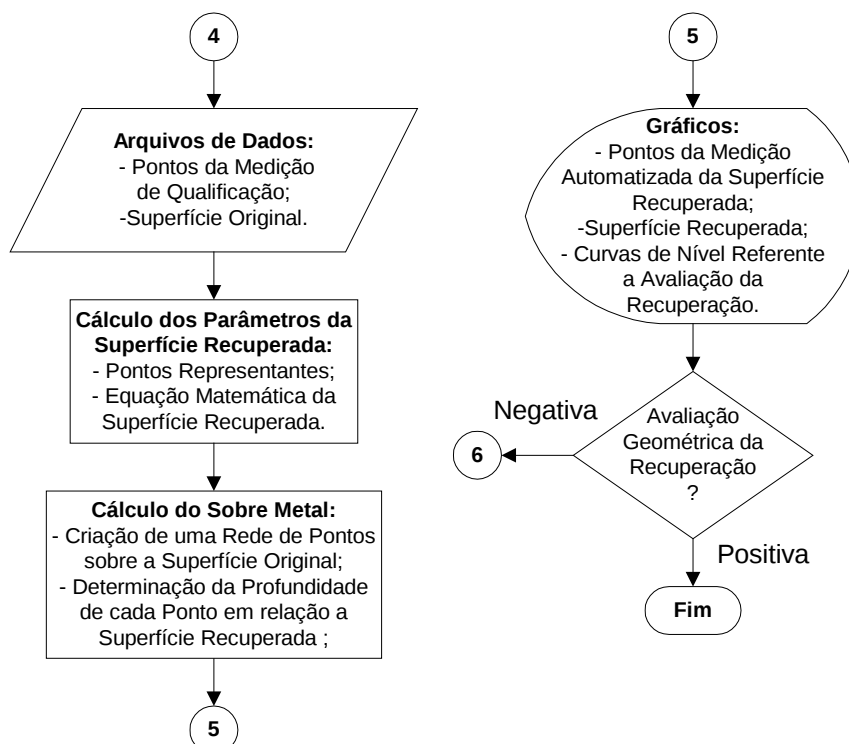


Figura C.3 – Fluxograma de qualificação geométrica da superfície recuperada.