



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PREENCHIMENTO DE CAVIDADES PROVENIENTES DE
REMOÇÃO DE TRINCA EM TURBINAS HIDRÁULICAS
POR MEIO DO PROCESSO GMAW-P**

JOSÉ LUIS LÁZARO PLATA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PREENCHIMENTO DE CAVIDADES PROVENIENTES DE
REMOÇÃO DE TRINCA EM TURBINAS HIDRÁULICAS
POR MEIO DO PROCESSO GMAW-P**

JOSÉ LUIS LÁZARO PLATA

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Publicação: ENM.DM-98/2016

Brasília, 13 de Maio de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PREENCHIMENTO DE CAVIDADES PROVENIENTES DE
REMOÇÃO DE TRINCA EM TURBINAS HIDRÁULICAS
POR MEIO DO PROCESSO GMAW-P

JOSÉ LUIS LÁZARO PLATA

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia

Mecânica da faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília


como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas Mecatrônicos

Banca Examinadora

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Car-
valho, ENM/UnB
Presidente da Banca



Prof. Dr. Sadek Crisóstomo Absi Al-
faro, ENM/UnB
Examinador Interno ao PPMEC



Prof. Dr. Demóstenes Ferreira Filho,
Examinador Externo



Brasília, 13 de Maio de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

PLATA, JOSÉ LUIS LÁZARO

Preenchimento de cavidades provenientes de remoção de trinca em turbinas hidráulicas por meio do processo GMAW-P [Distrito Federal] 2016.

xiv, 98p. 210 × 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1. GMAW Pulsado | 2. Preenchimento de cavidades |
| 3. Trajetórias de soldagem | 4. Turbinas Hidroelétricas |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PLATA, J.L.L. (2016). PREENCHIMENTO DE CAVIDADES PROVENIENTES DE REMOÇÃO DE TRINCA EM TURBINAS HIDRÁULICAS POR MEIO DO PROCESSO GMAW-P. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-98/2016, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Luis Lázaro Plata.

TÍTULO: PREENCHIMENTO DE CAVIDADES PROVENIENTES DE REMOÇÃO DE TRINCA EM TURBINAS HIDRÁULICAS POR MEIO DO PROCESSO GMAW-P.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

José Luis Lázaro Plata

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus familiares e aos meus amigos, pois, todos foram essenciais nesta caminhada, mesmo nas horas mais difíceis, souberam entender minhas ausências e me fortaleceram, permitindo-me concluir mais esta etapa de minha vida.

JOSÉ LUIS LÁZARO PLATA

Agradecimentos

Agradeço a toda a minha família, especialmente à minha mãe Rosalba Plata principal responsável pela minha vida e a quem devo meu caráter e disciplina ao trabalho, à minha namorada Cielo, sempre paciente e generosa em meus momentos de desânimo e falta de estímulo, e ao meu filho José, pois tem sido para mim uma fonte de inspiração que me tem dado forças para continuar a trabalhar para além daquilo que é o normal, o que levou muitas vezes a priva-lo da minha presença.

Ao meu orientador, o professor Guilherme Caribé pela amizade, apoio, confiança, dedicação, paciência e orientação. Pelo tempo gasto nas longas reuniões e por ter me permitido trabalhar ao seu lado, aprendendo um pouco mais a cada dia.

Aos amigos Aramiz, Eder, Herlys, João, Luis, Mayco, Nicolas e Rodolfo pela amizade e disposição em ajudar sempre que necessário, tornando-se uma segunda família durante todo este tempo.

Aos grandes amigos: Oscar, Luis, Matheus, Nelson, Felipe, Juan Pablo, Edinson, Renato, Andres, Margarita, Manuel, Wendy, Jesus, Sebastian, Guillermo e demais, pela amizade, ajuda e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do departamento de mecânica e mecatrônica: Alexander, Artur, Marrocos, Marcão, Miguel, Pereira, Tarses e Xavier. Obrigado pela enorme ajuda e pelos ensinamentos práticos fornecidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Diretoria Desenvolvimento Social (DDS-UnB) e PPMEC-UnB pelo auxílio financeiro.

JOSÉ LUIS LÁZARO PLATA

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a estratégia de planejamento de deposição dos cordões de solda, a fim de permitir a utilização de soldagem robotizada para a tarefa de preenchimento da cavidade resultante da remoção de uma trinca. Portanto, quando se pensa em definir a estratégia necessária e a distribuição dos cordões de solda para o preenchimento da cavidade mediante o processo robotizado, surgem alguns problemas relacionados com a dependência da geometria da seção transversal do cordão em relação aos parâmetros e à posição de soldagem. Tal geometria influencia fortemente o número de cordões formadores de uma camada, assim como o número de camadas necessárias, tendo em conta que o processo de preenchimento é efetuado em camadas. Neste caso, o primeiro problema a ser enfrentado é a definição da distância entre os cordões laterais necessários para depositar uma camada de solda plana. O segundo problema é a altura da camada que resulta da distância selecionada entre os cordões paralelos dentro de uma camada. Nesse contexto, o presente trabalho aborda os dois problemas citados anteriormente através do desenvolvimento de um modelo estatístico que pode mapear as variações da seção geométrica do cordão em função dos parâmetros de soldagem no processo GMAW pulsado. A seguir, esta metodologia define a estratégia para determinar a trajetória dos cordões de solda de cada camada com a finalidade de realizar a avaliação geométrica da recuperação e qualidade do preenchimento. Resultados práticos do ponto de vista geométrico da estratégia de preenchimento, aplicada a uma cavidade semelhante àquela resultante da remoção de uma trinca passante, são apresentados com o objetivo de validar a metodologia proposta.

Palavras-chave: GMAW Pulsado. Preenchimento de cavidades. Trajetórias de soldagem. Turbinas Hidroelétricas.

ABSTRACT

This work presents a study on the bead deposition planning strategy in order to allow the use of robotic welding on the task of filling the crack removal cavity. Therefore, when thinking about defining the necessary sequence and the distribution of weld beads to fill the cavity with metal, such that the deposition process can be robotized, some problems arise related to the bead section geometry dependence on the welding parameters and on the welding position. Such geometry will strongly influence the number of layers of weld beads needed, considering that the filling process is carried out in layers. In this case, the first problem to be faced is the definition of the distance between parallel beads necessary for the deposition of a flat weld layer. The second problem is the layer thickness that results from the selected distance between parallel beads within a layer. This work, therefore, addresses the two previously cited problems by developing statistical models that can map the bead section geometry variations due to changes in welding parameters for the pulsed GMAW process. Then this methodology defines the strategy to determine the trajectory of weld beads of each layer in order to perform the geometric evaluation of the recovery and quality of the filling. Practical results of geometric point of view of the strategy of filling, applied to a cavity such as the one resulting from the removal of a crack are presented in order to validate the proposed methodology.

Keywords: Pulsed GMAW. Cavity filling. Welding trajectories. Hydroelectric turbine.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ABORDAGEM DO TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 REPAROS POR SOLDAGEM EM TURBINAS HIDRÁULICAS.....	5
2.1.1 REPARO	5
2.1.2 CONSUMÍVEIS EMPREGADOS.....	7
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.....	8
2.2.1 Transferência por curto-circuito	8
2.2.2 Transferência globular	8
2.2.3 Transferência por spray	9
2.2.4 Transferência pulsada.....	9
2.3 VARIÁVEIS DO PROCESSO	12
2.4 ESTRATÉGIAS DE SOLDAGEM PARA PREENCHIMENTO MULTICAMADA ..	14
2.4.1 Geometria do cordão.....	14
2.4.2 Trajetórias de deposição de material	14
2.4.3 Modelos Geométricos da Seção de Cordões em Soldagem Multipasse.....	21
2.5 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTO.....	23
2.5.1 Planejamento experimental	23
2.5.2 Regressão linear múltipla	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 CONSUMÍVEIS.....	27
3.1.1 Metal de Adição	27
3.1.2 Metal de Base	27

3.1.3	Gas de Proteção	28
3.2	EQUIPAMENTOS	28
3.2.1	Fonte de soldagem	29
3.2.2	Câmara termográfica.....	30
3.2.3	Preparação das amostras para medição de geometria	30
3.2.4	Sistema para medição dos cordões	30
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
3.3.1	Seleção dos parâmetros de soldagem.....	32
3.3.2	Planejamento experimental cordões de solda isolados.....	35
3.3.3	Cordões de solda multipasses	38
3.3.4	Estratégias de preenchimento.....	47
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
4.1	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA	51
4.2	INCLINAÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM	52
4.3	NÚMERO DE CAMADAS DE SOLDA	54
4.4	RECOBRIMENTO DA SUPERFÍCIE PELO PROCESSO DE SOLDAGEM	54
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
5.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTROS AUTORES	61
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	64
6.1	CONCLUSÕES	64
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	APÊNDICE	71
A	MODELAGEM TAMANHO DO CORDÃO	72
A.1	MODELO DA ALTURA DO CORDÃO	73
A.2	MODELO DA LARGURA DO CORDÃO	76
A.3	MODELO MATEMÁTICO REDUZIDO	78
B	AJUSTE DA FUNÇÃO	81
C	CÓDIGO ARLA	84
D	DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DOS CORDÕES	87

LISTA DE FIGURAS

2.1	Trinca em pás de turbina: (a) Trinca no anel, (b) Trinca na borda [10]	6
2.2	Variáveis da corrente pulsada [25].	10
2.3	Cordões sequenciais (a), cordões intercalados (b) e preenchimento por camadas sucessivas intercaladas, adaptado de [34]	15
2.4	Preenchimento multicamada utilizando solda pelo processo plasma [5].....	16
2.5	(a) Imagem esquemática mostrando a remoção do material circunvizinho à trinca e (b) imagem mostrando a deposição de material, adaptado de [35]	16
2.6	Falha na reparação da trinca após soldagem, devido à formação de novas trincas durante o resfriamento da solda [35].....	17
2.7	Deposição dos cordões de solda antes do esmerilhamento (a), macrografia da multicamada após o esmerilhamento (b), adaptado de [32].....	17
2.8	Representação do preenchimento: (a) sequencial invertido e (b) alternado em um lado e outro da cavidade [6].....	18
2.9	Representação do preenchimento por cordões duplos [6]	18
2.10	Representação do preenchimento por cordões intercalados [6]	18
2.11	Corpo de prova após preenchimento metálico [6]	19
2.12	Corpo de prova para recuperação de uma cavidade por camadas sucessivas [26].....	20
2.13	Operações em reparação de trinca, adaptado de [2]	20
3.1	Equipamento utilizado para realização das soldas.....	29
3.2	Cantoneiras fixadas por parafusos distribuídos ao longo de seu comprimento	29
3.3	Representação esquemática do planejamento experimental adotado no trabalho	31
3.4	Exemplo de sinais de corrente e tensão de soldagem. $I_p=380$ A, $I_b=80$ A, $T_p=2,4$ ms $T_s=26$ V e $V_a=7$ m/min [26]	33
3.5	Aspecto do cordão de solda para vários gases: (a) Ar + 6% CO ₂ ; (b) Ar + 4% CO ₂ e (c) Ar + 2% O ₂	34
3.6	Planejamento Composto Central para três variáveis, adaptado de [42]	36
3.7	Dimensões geométricas do cordão de solda	37
3.8	Modelo de sobreposição mínima entre os cordões	39

3.9	(a) imagem seção transversal do cordão (b) Perfil da seção transversal do cordão: teste 1	40
3.10	Ajuste das funções ao perfil do cordão: (a) função parábola e (b) função senoidal..	41
3.11	Resíduos ao longo da largura do cordão	41
3.12	Corte transversal sobreposição mínima entre os cordões de solda.....	43
3.13	Variação da altura das camadas em função do percentual de sobreposição dos cordões	45
3.14	Sobreposição dos cordões de solda, depositados 10 cordões dispostos lado a lado formando uma camada de metal depositado.....	46
3.15	Visualização da altura do início e fim do cordão de solda [6].....	48
3.16	Representação do preenchimento sequencial invertido	49
3.17	Representação do preenchimento por cordões intercalados	49
3.18	Representação do preenchimento por duplo cordão.....	50
4.1	Desenho mecânico da simulação de cavidade resultante da remoção de uma trinca.	51
4.2	Corpo de prova representativo da cavidade após a remoção de uma trinca	52
4.3	Posição da tocha de soldagem a 60° com respeito à placa mata-junta	52
4.4	Influência da variação de taxa de deposição com ângulo de inclinação da tocha de soldagem de 60° : (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3	53
4.5	Altura final de duas camadas com sobreposição de 46%	54
4.6	Defeitos após preenchimento completo com cordões que iniciaram fora do volume da cavidade e terminaram também fora deste.....	55
4.7	Execução da trajetória de soldagem da primeira camada de deposição: (a) sequen- cial invertido, (b) intercalados e (c) cordões duplos	56
4.8	Corpos de prova após preenchimento completo: (a) sequencial invertido, (b) in- tercalados e (c) cordões duplos.....	56
4.9	Monitor de visualização da câmara termográfica	57
5.1	Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento sequencial invertida.....	60
5.2	Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento por cordões intercalados.....	60
5.3	Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento por cordões duplos.....	60
5.4	Comparação dos corpos de prova após preenchimento completo com os resultados de Pinheiro [6].....	61
5.5	Comparação da primeira camada de deposição com os resultados de Pinheiro [6]...	62
5.6	Comparação macrográfica das seções de corte do corpo de prova com os resultados de Pinheiro [6].....	62
5.7	Comparação do preenchimento metálico após etapa de soldagem com os resultados de Didenko e Zak [35]	63

A.1	Probabilidade normal VS Resíduos para altura do cordão	75
A.2	Superfície de resposta do modelo da altura do cordão	75
A.3	Probabilidade normal VS Resíduos para a largura do cordão	76
A.4	Superfície de resposta do modelo da largura do cordão	78
B.1	Macrografia dos três testes	81
B.2	Imagens macrograficas: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3, respectivamente	81
B.3	Perfil da seção transversal dos cordões de solda: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3, respectivamente	82
B.4	Ajuste da função ao perfil do cordão: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3.....	82

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparativo de trajetórias de soldagem para formação de camadas paralelas de solda	21
2.2	Comparativo do perfil geométrico do cordão em processos de soldagem	22
3.1	Composição química do material de base e de aporte (% em peso)	28
3.2	Período e frequência nos experimentos GMAW-P	32
3.3	Corrente média utilizada para cada velocidade de alimentação do arame nos testes GMAW-P	32
3.4	Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios no planejamento experimental	33
3.5	Valores codificados e reais das variáveis de entrada	36
3.6	Teste experimental de validação do modelo para o tamanho do cordão	38
3.7	Comparação dos ajustes de curvas nas funções	42
3.8	Relação da espessura da camada a partir da sobreposição mínima para os cordões depositados com os parâmetros do Teste 1	44
3.9	Testes da altura da camada em função da distância lateral entre os cordões de solda	45
4.1	Verificação da influência na variação de taxa de deposição com ângulo de inclinação da tocha de soldagem de 60°	53
A.1	Planejamento experimental para o tamanho do cordão	72
A.2	Resíduos para o modelo da altura do cordão	74
A.3	Resíduos para o modelo da largura do cordão	77
A.4	Valores obtidos significância da regressão para adequação do modelo matemático ..	78
A.5	Significância (P) dos coeficientes dos modelos completos	79
A.6	Valores de R^2 (ajustado), erros padrão e P-value para os modelos reduzidos	80
B.1	Teste experimental para o tamanho do cordão	81
B.2	Comparação dos ajustes de curvas nas funções	83

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABRE- VIAÇÕES

Símbolos

σ	Desvio padrão	
α	Pontos axiais	
N_f	Pontos da parte fatorial	
ξ	Valor real da variável de entrada	
D_a	Diâmetro de arame	[mm]
D_g	Diâmetro da gota	[mm]
F	Frequência de pulso	[Hz]
I_b	Corrente de base	[A]
I_c	Corrente de transição	[A]
I_m	Corrente média	[A]
I_p	Corrente de pico	[A]
S_m	Sobreposição mínima	[%]
T_s	Tensão	[V]
T_b	Tempo de base	[ms]
T_p	Tempo de pico	[ms]
T_c	Período	[ms]
V_a	Velocidade de alimentação de arame	[m/min]
V_s	Velocidade de soldagem	[mm/s]

Siglas

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ARLA	<i>ASEA Robot Language</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DBCP	Distância Bico De Contato até a Peça
ESAB	<i>Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding – Pulsed mode</i>
GMAW-S	<i>Gas Metal Arc Welding – Short Circuit Mode</i>
GRACO	Grupo de Automação de Controle
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
IREQ	<i>Institut de recherche Hydro-Québec</i>
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
PCC	Planejamento Composto Central (<i>Central Composite Design</i>)
UnB	Universidade de Brasília

1 INTRODUÇÃO

1.1 ABORDAGEM DO TEMA

Turbinas hidráulicas podem apresentar diversos problemas, porém, dois deles são mais comuns e considerados críticos. Devido ao seu modo de funcionamento, as turbinas hidráulicas estão sujeitas à erosão por cavitação e ao trincamento em regiões de alta concentração de tensões. Tanto a cavitação quanto as trincas que ocorrem nas turbinas devem ser reparadas, para evitar uma falha que poderia danificá-las ou mesmo inutilizá-las [1].

A recuperação das áreas danificadas na pá da turbina é feita por meio da deposição de material por soldagem, buscando-se assim recompor o perfil geométrico original da pá do rotor. Inicialmente, para realizar a recuperação é preciso tornar o local onde se localiza a região danificada acessível à equipe que fará a recuperação em várias etapas. A primeira etapa é o condicionamento da superfície danificada da pá para a soldagem. Este condicionamento é feito por meio de goivagem e, em seguida, com esmerilhamento [2].

Uma vez esmerilhada a região danificada adquire uma superfície suave¹, própria para a aplicação da solda. Na segunda etapa a estratégia de recuperação é feita depositando-se então tantas camadas de soldagem quanto forem necessárias para o preenchimento da cavidade. A etapa seguinte é um novo esmerilhamento que visa obter uma superfície lisa, próxima ao perfil original da pá do rotor [3]. Normalmente são procedimentos de alto custo executados em locais insalubres e nocivos. Além disso, a qualidade obtida pelo trabalho humano em processo repetitivo e prolongado tende a sofrer variações durante o processo [4].

Nos últimos anos, algumas tentativas têm sido realizadas para automatizar esses trabalhos de reparação, principalmente na recuperação de cavidades de erosão por cavitação [3, 5]. No caso de recuperação de trincas por fadiga, a soldagem manual ainda é a principal forma de depositar o metal.

¹Define-se aqui superfície suave como aquela que satisfaz requisitos pre-definidos de máxima rugosidade admissível

De maneira genérica, a cavidade resultante da erosão por cavitação tem um formato fechado, uma vez que sua ocorrência geralmente se dá em áreas a uma certa distância das bordas da pá ou de outros componentes [3]. Já no caso de trincas, estas se desenvolvem a partir de um ponto de início, geralmente localizado em uma fronteira da pá, onde há algum fator de concentração de tensões. Sua propagação se dá no sentido do volume interno da pá, por vezes, transpassando parcial ou totalmente a sua espessura [1].

O comprimento da trinca depende do número de ciclos de fadiga a que o material foi submetido. Para que se possa parar o crescimento de uma trinca, há a necessidade da remoção do entalhe por ela provocado no material, de modo a reduzir o fator de concentração de tensões. No caso das pás de uma turbina, a trinca reduz a área pela qual as tensões se distribuem na pá, causando uma elevação de seus valores nas seções não danificadas, aumentando desta forma, a probabilidade de aumento na taxa de crescimento da trinca já iniciada ou de ocorrência de novas trincas.

Uma das maneiras utilizadas para a correção deste problema é a remoção completa da trinca por meio de esmerilhamento ou por corte e remoção do material circunvizinho à trinca, de modo a eliminar por completo o entalhe concentrador de tensões. A geometria da cavidade resultante, em consequência, tem a característica de ser aberta e depende de aspectos geométricos da trinca (comprimento, profundidade), da pá (espessura e curvatura da região afetada) e da tocha de soldagem. Em casos de trincas que atravessam a espessura da pá, após sua remoção, há a necessidade do uso de uma placa mata-junta (*backing plate* em inglês) em um dos lados da cavidade, de modo a propiciar o suporte para a primeira camada de deposição. Além disso, as superfícies limítrofes da cavidade devem ser suaves, de modo a possibilitar a deposição de metal com menor risco de apresentar defeitos tais como retenção de inclusões, porosidade ou falta de fusão [6].

Outro aspecto a ser levado em conta na recuperação de trincas é a estratégia de preenchimento. Esta pode ser baseada em técnicas de manufatura aditiva [7], em que a cavidade a ser preenchida deve ser fatiada em camadas paralelas e cada camada deve ser criada a partir da deposição de cordões de solda. No caso do preenchimento manual, o soldador faz o papel de guiar a tocha, assim como de controlar a geometria da camada depositada durante o processo de deposição. Já no caso do processo robotizado, surgem dificuldades decorrentes da necessidade de se planejar a trajetória necessária ao robô, de modo que seja possível a este depositar cordões que formem cada camada com a qualidade superficial necessária a sua superposição por uma nova camada.

Para que o planejamento possa ser feito, informações geométricas esperadas para cada cordão depositado, em função dos parâmetros de soldagem, devem ser conhecidas, assim como uma estratégia de deposição deve ser especificada. Caso a estratégia de deposição seja de superposição

de camadas paralelas de metal, necessita-se também conhecer a espessura esperada para cada camada, uma vez que essa espessura define o número de camadas a serem depositadas, de modo a se preencher o volume da cavidade. Parâmetros importantes para a definição da espessura da camada envolvem a geometria de cada cordão individual, a razão de sobreposição entre cordões dispostos paralelamente, assim como a posição de soldagem.

De acordo com o exposto nos parágrafos anteriores, observa-se que o problema de recuperação de cavidades resultantes da remoção de trincas em rotores de usinas hidrelétricas ainda demanda estudos de modo se ter a total automatização do processo de recuperação. Neste trabalho, desenvolve-se um estudo sobre as estratégias de deposição, realizando uma análise sobre a dependência da geometria de cada camada dos parâmetros de soldagem, assim como da razão de sobreposição entre cordões depositados sequencialmente e sua influência na altura da camada depositada e na sua planicidade.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é desenvolver uma estratégia para recuperação da superfície danificada da pá de uma turbina hidráulica após a remoção de uma trinca, por deposição robotizada de planos paralelos de metal de solda. Estes são formados por cordões paralelos, não necessariamente lineares, depositados por meio do processo de soldagem a arco gás metal pulsado (GMAW-P, *Pulsed Gas Metal Arc Welding*) com eletrodo tubular inox de alma metálica. Mais especificamente, pretende-se:

- Determinar envelope de parâmetros de soldagem do processo GMAW-P visando obtenção de cordões com qualidade adequada, com processo estável e baixa ejeção de respingos e baixa produção de fumos.
- Determinar um modelo estatístico que relacione os parâmetros de soldagem com a geometria esperada do cordão e a espessura da camada de solda, de modo a se obterem parâmetros para a realização do fatiamento do volume a ser preenchido.
- Determinar a estratégia de fatiamento do volume, de modo a possibilitar a sua reconstrução a partir da deposição de camadas paralelas de metal, sendo estas formadas por cordões de solda.
- Realizar testes de validação para as estratégias propostas acima, avaliando a qualidade do preenchimento.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte maneira: No presente capítulo, é feita a introdução ao tema abordado. O segundo capítulo apresenta uma revisão sobre os conhecimentos fundamentais para a compreensão do presente trabalho. Este capítulo aborda outros projetos que possuem funcionalidade semelhante, mas que adotaram métodos diferentes de desenvolvimento. No terceiro capítulo, apresenta-se uma descrição dos materiais e dos equipamentos utilizados, além da metodologia utilizada com as etapas que foram realizadas durante o trabalho. Neste capítulo também apresentam-se os resultados de sobreposição dos cordões para deposição de material em camadas e a estratégia de preenchimento adotada para recuperação da superfície danificada. No quarto capítulo, têm-se a etapa da validação experimental e os principais resultados obtidos. O quinto capítulo apresenta uma discussão dos resultados obtidos, comparando-os com aqueles divulgados na literatura. O sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas com a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos temas envolvidos nesta pesquisa. Inicialmente, apresenta-se o tópico que trata dos reparos e consumíveis em turbinas hidráulicas e também os diferentes processos de soldagem GMAW. Em seguida, mostra uma abordagem sobre estratégias de soldagem para preenchimento por camadas, refere-se à geometria dos cordões como característica de grande importância nas estratégias de soldagem seguida pela trajetória de deposição, que influencia nas características finais da camada de solda. A seguir apresenta o estudo de modelos de sobreposição, sendo que a qualidade superficial da camada é determinada pelo afastamento entre os passes laterais. Finalmente, apresenta-se a abordagem do projeto e análise de experimentos no processo de soldagem.

2.1 REPAROS POR SOLDAGEM EM TURBINAS HIDRÁULICAS

2.1.1 REPARO

As turbinas hidráulicas representam uma das alternativas de maior aplicação para gerar a eletricidade. Porém, a erosão por cavitação e/ou o surgimento de trincas por fadiga promovem, direta ou indiretamente, a perda de massa nas pás das turbinas hidráulicas e respondem por elevados custos de manutenção. Cerca de metade das paradas programadas são para manutenção de equipamentos elétricos e a outra metade para a manutenção de turbinas e de seus respectivos componentes [8].

A causa mais frequente das paradas é o dano cavitacional [3, 9], pois este muda o perfil hidrodinâmico do equipamento, levando a altas tensões dinâmicas no rotor e nas estruturas associadas, além de provocar queda na eficiência e redução da vida útil do equipamento. Entretanto, as trincas por fadiga são vistas com maior preocupação, dado o risco inerente de falha catastrófica que inviabilize o funcionamento do equipamento [1]. Portanto, as trincas ocorrem devido à fadiga mecânica, geralmente agravadas nas bordas de saída do fluido e são menos expressivas em número, mas não menos preocupantes, pois provocam o desbalanceamento do rotor e também

uma redução da eficiência na geração de energia [6]. A Figura 2.1 mostra exemplos de trincas ocorridas em turbinas na usina hidrelétrica de Itaipu.

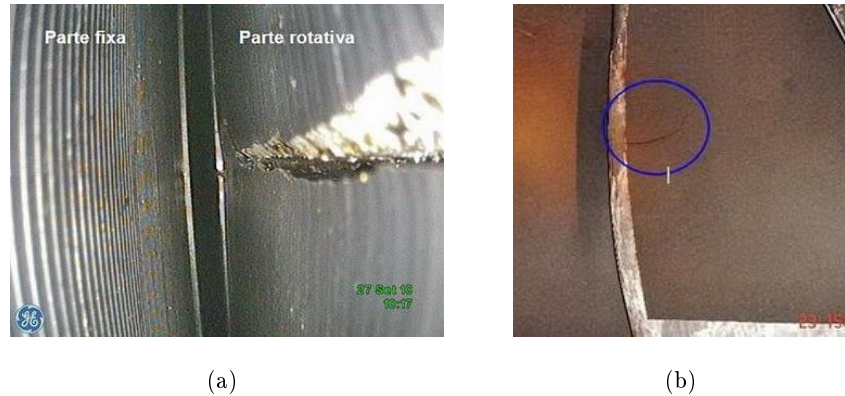


Figura 2.1. Trinca em pás de turbina: (a) Trinca no anel, (b) Trinca na borda [10]

A trinca mostrada na Figura 2.1 (a) possui 380 mm de comprimento no sentido axial e 35 mm de largura no sentido radial. Já a mostrada na Figura 2.1 (b) A partir da borda de saída da pá, possui aproximadamente 500 mm de comprimento [10].

Existem diferentes processos de soldagem que ao longo do tempo foram sendo utilizados com o intuito de reparar as regiões danificadas. O primeiro processo a ser utilizado foi o de soldagem manual a arco com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding*, SMAW) que, dentre os processos de soldagem a arco voltaico, é o mais utilizado devido à simplicidade, ao baixo custo do equipamento, à variedade de ligas disponíveis e à disponibilidade de mão de obra apta para produzir soldas de qualidade satisfatória. Este processo pode ser aplicado tanto na oficina como em campo, em locais de difícil acesso e em condições extremas.

Entretanto, com a necessidade de uma maior taxa de deposição e, conseqüentemente, uma maior produtividade no reparo de áreas cavidadas, tornou-se comum a utilização do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) na recuperação das turbinas. Este apresenta vantagens por ser um processo semiautomático [11], além de se obterem também depósitos que proporcionam um acabamento superficial de melhor qualidade em relação ao obtido por meio do processo SMAW.

Outro processo de soldagem muito usado atualmente é o arame tubular (*Flux Cored Arc Welding*, FCAW), que foi desenvolvido visando unir as vantagens do processo MIG/MAG (semiautomático ou automático) com as do processo com eletrodo revestido. Além disso, os processos GMAW e FCAW têm apresentado, ao longo dos anos, contínuos desenvolvimentos devido às suas boas flexibilidades e custos reduzidos, sendo esses processos os mais adequados à mecanização [12].

Outro processo de soldagem muito pesquisado e aos poucos introduzido no reparo de turbinas em campo é o PTA (Plasma a Arco Transferido). Este tem um grande potencial comparado a outros processos devido à elevada produtividade, excelente qualidade do depósito, alta estabilidade do plasma, baixa diluição bem como maior flexibilidade na formulação de ligas [13].

As condições nas quais os soldadores de reparo trabalham nas usinas hidrelétricas são bem distantes das ideais, já que o acesso à peça de trabalho é muito limitado e algumas vezes até bloqueado por outras peças, forçando-os frequentemente a segurar a tocha de uma maneira não usual, além de terem que fazer movimentos complexos necessários para o enchimento das superfícies desgastadas [8].

O processo de soldagem manual consiste nos seguintes passos: parada da turbina; preparação da superfície pelo processo de esmerilhamento, a seguir, deposição de material pelo processo de soldagem, que é realizado através de camadas formadas por cordões de solda. Uma camada é colocada sobre a outra interpondo-se os cordões de solda de cada uma delas. A operação de recuperação é concluída com um esmerilhamento final, onde se busca suavizar a superfície [5].

Um dos fatores de grande influência na qualidade da solda é a capacidade do soldador de manter trajetórias e distância constante entre a ferramenta de solda e a peça que está sendo soldada. Neste caso, devido às condições de processos repetitivos e prolongados e o cansaço gerado no soldador, a qualidade de sua solda vai gradualmente deteriorando-se. No caso da recuperação robotizada isso não ocorre. Uma vez que a superfície danificada é medida, as trajetórias de deposição são de alguma forma determinadas e o robô as segue precisamente ao mesmo tempo em que ocorre o processo de deposição. Esta característica faz com que a solda robotizada tenha maior consistência que a solda manual, desde que as condições de operação do robô se mantenham constantes.

2.1.2 CONSUMÍVEIS EMPREGADOS

Os materiais utilizados na fabricação das turbinas tem sido alvo constante de pesquisa e desenvolvimento. A partir da década de 60 têm sido utilizados aços inoxidáveis martensíticos macios contendo de 12 a 13 % de cromo, de 2 a 5 % de níquel e menos que 0,06 % de carbono na construção de turbinas hidráulicas [14]. Estes aços apresentam elevada tensão de escoamento e tenacidade, elevada resistência à cavitação e razoável soldabilidade [15]. Os aços martensíticos com baixo teor de carbono, como o aço CA6NM, são sempre temperados e revenidos [16]. Como o material de base de alguns rotores ou componentes de turbinas hidráulicas é o aço inoxidável martensítico macio CA-6NM e, geralmente, o dano causado pela cavitação promove a perda de grande parte de material, o reparo deve ser executado com materiais que sejam metalurgicamente compatíveis com o metal de base e que resistam melhor aos efeitos da cavitação [15, 17]. Na

literatura, citam-se aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 308 ou 309, ou ligas com 8 a 10 % de Cobalto, que também são utilizados como revestimentos para os componentes feitos em aço C-Mn [18].

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

O processo de soldagem GMAW ou MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) é amplamente conhecido e caracteriza-se pela geração de um arco elétrico entre um arame alimentado continuamente e o metal de base, protegida por um gás inerte ou mistura de gases (argônio, dióxido de carbono, hélio ou oxigênio). O processo é denominado MIG quando o gás utilizado é inerte, ou seja, um gás normalmente monoatômico como Argônio ou Hélio, e que não tem nenhuma atividade química com a poça de fusão, e MAG quando o gás utilizado é ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão.

No processo GMAW, a maneira e o tamanho das gotas de material fundido que atravessa o arco elétrico é importante para a qualidade da junta soldada. Basicamente existem quatro modos de transferência metálica: por curto-circuito, globular, spray e pulsado. Cada um destes modos apresenta características de transferência diferentes.

2.2.1 Transferência por curto-circuito

Este tipo de transferência é caracterizado por gotas formadas na ponta do eletrodo, que tocam a poça de fusão e, durante cada toque, ocorre a extinção momentânea do arco. A gota é transferida por tensão superficial e ocorre a baixas e moderadas correntes e baixas tensões no arco, o que proporciona um arco curto [19, 20]. Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar formação intensa de respingos.

2.2.2 Transferência globular

É o tipo de transferência localizada entre a de curto circuito e a spray. Ocorre com valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que no caso anterior. Porém, a transferência é mais caótica e imprevisível devido à transferência das gotas através da coluna do arco ocasionar curtos circuitos eventuais [11]. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta. Geralmente, acabam sendo maiores que o diâmetro do eletrodo. A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado, como gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, sua utilização esta limitada à posição plana [11, 21].

2.2.3 Transferência por spray

Transferência Spray é desejável em campos industriais, devido à sua alta estabilidade e baixa geração de respingos. A uma determinada corrente de transição (I_c), ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas e em consequência uma frequência de destacamento maior, de modo que a transferência se processa sobre velocidades altas [20, 21]. As gotículas produzidas têm tamanho menor que o comprimento do arco, e são transferidas pela força eletromagnética dentro do próprio arco. Este modo de transferência apresenta alta taxa de deposição de solda, por isso está limitado à posição plana de soldagem, principalmente devido ao tamanho da poça resultante das altas correntes envolvidas [22].

A corrente de transição situa-se em um intervalo de correntes, em que se observam alterações no modo de formação da gota, passando de grandes gotas em baixa frequência para gotas pequenas com alta frequência de destacamento. Isso ocorre devido à variação da intensidade relativa das forças atuantes no processo de formação e destacamento das gotas (força de tensão superficial, arrasto aerodinâmico, força gravitacional e força eletromagnética), principalmente a força eletromagnética, que aumenta com a segunda potência da densidade corrente elétrica.

2.2.4 Transferência pulsada

A transferência pulsada é uma variação da transferência em spray e caracteriza-se basicamente por apresentar dois níveis de corrente [11]. Uma corrente suficientemente baixa, denominada Corrente de Base, que tem como finalidade manter o arco e que não gera a transferência, mas produz o início da fusão; o outro é um nível alto, denominado Corrente de Pico, que gera energia suficiente para fundir o arame e destacar a gota da sua extremidade, dando boa penetração ao cordão de solda. Este processo de soldagem produz cordões de solda com uma alta qualidade e livre de defeitos [23]. Adicionalmente, resulta em menor nível de distorções e maior controle da poça de fusão, o que possibilita a soldagem fora de posição [24].

No modo de transferência por arco pulsado, os parâmetros operacionais a serem ajustados na fonte são: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b), os quais em conjunto com as variáveis do processo de soldagem: velocidade de alimentação do arame e da tensão de soldagem, determinam as características do cordão de solda. Os tempos de pico e de base também definem a frequência de pulso (F). Estes parâmetros permitem o aparecimento da corrente média, obtida para uma forma de onda retangular, esta é dada pela Equação (2.1).

$$I_m = \frac{I_p * T_p + I_b * T_b}{T_p + T_b} \quad (2.1)$$

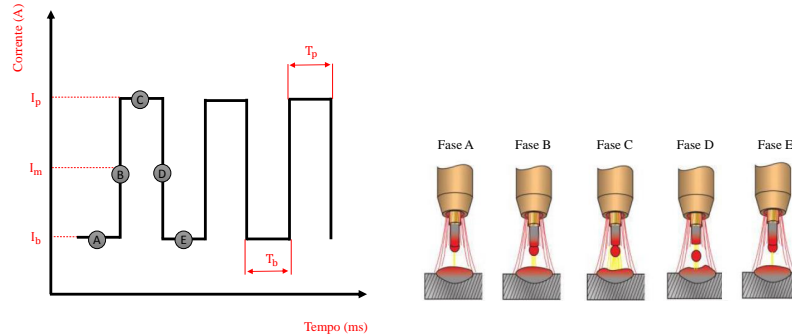


Figura 2.2. Variáveis da corrente pulsada [25].

Na Figura 2.2, podem-se visualizar as variáveis da corrente pulsada e identificar as seguintes fases [25]:

- Fase A, a corrente de base serve principalmente para manter o arco aberto e pré-aquecer o material de base e do eletrodo;
- Fase B, subida da corrente para o nível de corrente de pulso;
- Fase C, o estrangulamento do material fundido na ponta de eletrodo;
- Fase D, a descida da corrente e separação da gota do eletrodo;
- Fase E, a gota é transferida para a poça de fusão.

A definição dos parâmetros operacionais da soldagem em corrente pulsada envolve portanto uma gama de fatores variáveis que afetam o destacamento da gota, a sua dimensão, a velocidade de fusão do arame e a estabilidade do arco. Para a seleção dos fatores mais adequados a uma determinada aplicação, faz-se necessário um sólido conhecimento do efeito individual de cada um dos parâmetros envolvidos sobre o comportamento dinâmico do processo. De acordo com Chavez [26], a determinação dos parâmetros da transferência por arco pulsado é baseada em critérios fundamentais, utilizando GMAW-P com arame tubular:

- **Critério de Burnoff para GMAW Pulsado**

A metodologia busca o equilíbrio entre a taxa de fusão do arame e da velocidade de alimentação do arame (V_a). Como a corrente média é proporcionalmente relacionada com a fusão do

arame, são estabelecidas medidas entre a corrente média (I_m) e a velocidade de alimentação do arame (V_a). Segundo Chavez [26] este critério consiste na construção de uma relação funcional para representar todas as condições possíveis dos parâmetros de pulso (I_p , I_b , T_p , T_b) associadas com uma corrente média (I_m). Esta relação inclui um espaço de trabalho, que abrange todas as combinações possíveis de parâmetros e representa uma região chamada Zona Paramétrica. Com esse critério e outros são analisados os dados de tensão e corrente, no modo de transferência convencional goticular ou spray, com um tamanho da gota com diâmetro próximo ou igual ao diâmetro do arame entre ($1,15*d$) e ($0,9*d$), que é o mais adequado para obter boas características geométricas no processo GMAW-P.

Segundo o mesmo autor [26], considerando a Equação (2.2), é possível relacionar e calcular o período total T_c para a transferência de uma gota, em função da velocidade do arame, diâmetro da gota e diâmetro do arame. Este período permite calcular a frequência de transferência F , através da Equação (2.3). Assim, elegendo adequadamente os valores da velocidade de alimentação do arame (V_a), do diâmetro da gota (D_g), e diâmetro de arame (D_a), se oportuniza a variação da frequência de transferência.

$$T_c = \frac{40 * (D_g)^3}{(D_a)^2 * V_a} \quad (2.2)$$

$$F = \frac{1000}{T_c} \quad (2.3)$$

- **Critério da transferência metálica**

A transferência metálica do tipo spray deve ser obtida mesmo a baixas velocidades de alimentação do arame, a qual, caso contrário, resultaria numa transferência tipo globular.

- **Critério estabilidade do arco**

A corrente de base deve manter um valor limite mínimo para manter o arco estável, pois para valores abaixo desse limite o arco se extingue.

- **Critério de destacamento da gota**

O destacamento da gota é determinado, principalmente, pelos valores de I_p e T_p e neste caso, o efeito dos parâmetros de base é bem menor. As melhores condições de transferência ocorrem geralmente quando uma gota é associada a cada pulso de corrente. O valor de I_p é definido sempre acima do valor da corrente de transição ou corrente crítica (corrente para a qual

o diâmetro das gotas transferidas é aproximadamente igual ao diâmetro do arame). O emprego de uma corrente de pico, durante um reduzido período de tempo, com valor acima da corrente crítica, torna possível a transferência de uma gota por cada pulso [26].

2.3 VARIÁVEIS DO PROCESSO

O processo GMAW é influenciado por algumas variáveis, tais como: corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade de soldagem, extensão do eletrodo (*stick-out*), inclinação da tocha de soldagem, tipo de junta, diâmetro do eletrodo, a proteção gasosa e velocidade de alimentação do arame, [27]. Vale ressaltar que o conhecimento e controle destas variáveis são essenciais para a obtenção de soldas de qualidade satisfatória. Estas variáveis não são completamente independentes e mudanças em uma delas requerem mudanças em uma ou mais das outras para produzir os resultados desejados [20].

A corrente de soldagem tem influência direta na taxa de deposição, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sendo assim, sua escolha correta vai depender das espessuras das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda. Além disso, uma corrente de baixa intensidade pode acarretar pouca estabilidade ao arco elétrico. Mantendo-se constantes as variáveis do processo e aumentando-se o valor da corrente, percebe-se a ocorrência de aumento na penetração e na profundidade da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição [11].

A tensão é considerada como um dos parâmetros mais influentes neste processo, por afetar tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão de solda. A tensão de soldagem e o comprimento do arco estão diretamente relacionados sob o mesmo aspecto, ou seja, baixas tensões tenderão a produzir baixos comprimentos de arco e vice-versa. A potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda. Assim, para uma corrente constante, o aumento da tensão do arco provoca maior largura e menor altura do cordão, melhor molhamento (ou distribuição do metal depositado) e redução da penetração [11].

Um arco com comprimento muito pequeno pode causar curtos-circuitos acidentais quando a transferência é globular ou spray, resultando em instabilidade do arco e conseqüente porosidade no cordão, excesso de respingos e mordedura [20, 28]. Já o comprimento muito grande tende a oscilar e a causar um cordão de penetração e largura irregulares [11].

A velocidade de soldagem, definida como a taxa de deslocamento do arco ao longo da junta, influencia a energia de soldagem, ou seja, a quantidade de calor cedida à peça: quanto maior a

velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de comprimento. Com o controle da velocidade de soldagem, pode-se controlar a penetração e o tamanho do cordão. Apesar de ser uma variável de processo independente da corrente de soldagem, a velocidade de soldagem deve ser selecionada em conjunto com aquela para proporcionar a geometria desejada. Uma velocidade de soldagem muito baixa pode causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica, além de elevar o custo da operação. Por outro lado, velocidades excessivas provocam menor penetração e menor largura do cordão, além de diminuir a ação de molhamento, aumentando a tendência a mordeduras, ao apagamento do arco e a porosidades [29].

Outra variável importante do processo GMAW refere-se ao tipo de gás de proteção, bem como a sua vazão, já que são responsáveis diretos por vários fenômenos observados nos cordões de solda. A primeira finalidade dos gases é proteger a região soldada dos efeitos dos gases atmosféricos, os quais são compostos principalmente por oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. Estes componentes podem acarretar a formação de óxidos em maiores e, em menores proporções. O hidrogênio proveniente da dissociação da água presente no ar, ou de hidrocarbonetos presentes no metal de base, pode ficar retido na poça solidificada, causando trincas. As consequências desse fato podem ser expressas por soldas deficientes com retenção de escória, porosidades e fragilizações do cordão [30]. Portanto, precauções devem ser tomadas com o intuito de excluir esses gases nocivos das proximidades da poça de fusão, fato esse realizado através dos gases de proteção.

A extensão energizada ou livre do arame (*Stick out*) ou a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame (normalmente o tubo de contato), e a ponta do eletrodo ainda não fundida, é outra variável importante do processo de soldagem. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá assim mais tempo para aquecer-se por efeito Joule. Se for muito pequeno, o calor gerado não será suficiente para fundir o eletrodo adequadamente; por outro lado, se for muito elevado, o arco tornar-se-á instável, a proteção gasosa deixará de existir e a consequência será o aparecimento de porosidades [31].

Ao se aumentar a extensão livre do arame (*Stick out*) e a distância do bico de contato até a peça (DBCP), sem alteração dos demais parâmetros, haverá um aumento da queda de tensão; a corrente de solda e a potência do arco reduzem-se. Quanto maior for o comprimento livre do arame, maior será a resistência ao aquecimento. Desse modo, o arame pode vir a ser fundido por um arco de potência insuficiente. Nessas condições, a zona de solda recebe pouco calor, podendo vir a ocorrer pontos frios na soldagem; em geral, longos arames livres reduzem a frequência das gotas e aumentam a perda de deposição por ocorrência de respingos [31].

2.4 ESTRATÉGIAS DE SOLDAGEM PARA PREENCHIMENTO MULTICAMADA

O preenchimento da cavidade pelo manipulador de soldagem requer a definição de uma estratégia de preenchimento. A definição dessa estratégia é influenciada pela geometria do cordão de solda e pela trajetória em cada passe. Na formação de múltiplos passes, o controle de largura, reforço e penetração visa garantir a continuidade dos cordões. Esta continuidade é associada à seleção dos parâmetros de soldagem, sendo que uma seleção inadequada pode resultar em cordões com grande variação de altura e largura ou falta de fusão do metal depositado [6].

2.4.1 Geometria do cordão

A geometria dos cordões de solda é uma característica de grande importância na definição das estratégias de preenchimento. É a base para programar e automatizar os processos de soldagem em reparos de peças metálicas, possibilitando definir a quantidade necessária de passes e a posição específica de cada cordão. Com isso, as pesquisas buscam cordões de solda que permitam reduzir o número de passes necessário para se obter o formato final, diminuindo, assim, custos de deposição de material de solda e de usinagem [3].

Um exemplo onde a geometria dos cordões é de grande importância é na recuperação das pás das turbinas hidráulicas. Nesses casos, a reconstrução requer que se depositem cordões para deposição de material em camadas, permitindo a remoção de material após esmerilhamento para dar o acabamento adequado [3, 5].

A presença ou ausência de material de suporte para os cordões também altera suas geometrias. Estas também são dependentes das condições iniciais da cavidade a ser preenchida e da estratégia adotada (ver item 2.4.2). Outros fatores ainda interferem na geometria do cordão e não são consideradas nesse trabalho, como posição de soldagem, taxa de resfriamento e aporte térmico.

2.4.2 Trajetórias de deposição de material

A trajetória de deposição também influencia as características finais da camada de solda. A variação dessa trajetória influencia no preenchimento solidificado, no gradiente térmico e nas tensões geradas pela deposição [6, 32]. O preenchimento gerado com deposições de cordões sequenciais (com direção igual) tende ser mais homogêneo, com uma direção de solidificação constante em todas as camadas, enquanto nas deposições de cordões sequenciais inversos (com direção ida e volta), a direção de crescimento, que segue o escoamento de calor, muda a cada

cordão [33].

A fim de observar o efeito do perfil da solda e a qualidade superficial da camada, Siminski [34] apresenta três formas de preenchimento de cavidades: rastro, contorno e espiral. Essas formas de preenchimento são distintas de acordo com o tipo de trajetória a ser percorrida internamente em uma cavidade. Em cada tipo de trajetória, foram aplicados cordões intercalados e sequenciais.

A Figura 2.3 mostra três cortes transversais utilizando cordões sequenciais e cordões intercalados. Na Figura 2.3(b), foram criadas duas seqüências iniciais internas que serviram de apoio ao preenchimento restante (hachura à direita). Essa seqüência resultou superior qualidade superficial, porém a geometria de cada cordão não foi considerada única a todos os cordões. A figura 2.3(c) mostra o preenchimento por camadas sucessivas intercaladas, em que se produz geometria semelhante dos cordões para diferentes camadas, exceto nos cordões laterais.

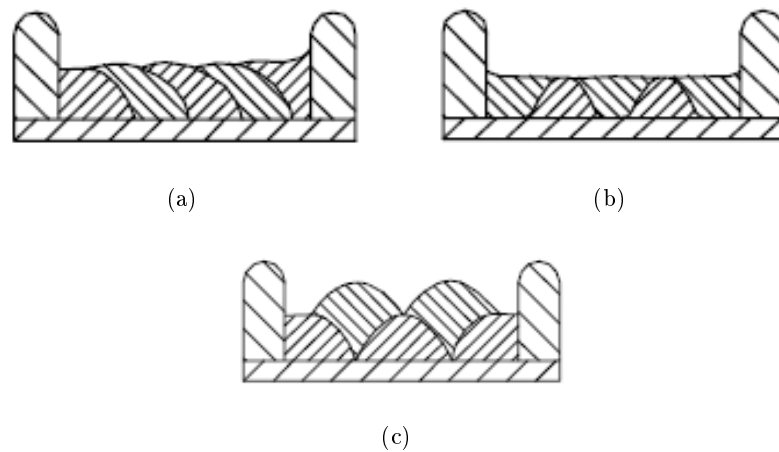


Figura 2.3. Cordões sequenciais (a), cordões intercalados (b) e preenchimento por camadas sucessivas intercaladas, adaptado de [34]

Em 2005, Nicholson [4] apresenta procedimentos de reconhecimento de cavitação através do uso de uma câmera CCD e o preenchimento monocamada da superfície danificada. Portanto, nesse estudo não se deu relevância sobre a geometria e comportamento multicamada. Porém, na sua tese, o autor divide o planejamento de trajetórias em três partes: trajetórias de aproximação e de afastamento, trajetórias de soldagem e trajetórias entre operações sucessivas. Essas trajetórias, individualmente, são definidas por pontos sequenciais executadas pelo robô, denominados fly-by points [4].

Os estudos descrito por Bonacorso e Dutra [5] que fez uso do ROBOTURB, propõe o preenchimento exclusivo de cavitação, realizando a execução de trajetórias por camadas com o processo plasma alimentada por arame, o qual preencheu uma profundidade de 8,4 mm utilizando arame de aço inox e-309L em três camadas com sobreposição entre cordões sequenciais de 50%, como mostrado na Figura 2.4.

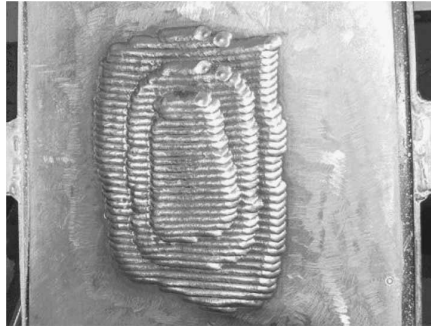


Figura 2.4. Preenchimento multicamada utilizando solda pelo processo plasma [5]

Em 2012, Didenko e Zak [35] apresentaram um estudo de preenchimento de cavidades provenientes de remoção de trinca. Nesse estudo, as trincas consideradas têm seu início em um ponto localizado em uma fronteira de uma das estruturas de uma turbina hidráulica e sua propagação se dá no sentido do volume interno da mesma estrutura, transpassando totalmente a sua espessura. Na recuperação de uma dessas trincas, antes de fazer a reparação por soldagem, a trinca foi completamente removida por esmerilhamento e remoção do material circunvizinho, de modo a eliminar por completo o entalhe concentrador de tensões (ver Figura 2.5 (a)). Já na etapa de soldagem foram definidas as trajetórias para deposição dos cordões sem temperatura de pré-aquecimento no componente, e também o processo TIG, o tempo de execução entre os cordões de solda, o tipo de material a depositar (aço inoxidável TIG 310) e corrente de soldagem (ver Figura 2.5(b)).

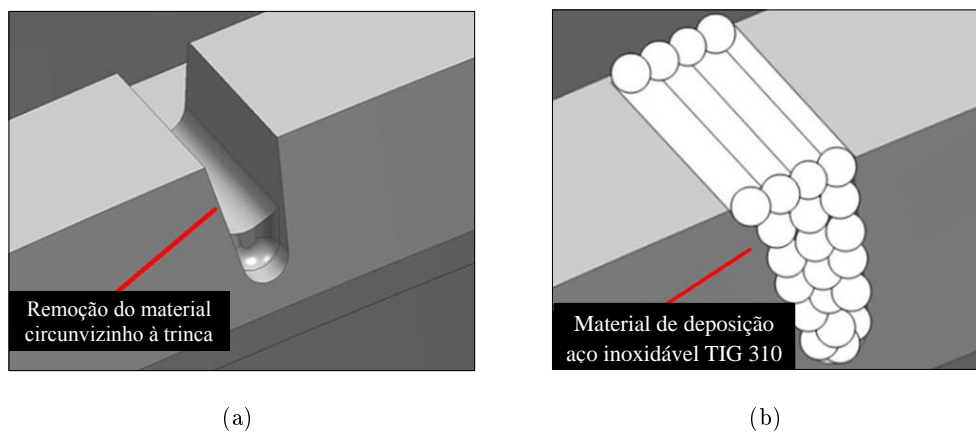


Figura 2.5. (a) Imagem esquemática mostrando a remoção do material circunvizinho à trinca e (b) imagem mostrando a deposição de material, adaptado de [35]

Após etapa de soldagem os autores [35] mostraram que os resultados foram insatisfatórios, apresentando novas trincas nas laterais do cordão de solda, como consequência da contração

térmica do material durante o resfriamento da solda, conforme mostrado na Figura 2.6.



Figura 2.6. Falha na reparação da trinca após soldagem, devido à formação de novas trincas durante o resfriamento da solda [35]

Posteriormente, Godin et al.[32] apresentaram um estudo de preenchimento de cavidades, no qual quatro camadas de solda foram depositadas estrategicamente sobre um corpo de prova chanfrado a 90° , como mostra a Figura 2.7. As soldagens foram feitas usando o robô SCOMPI e os cordões foram depositados intercaladamente com uma temperatura de interpasse de 200°C . Após deposição das camadas de solda, foi feito o esmerilhamento ao nível da superfície das placas, a fim de simular uma condição normal de reparação na pá da turbina.

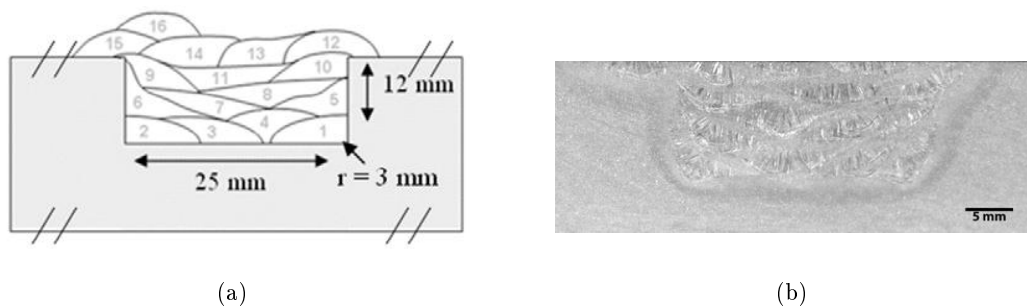


Figura 2.7. Deposição dos cordões de solda antes do esmerilhamento (a), macrografia da multicamada após o esmerilhamento (b), adaptado de [32]

Em 2014, Pinheiro [6] apresenta o preenchimento de uma simulação de cavidade de trinca parcialmente passante, considerando cordões retilíneos e paralelos à bissetriz do ângulo formado pela intersecção entre a placa mata-junta e as superfícies laterais da cavidade. Três diferentes trajetórias foram testadas: sequencial invertida, por cordões duplos e por cordões intercalados. A Figura 2.8, mostra o sequenciamento de cordões lado a lado, iniciados fora da região da trinca e finalizados na região interna. Uma variação nesse modo foi também tentada, em que os cordões eram depositados alternadamente em um lado e outro da cavidade (Figura 2.8 b). A alternância na deposição dos cordões durante o preenchimento de uma cavidade propicia melhor distribuição de calor na região e a redução das tensões residuais [26].

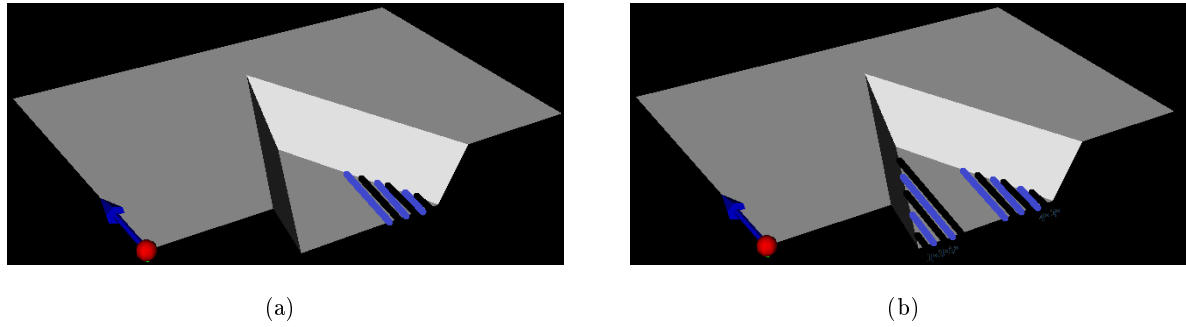


Figura 2.8. Representação do preenchimento: (a) sequencial invertido e (b) alternado em um lado e outro da cavidade [6]

Em seguida a Figura 2.9 mostra uma trajetória para possíveis soluções de inclusões indesejadas resultantes de instabilidades na deposição metálica durante a abertura e cessar do arco elétrico. Essas inclusões podem ser responsáveis por início de novas trincas. Neste caso os cordões iniciaram e terminaram na extremidade proximal da trinca, permanecendo essas inclusões fora da cavidade.

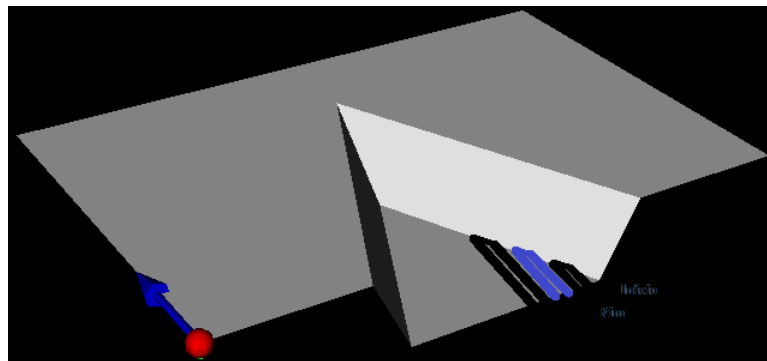


Figura 2.9. Representação do preenchimento por cordões duplos [6]

Já na Figura 2.10, os cordões foram intercalados de forma que os cordões pares (cor azul) criem paredes de suporte para os cordões ímpares (cor preta).

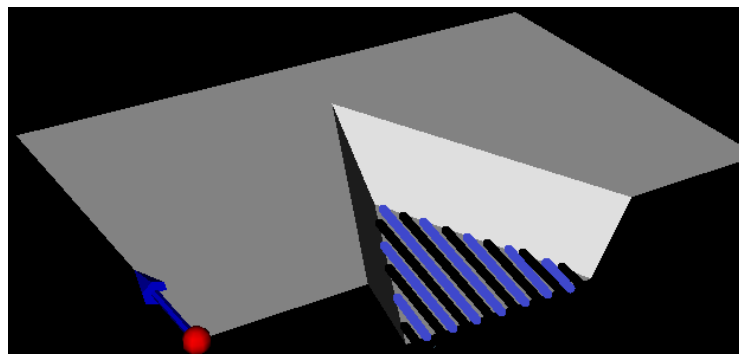


Figura 2.10. Representação do preenchimento por cordões intercalados [6]

Contudo, o mesmo autor relata que nessas estratégias, o preenchimento da camada posterior deve ser realizado interposto à anterior, ou seja, o eixo de cada cordão de solda da camada superior situa-se a meia distância entre os eixos dos cordões depositados na camada inferior.

A Figura 2.11 mostra em corte o corpo de prova de Pinheiro após preenchimento metálico, utilizando a estratégia por cordões de solda intercalados.

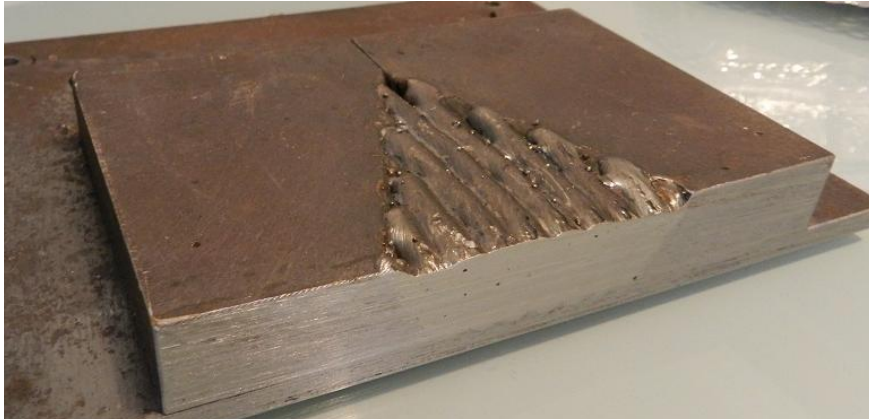


Figura 2.11. Corpo de prova após preenchimento metálico [6]

Pode-se identificar que o preenchimento ocorreu sem trincas provocadas pelo processo de soldagem, porém observam-se regiões de concavidade excessiva no encontro entre extremidades de cordões e as bordas da cavidade, o que pode sugerir que a estratégia adotada por Pinheiro [6] a fim de preencher a cavidade com cordões retilíneos e paralelos entre si pode não ser a melhor, dando margem ao estudo de outras possíveis estratégias.

Também, Chavez [26] divide o planejamento de trajetórias em dois modos: trajetórias feitas por cordões sequenciais invertidos e trajetórias por cordões intercalados. Nos dois modos de trajetória, o mesmo autor desenvolveu um modelo matemático de sobreposição para calcular o deslocamento entre os cordões, considerando que o perfil do cordão seja perfeitamente semicircular.

Portanto, mediante simulação para recuperação de uma cavidade por camadas sucessivas o cálculo foi de 9 passes de solda com deslocamento de 50% na primeira camada e, desta forma, com 3 camadas os cordões chegam até a borda da cavidade retangular, como visto na Figura 2.12.



Figura 2.12. Corpo de prova para recuperação de uma cavidade por camadas sucessivas [26]

Abordagens sobre preenchimento multicamadas e por cordões intercalados também foram consideradas por Boudreault et al. [2], que descreveram quatro passos para recuperação de uma trinca na pá da turbina: remoção de material no contorno da trinca por goivagem, soldagem, esmerilhamento e polimento.

Os autores relatam que para simular este tipo de recuperação, uma chapa (292x149x57 mm) de aço inoxidável UNS S41500 foi usinada em laboratório (Figura 2.13b). Depois de usinada, quatro camadas de metal de solda foram depositadas, para preencher a cavidade proveniente de uma trinca não passante. O processo foi realizado por camadas, interpondo-se os cordões de solda em cada uma delas (Figura 2.13c). A seguir, a camada superior foi esmerilhada na superfície da placa, buscando suavizá-la (Figura 2.13d). E por último a operação de recuperação foi concluída com um tratamento térmico pós-soldagem, realizado para restaurar a microestrutura e reduzir as tensões internas (Figura 2.13f).

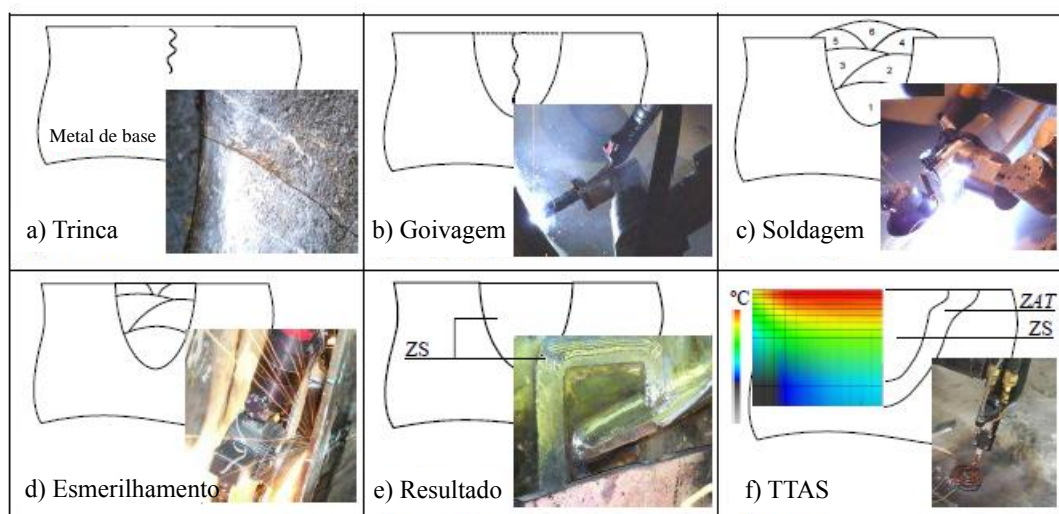


Figura 2.13. Operações em reparação de trinca, adaptado de [2]

A Tabela (2.1) mostra o resumo dos estudos citados acima e que descrevem os tipos de

trajetórias e o processo de soldagem em relação à posição da solda.

Tabela 2.1. Comparativo de trajetórias de soldagem para formação de camadas paralelas de solda

Referencia	Trajetoórias com cordões retilíneos	Posição de soldagem	Programação
2003 [34]	Intercalados e sequenciais	Posição plana (GMAW)	Off-line Robot File Explorer, linguagem RAPID
2005 [4]	Sequenciais	Posição vertical (GMAW-P)	Off-line ABB S4C robot controller, linguagem RAPID
2009 [5]	Sequenciais	Posição sobrecabeça (PTA)	Off-line (ROBOTURB)
2012 [35]	Sequenciais	Posição plana (TIG)	Não específica
2013 [32]	Intercalados	Posição plana (FCAW)	Off-line (SCOMPI)
2014 [26]	Intercalados e sequenciais	Posição plana (GMAW-P)	Off-line SportS3, linguagem ARLA, robô IRB2000
2014 [6]	Intercalado, sequencial e duplo	Posição plana (GMAW-S)	Off-line SportS3, linguagem ARLA, robô IRB2000
2015 [2]	Intercalados	Posição plana (FCAW)	Off-line (SCOMPI)

2.4.3 Modelos Geométricos da Seção de Cordões em Soldagem Multipasse

O processo de soldagem é realizado pela sobreposição dos cordões para deposição de material em camadas, porém a qualidade superficial da camada é determinada pelo afastamento entre os passes laterais [36], considerando ainda que as condições operacionais do processo estejam adequadamente ajustadas. Na literatura, encontram-se vários estudos relacionados à modelagem da geometria da seção de cordões parcialmente sobrepostos, de modo a se obter uma camada com superfície adequada a sua superposição por uma camada subsequente. Os parágrafos abaixo citam as referências consideradas mais relevantes para esse tema.

Em estudos iniciais, desenvolveram-se modelos matemáticos do perfil do cordão de solda, simplesmente assumindo seu contorno como sendo definido por uma parte de uma função conhecida. Nicholson [4] apresenta um modelo de sobreposição que só se aplica quando os cordões

formados se assemelham a um semicírculo, sendo o raio igual à altura do cordão. Chávez [26] também descreve o modelo de sobreposição considerando os cordões semicirculares e semielípticos com uma área igual em todo o cordão. Adicionalmente, Suryakumar [37] assumiu o perfil da superfície externa do cordão de solda com forma o mais próxima à parábola.

Não obstante, em outros trabalhos, a função é selecionada e testada em comparação com observações experimentais, sendo então analisados os resultados em relação à geometria produzida. Por exemplo, Xiong et al. [36] apresentam em seu trabalho um estudo comparativo de três curvas: arco circular, parábola e função cosseno. Mostrou-se que o modelo ideal para o perfil do cordão é em grande parte dependente da relação de taxa de alimentação de arame e velocidade de soldagem.

Cao et al. [38] apresentam a função seno como melhor resultado para mapear o perfil do cordão no processo MAG. Ding et al. [39] compararam o perfil dos cordões medidos com diferentes parâmetros de solda para três funções de uso frequente: parábola, cosseno e arco de circunferência. Os autores demonstraram que as três funções apresentaram um coeficiente de determinação alto, sendo que qualquer uma das mesmas pode representar o perfil do cordão, porém a parábola foi escolhida por obter melhores resultados com a variação da velocidade de soldagem.

Em outros casos, quando a largura do cordão de solda for maior que o reforço, uma forma aproximada pela função semielíptica pode ser aplicada [40]. Tais modelos matemáticos e seus respectivos proponentes são mostrados na Tabela (2.2).

Tabela 2.2. Comparativo do perfil geométrico do cordão em processos de soldagem

Perfil geométrico do cordão	Processo de soldagem	Referencia
Parábola	GMAW	[36, 37, 39]
Semicírculo	GMAW-P	[4, 26]
	GMAW	[36]
Semiellipse	SAW	[40]
Função Seno	MAG	[38]
Função Cosseno	GMAW	[36]
Função Logarítmica	MAG	[38]

Cabe mencionar que os modelos de sobreposição para deposição de material em camadas mais usados experimentalmente são a função parábola, a função seno e a função cosseno, sendo que a escolha depende do tipo de processo de soldagem a utilizar. Portanto é possível encontrar correlações que predizem a altura e a largura da camada acompanhada de uma faixa de parâmetros de solda.

2.5 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTO

2.5.1 Planejamento experimental

O planejamento de experimentos é um método poderoso no estudo do efeito conjunto de vários fatores sobre uma ou mais variáveis resposta de interesse, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento. Uma das técnicas mais conhecidas é o planejamento fatorial, no qual estão envolvidos k fatores (ou variáveis), cada um deles presente em diferentes níveis. O planejamento fatorial é indicado quando se desejam estudar os efeitos de poucas variáveis de influência, pois o número de experimentos é alto quando se têm muitos fatores [41]. Em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas.

Quando o efeito de um fator depende do nível de outro fator, diz-se que há interação entre estes fatores. No experimento fatorial completo cada possível combinação dos níveis dos fatores precisa ser testada para se determinar o quanto o fenômeno em estudo é afetado por cada fator. Desta forma, o número de experimentos aumenta exponencialmente com o número de fatores, de modo que este delineamento não é usualmente prático quando está envolvido um número grande de fatores. Para evitar o elevado custo financeiro e também o tempo na realização do grande número de experimentos necessários no fatorial completo, usam-se outros delineamentos experimentais, tais como o fatorial fracionado, os delineamentos ortogonais de Taguchi e os delineamentos de Plackett e Burman.

Segundo Myers, et al. [42], há uma considerável experiência prática indicando que os modelos de segunda ordem trabalham bem na resolução de problemas reais. Assim, um planejamento experimental para ajustar um modelo de segunda ordem deve conter pelo menos 3 níveis para cada fator (variáveis independentes) para que os parâmetros do modelo sejam estimados [43]. Neste caso, a série de experimentos que pode ser utilizada no planejamento de um modelo estatístico de segunda ordem é o planejamento rotável [42, 43].

Um planejamento rotável tem uma importante propriedade na seleção do delineamento de um modelo de regressão. Como se sabe, o objetivo da regressão é modelar o relacionamento entre diversas variáveis de entrada e as variáveis respostas [42, 43]. Então, é interessante utilizar um delineamento que providencie precisão igual de estimação em todas as direções. A classe de delineamento rotável mais usada para ajustar o modelo de segunda ordem é o Planejamento Composto Central (PCC), conhecido em inglês como *Central Composite Design*, que possui a configuração de cubo + pontos axiais (estrela).

2.5.2 Regressão linear múltipla

Regressão linear é uma técnica estatística empregada para modelar e investigar a relação entre variáveis. A equação (2.4) mostra a regressão linear simples onde se procura resumir a relação entre duas variáveis [43].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (2.4)$$

A Equação (2.4) é linear porque nenhum de seus parâmetros aparece com expoente ou é multiplicado ou dividido por outros parâmetros. O termo ϵ é o erro aleatório, assumido como sendo uma distribuição normal, com média zero e variância (σ^2).

A regressão linear múltipla é um conjunto de técnicas estatísticas que possibilitam a avaliação de uma variável dependente (saída do modelo ou preditando¹) com diversas variáveis independentes (entradas do modelo ou preditores²). O resultado é uma equação linear que pode ser utilizada para estimar o preditando como uma combinação linear dos preditores. A diferença entre esta e a regressão simples é que possui mais de uma variável preditora (x_i). A Equação (2.5) exemplifica a regressão linear múltipla onde k é o número de variáveis preditoras, sendo que na regressão simples $k = 1$.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.5)$$

Os parâmetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ da Equação (2.5) são os coeficientes de regressão, onde β_0 é o intercepto da reta no eixo da ordenada e β_1, \dots, β_k é a inclinação da reta.

Quando o número de observações (n) for maior que o número de variáveis preditoras (k), o método mais usual para estimar a equação de regressão é o método dos mínimos quadrados. Este método consiste em se determinar o estimador que minimiza a soma do quadrado das diferenças entre valores observados e valores preditos pelo modelo [42, 43].

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k \quad (2.6)$$

O \hat{y} da Equação (2.6) são os valores estimados para y . A diferença entre as duas variáveis são os resíduos (e) como mostra a Equação (2.7).

$$e = y - \hat{y} \quad (2.7)$$

¹Preditando é o termo utilizado por Myers et al. [42] para denominar as variáveis de saída do modelo

²Preditor é o termo utilizado por Myers et al. [42] para denominar as variáveis de entrada do modelo

É mais prático trabalhar com modelos de regressão linear múltipla quando a Equação (2.5) é expressa em notação matricial, já que permite uma apresentação mais compacta do modelo, dados e resultados para qualquer número de variáveis [43]. O modelo pode ser obtido a partir de uma matriz \mathbf{x} com dimensão $(n \times k)$, onde n representa o número de observações e k o número de variáveis de entrada. Além disso, utiliza os dados de um vetor \mathbf{y} de dimensão $(n \times 1)$ que contém as respostas do experimento. Cada variável dependente de \mathbf{y} é expressa como uma combinação linear das variáveis independentes da matriz \mathbf{x} por intermédio da expressão:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\beta + \epsilon \quad (2.8)$$

Onde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_k \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

O objetivo principal é determinar o vetor β que contém os coeficientes da regressão e é calculado por mínimos quadrados a partir da pseudo-inversa de \mathbf{x} . O resultado é dado pela Equação (2.10).

$$\beta = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (2.10)$$

os índices sobrescritos -1 e T representam a inversão e transposição da matriz, respectivamente.

A Equação (2.10) fornece a solução geral para o ajuste de um modelo por mínimos quadrados ordinários, não importando quantas sejam as observações ou quantos parâmetros sejam necessários para caracterizar o modelo, desde que as matrizes \mathbf{x} e \mathbf{y} sejam ampliadas de forma adequada [43].

O desvio padrão (σ) do modelo pode ser obtida pela soma dos resíduos quadrados, identificada como SQE, como é mostrado na Equação (2.11).

$$\sigma^2 = \frac{SQE}{n - (k + 1)} \quad (2.11)$$

Os graus de liberdade para análise de variância são distribuídos da seguinte maneira:

- A SQE, é a soma dos quadrados dos erros representada pela equação (2.12) e possui $n - k + 1$

graus de liberdade, a estimativa de cada um dos p parâmetros do modelo acarreta a perda de um grau de liberdade;

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (2.12)$$

- A SQT, é a soma total dos quadrados representada pela Equação (2.13) e possui $n - 1$ graus de liberdade.

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.13)$$

onde y_i é a resposta do experimento e \bar{y} é a media amostral dada pela Equação (2.14):

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.14)$$

O coeficiente de determinação mostrada na Equação (2.15) é usado para quantificar a capacidade explicativa do modelo, ou seja, segundo [43], é uma medida da proporção da variação da variável resposta y que é explicada pela equação de regressão quando estão envolvidas as variáveis independentes.

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad (2.15)$$

A raiz quadrada da Equação (2.15) é o coeficiente de regressão múltipla entre \mathbf{y} e o conjunto de variáveis de controle utilizadas no modelo. O coeficiente de determinação ajustado é uma medida de controle que leva em consideração tanto a variabilidade de \mathbf{y} que é explicada pelo modelo quanto o número de variáveis de controle utilizado [43]. Essa medida pode ser definida pela Equação (2.16).

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)}(1 - R^2) \quad (2.16)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os consumíveis e equipamentos utilizados. Será descrita também a metodologia utilizada para as etapas que foram realizadas durante o trabalho.

3.1 CONSUMÍVEIS

3.1.1 Metal de Adição

O metal de adição empregado na execução das soldas nos testes exploratórios e nos testes de preenchimento de cavidade foi o arame tubular inox ESAB OK TUBROD 410 NiMo (MC), de alma metálica com 1,2 mm de diâmetro. O arame utilizado é específico para reparos de turbinas fabricadas com material CA-6NM [8].

3.1.2 Metal de Base

O material de adição acima foi adotado tendo em vista o atendimento às necessidades de preenchimento de cavidades em aços tipo CA6NM, utilizados para fabricação de turbinas hidráulicas. Este é um aço fundido, não facilmente disponível no mercado, além de ser caro. Seu fornecimento se dá na forma de lingotes, que precisariam de operações de usinagem para a confecção de corpos de prova, tornando seu custo ainda maior. A opção ao uso deste aço seria a utilização de uma liga inoxidável disponível no mercado na forma de placas e barras retangulares, como, por exemplo, o aço AISI 410. Este é um aço inoxidável martensítico, porém apresenta composição diferente do CA6NM, com maior teor de C (vide Tabela (3.1)). Outra opção seria a utilização de um aço doce, apesar da grande diferença na composição química em relação ao metal de adição. Considerando, entretanto, que o objetivo principal deste trabalho relaciona-se à obtenção de uma metodologia de preenchimento visando somente aspectos geométricos, decidiu-se por economia de recursos optar pelo aço doce, dada sua ampla disponibilidade comercial e seu relativo baixo custo.

Tendo em vista o exposto no parágrafo anterior, o material adotado foi o AISI 1020, na

forma de chapa de 6,35 mm (1/4") de espessura, produzindo corpos de prova com dimensões 200x50x6,35 mm, para deposição de cordões sobre chapa; e barras retangulares de seção 101,60x15,87 mm (4"x5/8"), a partir da qual se usinaram os corpos de prova para os testes de preenchimento (vide item 4.1)

Tabela 3.1. Composição química do material de base e de aporte (% em peso)

COMPOSIÇÃO (%)	Aço (AISI 1020)	Aço (AISI 410)	TUBROD 410 NiMo (MC)	Aço inoxidável Grau CA6NM
C	0,18-0,23	0,15	0,03	0,03-0,06
Mn	0,30-0,60	1	0,8	<1.0
S	0,05	0,03	-	<1.0
P	0,04	0,04	-	<0,03
Si	0,04	1	0,4	<0,025
Cr	-	11,5-13,5	12	11,5-14,0
Ni	-	-	4,9	3,5-4,5
Mo	-	-	0,6	0,4-1

3.1.3 Gas de Proteção

Para o processo GMAW-P em estudo, o gás de proteção utilizado tem uma mistura de 96% Ar + 4% O₂, com uma vazão de 15 l/min. Aquele tipo de gás foi utilizado por ser item frequentemente na soldagem de aço carbono [26].

3.2 EQUIPAMENTOS

A Figura 3.1 ilustra o aparato experimental utilizado, composto pelos seguintes equipamentos: (1) robô ABB IRB 2000; (2) alimentador de arame; (3) cilindro de gás (Argônio + 4% CO₂) com regulador de pressão e vazão; (4) tocha de solda com dispositivo de alimentação tipo *push-pull*; (5) exaustor de fumos; (6) suporte para as peças. (7) câmera termográfica e (8) fonte inversora de soldagem *Fronius TransPuls Synergic 5000*.

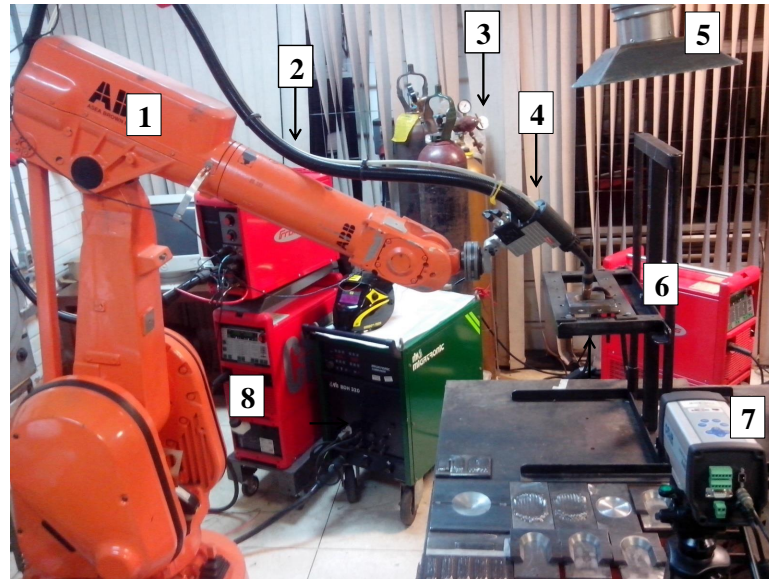


Figura 3.1. Equipamento utilizado para realização das soldas

A fixação da chapa de teste é necessária para evitar a deformação da mesma durante a soldagem, em consequência da alta densidade de calor envolvida com os processos de soldagem. Assim, utilizou-se uma estrutura metálica desenvolvida por Aures [44], mas construída e adaptada no laboratório GRACO-UnB. Aqui a fixação da placa ocorre por meio de cantoneiras fixadas por parafusos distribuídos ao longo de seu comprimento (vide Figura 3.2).



Figura 3.2. Cantoneiras fixadas por parafusos distribuídos ao longo de seu comprimento

3.2.1 Fonte de soldagem

Para a execução das soldas pelo processo GMAW-P foi utilizada uma fonte de soldagem digital e multiprocessos, denominada *Fronius TransPuls Synergic 5000*, com capacidade de corrente de 500A. No processo GMAW a fonte trabalha no modo pulsado e o ajuste dos parâmetros de processo é feito por meio de uma interface de programação específica, denominada RCU 5000.

A comunicação entre robô e a fonte é realizada por meio da interface para robôs ROB 5000. Os cordões de solda foram realizados automaticamente utilizando o robô ABB IRB 2000, que permitiu o controle da velocidade de soldagem (mm/s). A programação foi realizada utilizando-se o Software Sport S3.

3.2.2 Câmera termográfica

Foi utilizada a câmera termográfica ThermoVision A40M (*FLIR Systems*) para monitorar a temperatura de interpasse. Esta foi monitorada de modo a se ter condições de transferência de calor semelhantes para os diversos cordões depositados, assumindo a hipótese de que a geometria das seções transversais dos diversos cordões depositados manter-se-ia aproximadamente constante, para condições de transferência de calor semelhantes. No caso real, a temperatura de interpasse é um fator importante para a obtenção de características microestruturais adequadas no material depositado. Deve-se observar aqui que os testes realizados tinham como único objetivo a avaliação da geometria dos cordões depositados para fins de planejamento do preenchimento de cavidades.

As deposições de metal foram realizadas considerando temperatura de interpasse próxima a 150 °C [6]. A câmera termográfica foi posicionada a uma distância de 1.80 m da peça e a emissividade utilizada para a recuperação dos valores de temperatura foi de 0,55 [45].

3.2.3 Preparação das amostras para medição de geometria

Para a análise das amostras utilizaram-se os seguintes materiais e equipamentos: máquina de corte e discos de corte para o seccionamento das amostras, lixas de água, máquina rotacional para o lixamento modelo POLIPAN-U, reagente *Kalling*¹ para a revelação das macrografias, sendo as amostras imersas na solução por um tempo de 30 segundos.

3.2.4 Sistema para medição dos cordões

Depois de preparado o corpo de prova, as imagens das macrografias foram capturadas com um Microscópio a Laser Confocal LEXT OLS4000. Só após esta adequação é que houve a possibilidade de obtenção das dimensões relacionadas aos aspectos geométricos do cordão, tais como: altura do reforço e largura do cordão. O tratamento das imagens também permitiu a visualização do perfil transversal do cordão, incluindo zona de diluição assim como a delimitação das regiões compreendidas pelo metal de solda, zona termicamente afetada e metal de base. Apesar

¹3 g de CuCl₂, 66 ml de HCl, 66 ml de Álcool Etilico 96 GL e 66 ml de H₂O

de o Microscópio permitir a visualização de aspectos morfológicos das zonas de diluição do metal de solda assim como da zona termicamente afetada, essas informações não foram consideradas neste trabalho, tendo em vista este objetivar a modelagem de aspectos puramente geométricos relativos ao planejamento da deposição de metal com o intuito de realizar o preenchimento de uma cavidade.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Esta metodologia foi dividida em quatro etapas (Ver Figura 3.3). A primeira etapa foi composta da seleção dos parâmetros do processo GMAW-P, visando resultados aceitáveis para uma boa geometria do cordão com um arame tubular ESAB OK TUBROD 410 NiMo (MC). A segunda etapa foi baseada num planejamento experimental para investigar a influência dos parâmetros de soldagem GMA pulsada sobre a geometria dos cordões de solda isolados. A terceira etapa foi composta por os ensaios dos cordões de solda multipasses que apresenta o cálculo da altura de crescimento da camada em função da sobreposição e a quarta etapa foi constituída pela definição das estratégias de preenchimento multicamada a serem testadas.

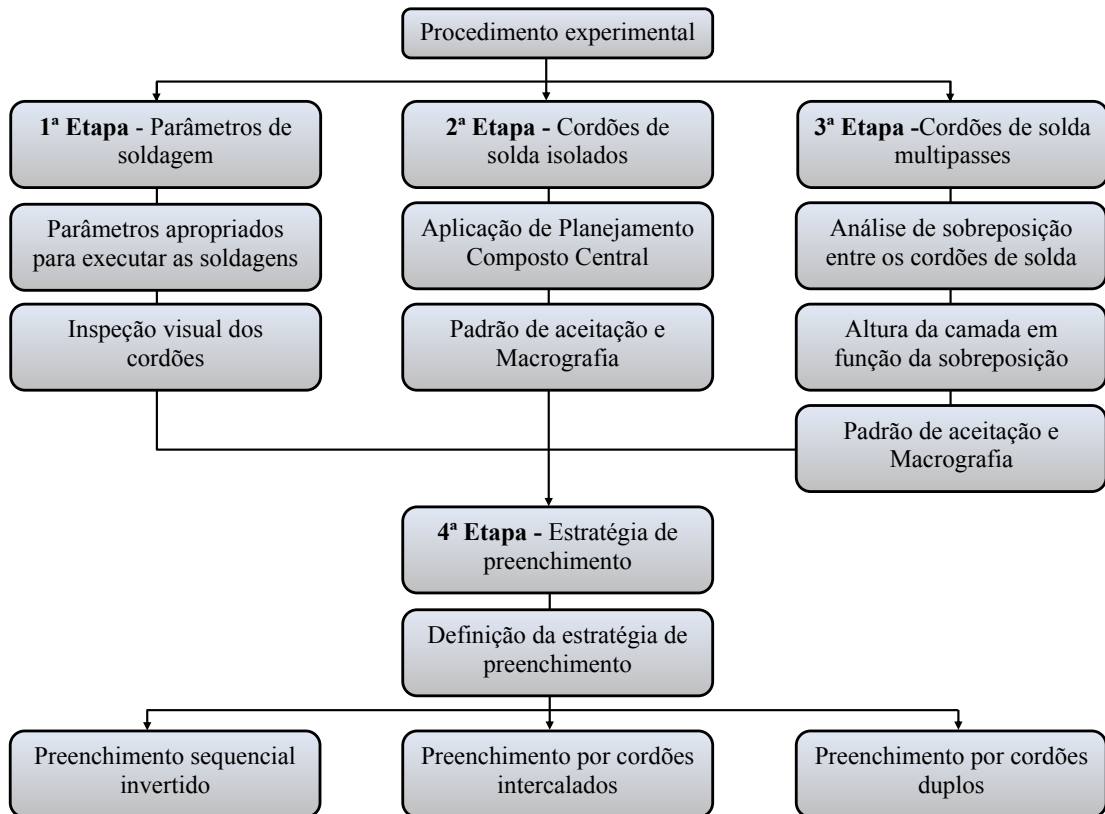


Figura 3.3. Representação esquemática do planejamento experimental adotado no trabalho

3.3.1 Seleção dos parâmetros de soldagem

O ponto de partida para a definição dos parâmetros de controle e respectivos níveis de ajustes para esta etapa, foram os parâmetros de soldagem utilizados no trabalho de Chavez [26], metodologia baseada em critérios de transferência metálica e de estabilidade metálica, para a busca de parâmetros com o aço AISI 1020. Conforme apresentado no item 2.2.4 - Transferência Pulsada, o mesmo autor descreve uma relação funcional para representar todas as condições possíveis dos parâmetros de pulso (I_p , I_b , T_p , T_b) associadas com uma corrente média (I_m). Esta relação inclui um espaço de trabalho, que abrange todas as combinações possíveis de parâmetros e representa uma região chamada Zona Paramétrica.

Conseqüentemente foram selecionadas três velocidades de alimentação do arame, para um arame de 1,2 mm de diâmetro. As velocidades do arame selecionadas foram de 7, 7,5 e 8 m/min. Considerando o diâmetro da gota (D_g) 1,2 mm, são mostradas na Tabela (3.2) os períodos T_c e as frequências de transferência (F) de gotas utilizadas, calculadas a partir das Equações (2.2) e (2.3).

Tabela 3.2. Período e frequência nos experimentos GMAW-P

Velocidade do arame (m/min)	Período T_c (ms)	Frequência (Hz)
7	6,86	146
7,5	6,4	157
8	6	167

Para cada velocidade do arame utilizada, foi determinada a corrente média necessária para estabilizar o arco. Variação de corrente média compreendida entre 170 e 240 A [26]. Após estes testes selecionaram-se as correntes médias mostradas na Tabela (3.3), para cada velocidade de alimentação do arame.

Tabela 3.3. Corrente média utilizada para cada velocidade de alimentação do arame nos testes GMAW-P

Velocidade do arame (m/min)	Corrente média utilizada (A)
7	186
7,5	195
8	204

Para estes testes foram escolhidas várias combinações, resultantes das seguintes condições iniciais:

- Corrente média I_m , conforme mostradas na Tabela (3.3);
- Períodos (T_c), segundo mostrado na tabela (3.2), resultante da seleção do diâmetro do arame, do diâmetro da gota e da velocidade do arame;
- Corrente de pulso I_p de 380 A, valor normalmente utilizado para um arame de 1,2 mm de diâmetro [26].

Com os valores do período T_c e tempo de pulso T_p , obteve-se o tempo de base T_b , através da Equação (2.3). O valor faltante de I_b é calculado através da Equação (2.1), a partir dos valores de I_m , I_p , T_p e T_b . A Tabela (3.4) mostra as condições testadas, considerando as velocidades do arame utilizadas e as respectivas correntes médias aplicadas.

Tabela 3.4. Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios no planejamento experimental

Velocidade do arame (m/min)	Corrente média (A)	Período T_c (ms)	T_p (ms)	T_b (ms)	I_p (A)	I_b (A)
7	186	6,86	2,4	4,45	380	80
7,5	195	6,4	2,4	3,97	380	80
8	204	6	2,4	3,6	380	80

Os sinais de corrente e tensão monitorados, por exemplo, através de um osciloscópio, podem mostrar variações associadas com os fenômenos que ocorrem na região do arco. A análise de oscilogramas pode ser feita por meio de programas de computador que permitem analisar com maior precisão as informações fornecidas pelos sinais. Exemplo de sinais de corrente e tensão obtidos em um experimento podem ser vistos na Figura 3.4.

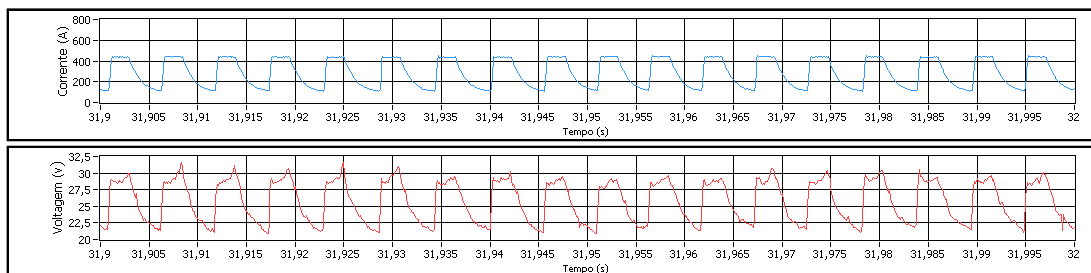


Figura 3.4. Exemplo de sinais de corrente e tensão de soldagem. $I_p=380$ A, $I_b=80$ A, $T_p=2,4$ ms $T_s=26$ V e $V_a=7$ m/min [26]

O gás de proteção utilizado no processo GMAW afeta não somente as propriedades da solda, mas determina o formato do cordão e formação das camadas. Foram testadas três misturas gasosas binárias, sendo uma recomendada pelo fabricante do arame (Ar + 4% CO₂), outra

recomendada na literatura ($\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$) [30] e a terceira, composta por $\text{Ar} + 6\% \text{CO}_2$, por estar disponível inicialmente no laboratório e por apresentar composição bastante próxima à sugerida pelo fabricante do arame. Deve-se observar que todas as misturas propiciaram a obtenção de transferência metálica pulsada (processo GMAW-P) com boa estabilidade, com diferentes níveis de geração respingos e de formação de oxidação/fuligem, para uma velocidade de soldagem de 10 mm/s, tensão de 23,5 V e velocidade de alimentação de arame de 8 m/min correspondente aos parâmetros de pulso da Tabela (3.4).

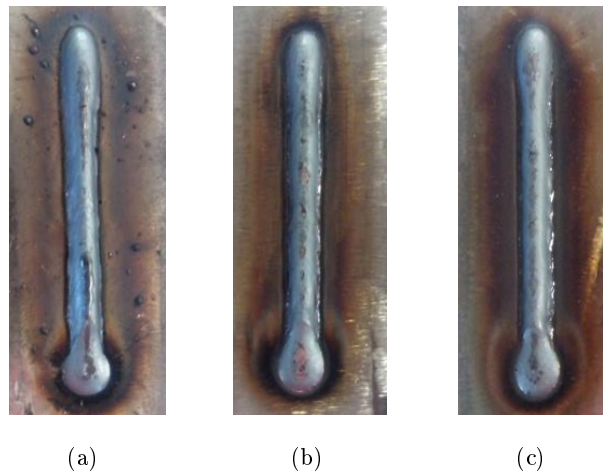


Figura 3.5. Aspecto do cordão de solda para vários gases: (a) $\text{Ar} + 6\% \text{CO}_2$; (b) $\text{Ar} + 4\% \text{CO}_2$ e (c) $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$

Verifica-se na Figura 3.5 que a soldagem com $\text{Ar} + 6\%$ de CO_2 apresentou maior quantidade de respingos com maior geração de fumos. Já na mistura $\text{Ar} + 4\%$ de dióxido de carbono foi o que apresentou o melhor aspecto no cordão em relação à formação de óxidos e baixa ejeção de respingos. Segundo Wong et al. [46], com o aumento do CO_2 ao argônio ocorre um aumento na formação de escória e elevada densidade de respingos produzida pela instabilidade que se cria no arco eléctrico. Quanto à mistura do teor de oxigênio no gás de proteção, ocorre também um aumento na quantidade de óxidos e escória na superfície do cordão de solda, os quais se aderem fortemente à superfície do cordão.

Por melhor se adequar as condições de soldagem GMAW pulsada, visando obtenção de cordões com qualidade adequada, com processo estável, baixa ejeção de respingos e baixa produção de fumos, o gás de proteção utilizado para o planejamento experimental foi a mistura $\text{Ar} + 4\% \text{CO}_2$. Este gás foi ajustado para uma vazão de 15 l/min [26].

O objetivo dessa etapa foi investigar os efeitos das principais variáveis do processo GMAW-P sobre as características geométricas das soldas. Foram analisadas corrente média, velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem. O padrão de aceitação foi obter cordões de solda uniformes, de bom aspecto superficial e ausência de defeitos tais como respingos,

porosidades, trincas e mordeduras.

3.3.2 Planejamento experimental cordões de solda isolados

Inicialmente nesta segunda etapa foram definidas quais seriam as características da geometria do cordão de solda que seriam analisadas. Delimitou-se o estudo pela escolha das seguintes variáveis de saída: largura do cordão e altura do reforço. Como variáveis de entrada, escolheram-se aquelas que mostraram ter a maior influência na geometria da seção transversal dos cordões. Assim, as variáveis escolhidas foram: velocidade de alimentação de arame (V_a), tensão (T_s) e velocidade de soldagem (V_s). Os parâmetros "distância de bico no contato com a peça" e ângulo de trabalho foram fixados em 15 mm e 90°, respectivamente.

O planejamento experimental envolveu as seguintes fases:

- Escolha dos k fatores. Por meio de um levantamento bibliográfico, selecionaram-se as variáveis que mais influenciam na geometria do cordão de solda [11, 29];
- Escolha dos níveis igualmente espaçados para cada fator (codificados em -1, 0 e 1);
- Determinação de pontos axiais α e codificação das variáveis;
- Montagem da matriz do planejamento (\mathbf{x});
- Com os fatores assumindo os valores fixados na matriz de planejamento (\mathbf{x}), obtém-se o vetor de respostas (\mathbf{y}), isto é, duas variáveis dependentes: largura e reforço do cordão de solda, medição obtida por análise macrográfica;
- Com a matriz (\mathbf{x}) e o vetor (\mathbf{y}) estima-se o vetor β .
- Realizou-se a análise de resíduos, teste de significância do modelo, para verificar a qualidade do ajuste; na determinação do coeficiente de Determinação (R^2), que fornece uma medida da proporção da variação (através da Equação de Regressão).

Escolheu-se como método de Planejamento experimental o PCC para três variáveis. Ele consiste em três etapas: a primeira de oito pontos que constitui um desenho fatorial 2^3 , a segunda de seis pontos que constitui os pontos axiais (α) incluídos para formar o PCC; e a última, de seis pontos, correspondentes à repetição dos experimentos no ponto central a fim de estabelecer a precisão (estimativa da variância) e o erro experimental, perfazendo um total de 20 corridas [43]. A Figura 3.6 apresenta uma representação do planejamento experimental baseado no PCC para três variáveis de entrada.

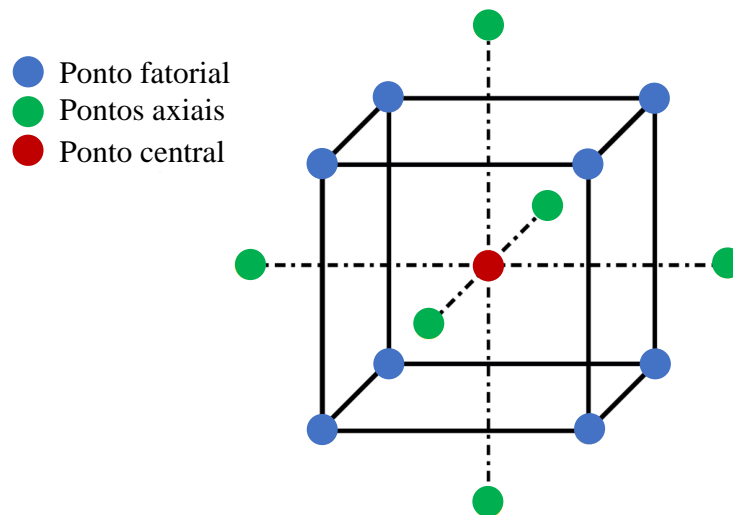


Figura 3.6. Planejamento Composto Central para três variáveis, adaptado de [42]

Os pontos axiais (α) foram escolhidos para um desenho rotável, onde α é dado a partir da Equação (3.1):

$$\alpha = (N_f)^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

Sendo N_f o número de pontos da parte fatorial.

Após se estabelecer as variáveis de entrada e a técnica de planejamento, o próximo passo é a obtenção dos valores reais dos níveis, já que os valores codificados são estabelecidos de acordo com a técnica empregada. As variáveis de entrada receberam codificações e cinco níveis diferentes de variação: $-\alpha$, -1 , 0 , 1 e α , de acordo com a Tabela (3.5).

Tabela 3.5. Valores codificados e reais das variáveis de entrada

Variáveis de entrada (Reais)	Codificadas	Níveis				
		-1,682	-1	0	1	1,682
Velocidade de arame (m/min)	x_1	6,659	7	7,5	8	8,341
Tensão (V)	x_2	22,659	23	23,5	24	24,341
Velocidade de soldagem (mm/s)	x_3	8,318	9	10	11	11,682

O valor codificado de α foi calculado de acordo com a Equação (3.1), de onde se obteve $\alpha = 1,6818$. A codificação das variáveis de entrada é dada pela Equação (3.2), de onde também se obtém o valor real [43].

$$x_j = \frac{\xi_j - [\max(\xi_j) + \min(\xi_j)] / 2}{[\max(\xi_j) - \min(\xi_j)] / 2} \quad (3.2)$$

Onde:

x_j : indica o nível codificado; ξ o valor real da variável de entrada; j : representa a variável de entrada e $\max(\xi_j)$ e $\min(\xi_j)$: são os valores reais do planejamento fatorial.

Para a definição dos cinco níveis que seriam variados em cada parâmetro de soldagem, realizaram-se testes com a soldagem GMAW pulsado de forma individual. Para minimizar o erro, as 20 corridas experimentais são realizadas de forma aleatória. A Matriz de planejamento disposta na Tabela (A.1) do Apêndice A encontra-se de forma padronizada [43], contendo todas as possíveis combinações entre os níveis das variáveis de estudo que contribuirão para determinar seus efeitos e interações sobre as variáveis de resposta.

3.3.2.1 Análises geométrica das amostras

Depois de concluída a etapa da soldagem, iniciou o preparo das amostras para macrografia. Os corpos de prova foram extraídos da parte central dos cordões de solda, primeiramente por meio de uma serra de fita e posteriormente por meio de uma cortadora de amostras. Em cada cordão, realizaram-se três cortes a uma distância de 10 mm do centro do cordão, esses pontos foram escolhidos por estarem na parte estável do cordão de solda, sendo que o comprimento dos cordões foi de 150 mm. Após o corte transversal, as amostras foram lixadas com lixas de água com gramatura 120, 180, 240 e 400. Em seguida procedeu-se o ataque químico para revelação da geometria dos cordões. A exposição das amostras ao reagente foi limitada a 30 segundos. Para efetuar as medições, as imagens das macrografias foram capturadas com o Microscópio com ampliação fixada em 5x. A Figura 3.7 mostra as dimensões medidas nos cordões de solda: altura (H) e largura (W).

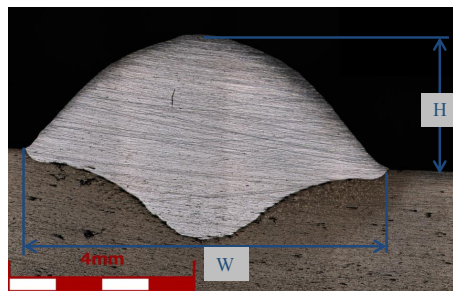


Figura 3.7. Dimensões geométricas do cordão de solda

3.3.2.2 Verificação experimental das equações do planejamento executado

Para verificar a funcionalidade das equações que integram a variável dependente com as três variáveis independentes, foi realizada uma soldagem, executada em três condições distintas, mas pertencentes à faixa operacional levantada. A Tabela (3.6) registra os resíduos encontrados para as três condições de solda.

A modelagem empírica foi realizada usando regressão múltipla e se compõe de dois modelos estatísticos de segunda ordem, correspondentes à altura do reforço e à largura do cordão (detalhes da modelagem são mostrados no Apêndice A). Os modelos resultantes da regressão múltipla, relativos à altura do reforço e à largura do cordão em função dos fatores de entrada são mostrados nas Equações (3.3) e (3.4). Deve-se observar que os fatores que apresentaram baixa significância no processo de regressão foram desconsiderados e novos coeficientes para os fatores significantes foram calculados com base no modelo de segunda ordem reduzido.

Tabela 3.6. Teste experimental de validação do modelo para o tamanho do cordão

Teste	Va (m/min)	Ts (V)	Vs (mm/s)	Valor medido (mm)		Resposta do modelo (mm)		Resíduos (mm)	
				H	W	H	W	H	W
1	8	23,5	10	2,759	8,187	3,061	7,867	0,302	0,320
2	8	24	11	2,551	7,571	2,788	7,393	0,237	0,178
3	7	23,5	10	2,347	7,673	2,464	6,883	0,117	0,80

$$Y_H = 207,057 - 2,058V_a - 14,651T_s - 4,219V_s - 0,144V_aV_s + 0,144T_s * V_s + 0,273V_a^2 + 0,273T_s^2 + 0,084V_s^2 \quad (3.3)$$

$$Y_W = -462,991 + 0,984V_a + 34,936T_s + 7,600V_s - 0,364T_s * V_s - 0,631T_s^2 \quad (3.4)$$

3.3.3 Cordões de solda multipasses

Na etapa anterior, desenvolveram-se modelos de predição de altura do reforço e de largura esperada para o cordão de solda em função dos parâmetros de soldagem (velocidade de alimentação de arame, tensão de soldagem e velocidade de soldagem), para o caso de cordões depositados

de forma isolada sobre chapa, na posição plana. No entanto, os aspectos modelados do cordão isolado (altura do reforço e largura), não mapeam completamente sua geometria, de modo a possibilitar a previsão do afastamento entre cordões necessário à deposição de uma camada de metal com a qualidade desejada. Por esta razão, decidiu-se por se definir um critério de determinação desse afastamento baseado no cálculo da área de intersecção entre dois cordões parcialmente sobrepostos, de modo que o volume da intersecção seja igual ao volume necessário à planificação do vale criado entre as duas cristas dos cordões. Essa técnica foi denominada "método das áreas equivalentes" [38, 7] (vide Figura 3.8). Buscou-se aqui encontrar a mínima sobreposição dos cordões de solda de modo a se produzir uma camada plana, motivo pelo qual se convencionou denominar o método como "critério da mínima sobreposição dos cordões de solda". Para fins de aplicação desse critério, faz-se necessário o mapeamento do perfil transversal do reforço.

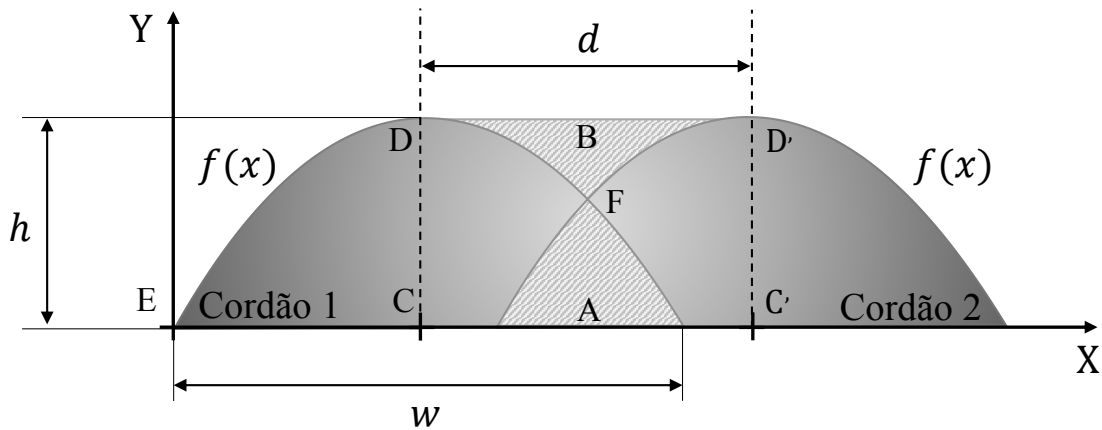


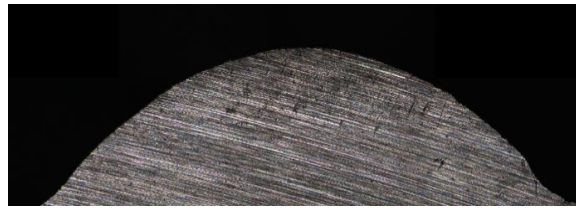
Figura 3.8. Modelo de sobreposição mínima entre os cordões

Assim, considera-se que a qualidade superficial da camada de metal a ser depositada é determinada pelo afastamento entre os passes de cordões de solda alocados de forma paralela com sobreposição parcial. Cada camada preenche parte da cavidade correspondente ao volume delimitado por uma curva de nível, que é obtida a partir do processo de fatiamento da cavidade em planos paralelos. O número de planos paralelos, ou seja, de camadas necessárias ao preenchimento total, depende da profundidade máxima da cavidade e da altura esperada para cada camada depositada, o que, por sua vez, depende dos parâmetros de soldagem e do afastamento adotado entre os cordões componentes de cada camada.

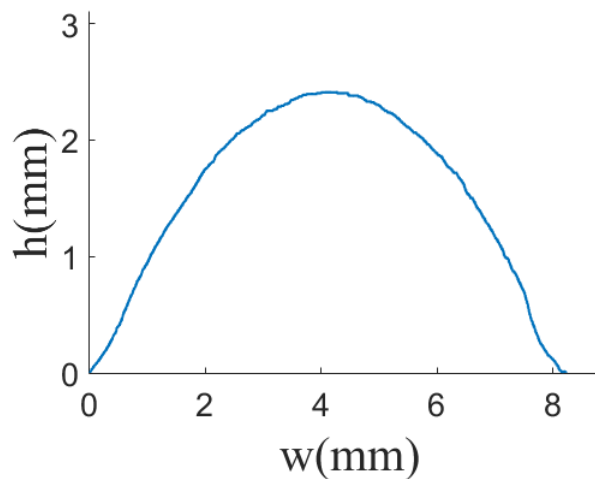
Por conseguinte, o estudo de sobreposição foi desenvolvido considerando as seguintes fases: (a) mapeamento do perfil do cordão, (b) ajuste da função ao perfil original do cordão, (c) definição da distância entre os cordões laterais e (d) espessura da camada de solda.

3.3.3.1 Mapeamento perfil do cordão

A informação digital do perfil do cordão em forma de linha foi desenvolvida por meio da plataforma MATLAB. Assim, a Figura 3.9 mostra o perfil da seção transversal do cordão do primeiro teste mostrado na Tabela (3.6). De forma similar, os mesmos gráficos foram levantados para as demais combinações da Tabela (3.6), mas por falta de espaço não são aqui apresentados, mas encontram-se no Apêndice B.



(a)



(b)

Figura 3.9. (a) imagem seção transversal do cordão (b) Perfil da seção transversal do cordão: teste 1

3.3.3.2 Ajuste de curva da secção transversal cordão

Conforme dito na seção 2.4.3, o perfil do cordão no processo GMAW pode ser representado por uma função parábola ou por uma função senoidal. Portanto, os dois modelos foram testados. As Equações (3.5) e (3.6) mostram a suas representações formais. Onde a, b e c são os coeficientes curvilíneos a serem estimados.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.5)$$

$$y = a \sin(b + 2\pi x/c) \quad (3.6)$$

Usando estas duas funções, a Figura 3.10, mostra os gráficos experimentais ajustados aos perfis, e a Figura 3.11 apresenta a distribuição dos erros de ajuste entre as funções selecionadas e os perfis reais dos cordões ao longo da largura do cordão.

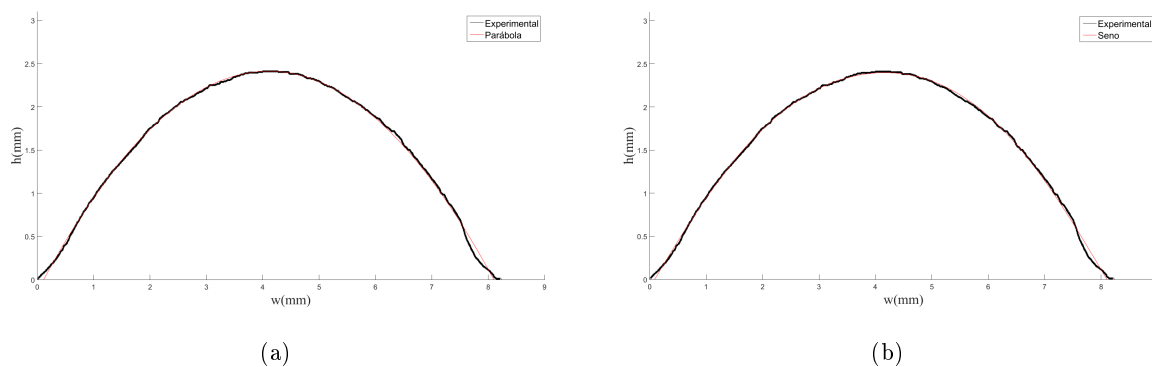


Figura 3.10. Ajuste das funções ao perfil do cordão: (a) função parábola e (b) função senoidal

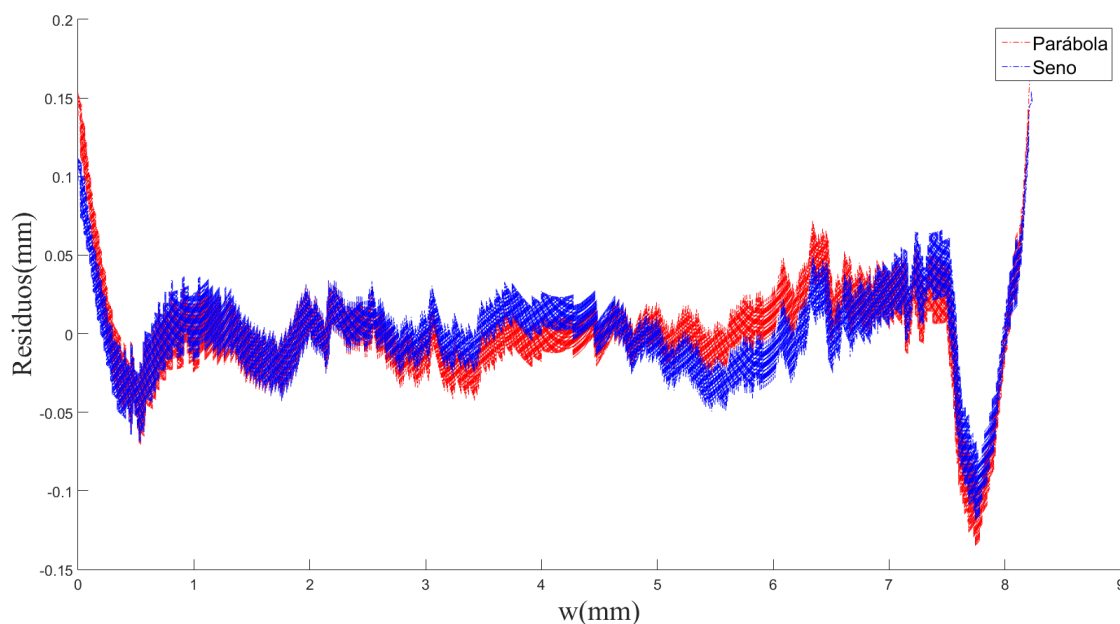


Figura 3.11. Resíduos ao longo da largura do cordão

Realizou-se a análise de resíduos, para verificar a qualidade do ajuste; na determinação do coeficiente de Determinação (R^2) [43]. Na Tabela (3.7) apresentam-se os resultados das duas funções ajustadas. Observa-se que as duas funções apresentaram um coeficiente de determinação alto, sendo que qualquer uma das mesmas poderia representar o perfil do cordão, porém a função seno apresentou maior precisão aos dados experimentais (menor desvio padrão), portanto, foi

selecionada para representar o perfil do cordão.

Tabela 3.7. Comparação dos ajustes de curvas nas funções

Função	Coeficientes curvilíneos			Coeficiente de determinação	Desvio padrão
	a	b	c		
Parábola	-0,1512	1,242	-0,1386	0,9976	0,0369
Seno	2,565	6,28	16,41	0,9981	0,0328

3.3.3.3 Definição da distância entre os cordões laterais

Com o método das áreas equivalentes e a função senoidal, buscou-se aqui encontrar a mínima sobreposição dos cordões de solda de modo a se produzir uma camada plana, admitindo que a geometria senoidal do cordão sobreposto se mantém na região fora da intersecção entre cordões parcialmente sobrepostos. Portanto, é possível calcular com as Equações (3.7) e (3.8) as áreas exatas de A e B mediante as integrais definidas pelo perfil do cordão (ver Figura 3.8). O ponto E é definido como ponto de referência, e ponto F é o ponto de intersecção entre os cordões de solda com a coordenada (x_F, y_F) .

$$Area_A = 2 \int_{x_F}^w a \sin \left(\frac{2\pi x}{c} + b \right) dx \quad (3.7)$$

$$Area_B = 2 \int_{\frac{w}{2}}^{x_F} h - a \sin \left(\frac{2\pi x}{c} + b \right) dx \quad (3.8)$$

Em seguida, o ponto de intersecção (x_F) entre os contornos do primeiro passe e do segundo passe de solda na coordenada x é determinado quando a área de intersecção (A) é igual à área do vale (B). Igualando as equações (3.7) e (3.8), após algum algebrismo chega-se à expressão para se calcular o valor de (x_F) , conforme mostra a Equação (3.9) abaixo. Da Tabela (3.7) nota-se na função senoidal que $a=h=2,565$, $b=6,28=2\pi$ e $c=16,41=2w$.

$$x_F = \frac{w}{2} + \frac{ac}{2h\pi} \left[\cos \left(\frac{\pi w}{c} + b \right) - \cos \left(\frac{2\pi w}{c} + b \right) \right] = (0,5 + 1/\pi) w \quad (3.9)$$

A seguir, a partir da Figura 3.8, verifica-se que a metade da distância entre cordões é igual à coordenada (x_F) subtraída da metade da largura do cordão, o que resulta na Equação (3.10).

$$d = 2 \left(x_F - \frac{w}{2} \right) = 2w/\pi \quad (3.10)$$

Portanto, da Equação (3.10) é possível calcular a sobreposição mínima (Sm) do segundo cordão com respeito ao primeiro, tal como mostrado na Equação (3.11).

$$Sm = 100 \left(1 - \frac{d}{w} \right) = 36,34\% \quad (3.11)$$

Desta maneira, o resultado da sobreposição mínima é mostrado na Figura 3.12. Pode-se verificar que os resultados experimentais são aproximadamente consistentes com o critério de área equivalente. Há algumas concavidades na superfície da sobreposição, como resultado da tensão superficial, as quais não foram consideradas para o modelo de sobreposição.



Figura 3.12. Corte transversal sobreposição mínima entre os cordões de solda

3.3.3.4 Espessura da camada de solda


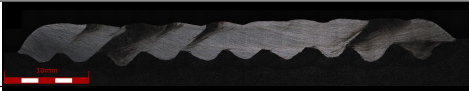
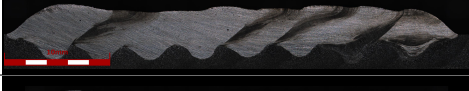






Nesta etapa, com o objetivo de mapear a espessura da camada em função da variação da distância entre os cordões e minimizar o trabalho de esmerilhamento após a tarefa de soldagem foi adotado, além da inspeção visual, o seguinte critério geométrico de aprovação do revestimento da camada: *a ondulação máxima dos cordões depositados não deve ser maior que um terço da altura dos cordões de solda* [5]. Neste trabalho, escolheu-se uma ondulação máxima de 1,0 mm.

Vale salientar que os parâmetros de soldagem e o passo de sobreposição aplicados nas condições de soldagem nesta etapa permitiu avaliar o nível do acabamento superficial resultante da camada depositada, considerando principalmente a planicidade sem presença de defeitos como inclusões e deformações da solda, sendo o passo dos cordões laterais, escolhido com base na análise anterior. Assim, a partir da sobreposição mínima pode-se encontrar uma relação de crescimento da camada.

Portanto, os corpos de prova soldados com as condições de sobreposição mostradas na Tabela (3.8) conseguiram formar com sucesso as camadas, não sendo observada nenhuma falha ou defeito, e apresentando um excelente acabamento superficial na faixa entre a sobreposição mínima

(36,34%) e 57%, utilizou-se temperatura de interpasse entre 145 °C e 150 °C.

Tabela 3.8. Relação da espessura da camada a partir da sobreposição mínima para os cordões depositados com os parâmetros do Teste 1

Sobreposição (%)	Altura da camada	Observações
34	2,90	Ondulação maior a 1,0 mm 
36,34	2,92	Ondulação < 1,0 mm 
38	3,0	Ondulação < 1,0 mm 
42	3,10	Ondulação < 1,0 mm 
46	3,31	Ondulação < 1,0 mm 
50	3,55	Ondulação < 1,0 mm 
54	3,80	Ondulação < 1,0 mm 
57	3,88	Ondulação < 1,0 mm 
58	>3,9	Excesso de respingos 

Por meio da Tabela (3.8), é possível observar que à medida que a sobreposição aumentou, a camada se tornou mais curta, mais alta e com menor penetração. Portanto, quando a região de sobreposição dos cordões de solda aumenta, conseqüentemente ocorre um incremento na altura da camada depositada, como já era de se esperar.

De forma similar, medidas semelhantes às apresentadas na Tabela (3.8) foram levantadas para as demais combinações de parâmetros da Tabela (3.6) (Testes 2 e 3). A Tabela (3.9) mostra os resultados dessas medidas (altura das camadas em função do afastamento entre os cordões de solda depositados), de forma comparativa entre os três testes, sendo que o comprimento dos cordões foi de 150 mm e as larguras das camadas depositadas foram superiores a 30 mm. Para garantir a largura mínima da camada foram depositados 10 cordões dispostos lado a lado, cuja sobreposição foi suficiente para proporcionar um bom acabamento superficial e ausência de defeitos.

Tabela 3.9. Testes da altura da camada em função da distância lateral entre os cordões de solda

Sobreposição (%)	Altura da camada (Y_C)			Observações
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	
34	2,90	2,62	2,31	Ondulações
36,34	2,92	2,60	2,35	Plana (mínima)
38	3,00	2,71	2,34	Plana
42	3,10	2,90	2,62	Plana
46	3,31	3,00	2,71	Plana
50	3,55	3,24	2,90	Plana
54	3,80	3,51	3,20	Plana
57	3,88	3,57	3,37	Plana (máxima)
58	>3,88	>3,57	>3,37	Excesso de respingos

Pode-se encontrar uma relação da altura da camada (Y_C) em função da sobreposição entre os cordões, como visto na Figura 3.13, sendo que para os diferentes parâmetros de soldagem as alturas de crescimento da camada apresentam a mesma tendência. Assim, a relação da altura da camada pode ser calculada pela Equação (3.15), que foi obtida a partir das equações de ajuste dos pontos mostrados na Figura 3.13. Observa-se que as inclinações das retas de ajuste para os três casos foram praticamente iguais, sendo o coeficiente da variável X (% de sobreposição) calculado pela média dos coeficientes obtidos no ajuste das três retas mostradas.

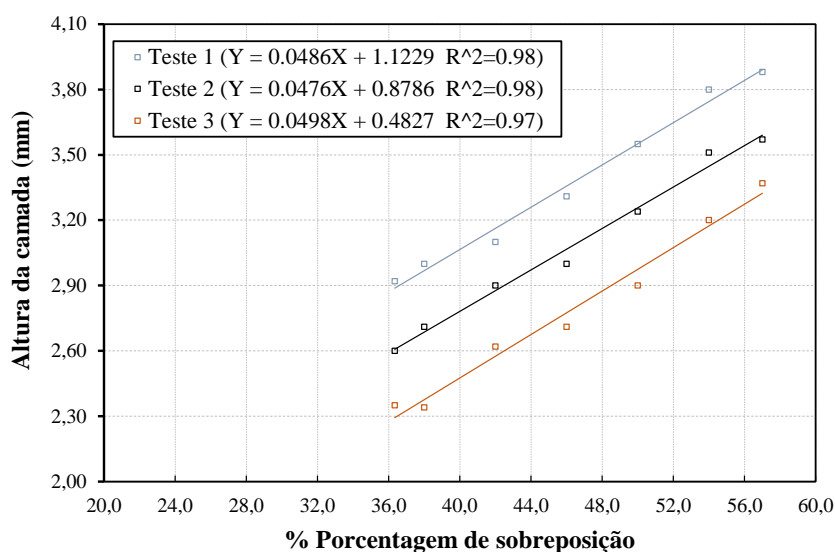


Figura 3.13. Variação da altura das camadas em função do percentual de sobreposição dos cordões

$$Y_{teste1} = 0,0486X + (Y_H - 1,766) \quad (3.12)$$

$$Y_{teste2} = 0,0476X + (Y_H - 1,729) \quad (3.13)$$

$$Y_{teste3} = 0,0498X + (Y_H - 1,809) \quad (3.14)$$

$$Y_C = 0,0486X + (Y_H - 1,768) \quad (3.15)$$

onde X é a sobreposição compreendida na faixa de: $36,34\% \leq X \leq 57\%$ e Y_H é a altura calculada pelo modelo estatístico (Equação (3.3)) em função dos parâmetros de soldagem.

Outra observação que pode ser feita da Figura. 3.13 é que existem faixas de valores da sobreposição dentro das quais os cordões ficaram sempre estáveis. No caso dos testes realizados, a faixa operacional ficou entre 36,34%, (menor valor de sobreposição para uma camada plana e estável) e 57% (maior valor de sobreposição). Acima deste limite, os cordões ficaram sempre instáveis apresentando excesso de respingos (ver lado direito da Figura 3.14). Tal fato deve-se provavelmente ao acúmulo de material depositado pelos pequenos afastamentos entre os cordões de solda. Já abaixo do limite mínimo os cordões ficaram sempre estáveis, mas sem formar uma camada de solda plana e apresentando ondulações maiores que 1,0 mm (medidos pico a pico), o que demonstra que o modelo experimental realmente faz considerações próximas da realidade na determinação da altura da camada em função do afastamento entre os cordões de solda.

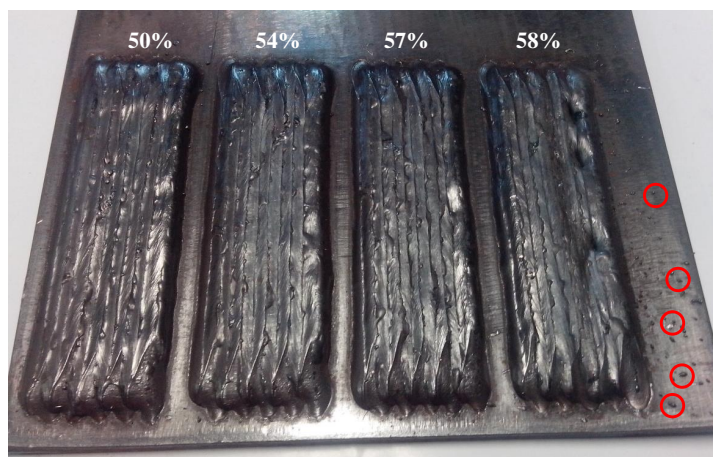


Figura 3.14. Sobreposição dos cordões de solda, depositados 10 cordões dispostos lado a lado formando uma camada de metal depositado

3.3.4 Estratégias de preenchimento

A estratégia de preenchimento a ser desenvolvida neste trabalho considera as observações de Pinheiro [6], sobre o preenchimento em camadas e suas análises sobre a qualidade superficial em processos de recuperação de trinca. Conforme apresentado no item 2.4.2 - Trajetórias de deposição de material, o preenchimento metálico de Pinheiro ocorreu sem trincas, porém observaram-se regiões com inclusões nas interfaces entre as extremidades dos cordões e as paredes laterais da cavidade, considerando cordões depositados em direção oblíqua em relação àquela. A presença das falhas de preenchimento observadas sugerem que a estratégia adotada pelo autor, a fim de preencher a cavidade com cordões retilíneos e paralelos entre si pode não ser a melhor, dando margem à busca por novas estratégias.

Portanto, neste trabalho, o fatiamento do volume em camadas paralelas foi feito de forma igual à adotada por Pinheiro [6], partindo-se do plano da placa mata-junta e criando-se planos paralelos a aquele, no sentido do preenchimento da cavidade. Cada plano paralelo define um contorno por meio de sua intersecção com a superfície limitante da cavidade. Deve-se notar que aqui se tratou de uma cavidade resultante da remoção de uma trinca passante iniciada em uma borda da pá, o que implica que a cavidade é aberta. Para realização de seu preenchimento, uma placa de suporte (placa mata-junta) é soldada na face inferior e o preenchimento se dá a partir da placa. A Figura 4.2 mostra um corpo de prova usinado de modo a simular essa situação. Considerando que geralmente há problemas de instabilidade durante a iniciação do processo de soldagem assim como em seu fim, os cordões de preenchimento sempre se iniciam fora do volume da cavidade e terminam também fora deste.

Definidas as camadas conforme descrição no parágrafo anterior, parte-se agora para a definição de como os cordões individuais devem ser dispostos de modo a construírem cada camada com a qualidade requerida. A experiência de Pinheiro [6] demonstrou que o uso de cordões oblíquos às superfícies limitantes da cavidade não resulta em camadas livres de defeitos. Neste trabalho, considerou-se que a melhor solução para o preenchimento de cada camada é a deposição de material em caminhos não necessariamente retilíneos, porém paralelos às intersecções entre as superfícies limitantes da cavidade e os planos de cada camada. A cada novo cordão depositado, um novo caminho paralelo é definido, agora entre aquele e o plano da camada em preenchimento.

A implementação dessa estratégia em computador implica inicialmente na definição dos caminhos base de cada camada, os quais são obtidos pelas intersecções dos planos paralelos, usados para o fatiamento do volume a ser preenchido, e as superfícies limitantes da cavidade. Os cordões de preenchimento de cada camada têm suas trajetórias definidas a partir da geração de percursos paralelos ao caminho base, de modo que a formação de cada camada se dê das bordas para a região central da cavidade. Cada cordão tem seu percurso definido por pontos obtidos a partir do

deslocamento, no plano da camada, de pontos do caminho do cordão anteriormente depositado (ou do caminho base), na direção normal a este e no sentido de fora para dentro da cavidade. O deslocamento a ser utilizado entre os cordões paralelos é definido em função do afastamento considerado no fatiamento da cavidade em planos paralelos. Esse, por sua vez, depende dos parâmetros de soldagem utilizados assim como do percentual de sobreposição adotado entre os cordões formadores de cada camada.

De forma similar à adotada por Siminski [34] e por Pinheiro [6], realizou-se um estudo sobre a melhor forma de se ordenar a deposição dos cordões seguindo os caminhos previamente definidos no processo de fatiamento da cavidade. Nesta etapa, trabalhou-se com três modos na formação de camadas: (a) cordões depositados de forma sequencial invertida; (b) cordões intercalados e (c) cordões duplos.

3.3.4.1 Modo de preenchimento por cordões depositados de forma sequencial invertida

Um problema que ocorre nas soldagens de revestimento das turbinas com o processo GMAW é o acúmulo de material depositado no início do cordão, mais especificamente, na região onde se dá a abertura do arco elétrico e sua diminuição com o cessar do arco elétrico [6] (vide Figura 3.15). Portanto, a execução sequencial alternando-se o início dos cordões no sentido longitudinal contorna esse problema.

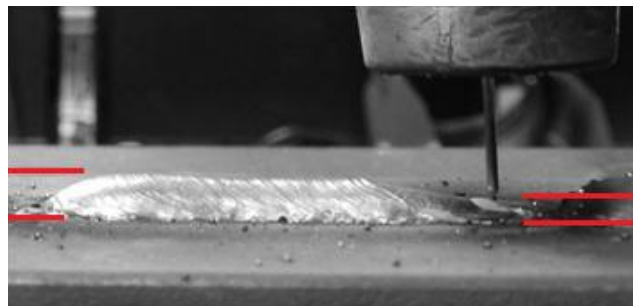


Figura 3.15. Visualização da altura do início e fim do cordão de solda [6]

Nessa estratégia para a formação dos cordões sequenciais invertidos, programou-se o robô para que ele depositasse os cordões pares em sentido direto e os cordões ímpares no sentido reverso diminuindo assim o efeito das não uniformidades encontradas no início e no final de cada cordão. A Figura 3.16 exemplifica esse sequenciamento no preenchimento da primeira camada, sendo que as linhas na cor preta representam o sentido direto (início próximo ao número indicativo de cada cordão) e a linha na cor azul o sentido reverso, dentro de uma cavidade representativa daquela

resultante da remoção de uma trinca parcialmente passante.

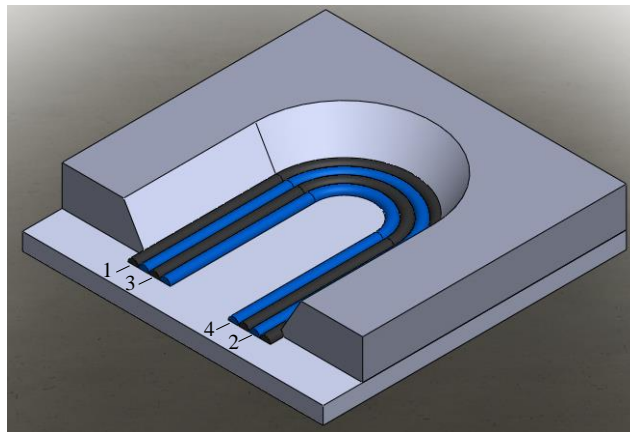


Figura 3.16. Representação do preenchimento sequencial invertido

3.3.4.2 Modo de preenchimento por cordões depositados de forma intercalada

Nessa estratégia, a direção dos cordões foi a mesma utilizada na primeira estratégia, para diminuir as falhas no início e no final do cordão, porém a distribuição da formação dos cordões é diferente, fazendo variações na deposição dos cordões. Aqui, os cordões de solda foram intercalados de forma que os cordões pares criem paredes de suporte para os cordões ímpares como mostra a Figura 3.17. Todos os cordões ímpares são depositados primeiro, com espaçamento correspondente ao dobro do afastamento entre cordões do caso anterior e, posteriormente, os cordões pares são depositados nos vales formados pelos cordões ímpares.

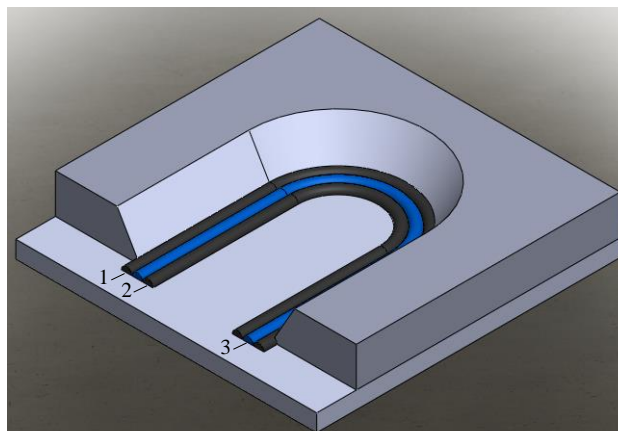


Figura 3.17. Representação do preenchimento por cordões intercalados

3.3.4.3 Modo de preenchimento por cordões depositados de forma dupla

Instabilidades na deposição metálica durante a abertura e cessar do arco elétrico podem provocar inclusões indesejadas, principalmente nas regiões internas de uma trinca [6], pois são regiões que não possibilitam acabamento ou retrabalho manual, portanto essas inclusões podem ser responsáveis por início de novas trincas. Diante da possibilidade de ocorrência desse fenômeno, essa estratégia realiza dois cordões laterais sequencialmente, sem interrupção do arco elétrico, conforme exemplificam a Figura 3.18. Nesse caso, os cordões iniciam e terminam na extremidade proximal da trinca, ficando as imperfeições facilmente removidas nessa face.

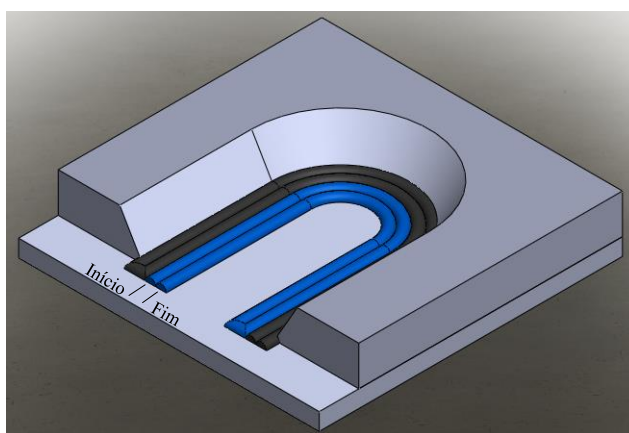


Figura 3.18. Representação do preenchimento por duplo cordão

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta resultados experimentais obtidos a partir dos diversos ensaios de preenchimento realizados em corpos de prova usinados para simularem um modelo de cavidade representativo daquela resultante da remoção de uma trinca em uma pá de turbina.

Os primeiros resultados apresentados no capítulo 3 permitiram mapear as variações da seção geométrica do cordão em função dos parâmetros de soldagem e também mapear a relação entre o percentual de sobreposição e a altura esperada para cada camada.

Para fins de simular as condições de soldagem próximas às necessárias à soldagem do aço CA6NM, as deposições de metal foram realizadas considerando temperatura de interpasse entre 145 °C e 150 °C [6], de modo que as condições de contorno de transferência de calor de cada cordão fossem semelhantes.

4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Os corpos de prova utilizados para o preenchimento foram produzidos a partir de uma placa de aço AISI 1020 de 15,875 mm (5/8") de espessura nominal, recortados e usinados no sentido de simular uma cavidade de trinca ocorrida em uma pá de turbina, conforme dimensões do desenho mecânico apresentado na Figura 4.1.

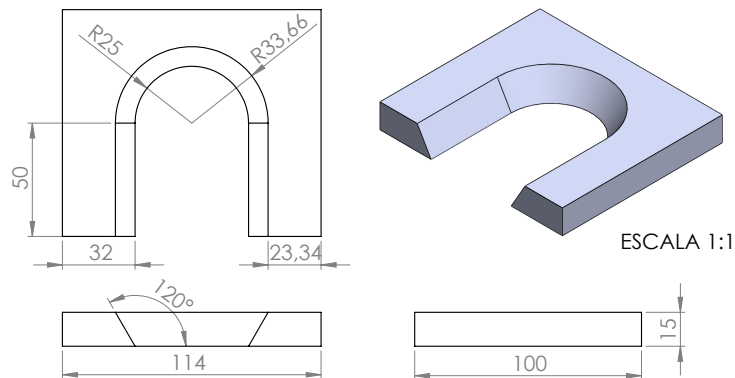


Figura 4.1. Desenho mecânico da simulação de cavidade resultante da remoção de uma trinca

Após usinagem, os blocos com representação de trinca foram fixados a uma placa mata-junta (*backing plate*) de 6,35 (1/4") de espessura nominal, servindo como apoio às camadas de solda do preenchimento. A Figura 4.2 mostra o corpo de prova resultante.

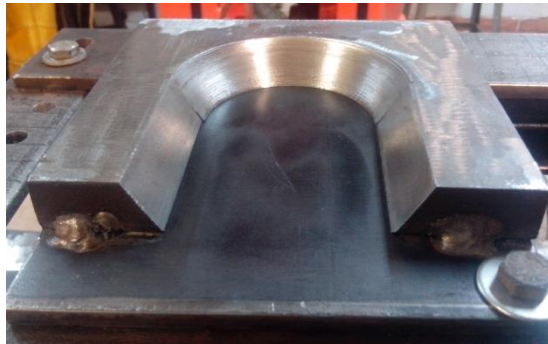


Figura 4.2. Corpo de prova representativo da cavidade após a remoção de uma trinca

4.2 INCLINAÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM

A inclinação da tocha é outro parâmetro que influencia na geometria do cordão de solda. Inicialmente, os resultados mostraram que, devido à maior proximidade da ponta do eletrodo às superfícies limitantes da cavidade, seguindo o contorno definido pela intersecção dessas com a superfície da placa mata-junta, ocorreu um desvio do arco, promovendo um desvio das gotas para as laterais, causando instabilidade na transferência metálica e, conseqüentemente, má formação do cordão. Atribuiu-se esse comportamento ao fato de as laterais estarem mais próximas ao eletrodo [47], resultando em um caminho de menor impedância para o arco. De modo a eliminar esse comportamento, reorientou-se a tocha de modo que o eixo do arame ficasse na bissetriz do ângulo formado entre a face lateral e a placa mata junta, de maneira semelhante ao que se costuma fazer em soldagem de juntas na posição 2-F [47].

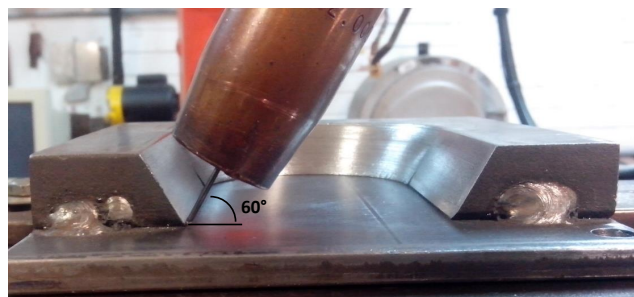


Figura 4.3. Posição da tocha de soldagem a 60° com respeito à placa mata-junta

Portanto, o ângulo de trabalho da tocha de soldagem passou a ter 60° em relação à placa

mata junta (o ângulo contido entre a placa mata junta e as laterais da cavidade foi fixado em 120°), sendo que esta mudança do ângulo de trabalho foi só para o primeiro cordão em cada camada. A Figura 4.3 mostra o posicionamento da tocha com relação ao corpo de prova, adotado para manter a regularidade da geometria do primeiro cordão de solda em cada camada.

Adicionalmente, também foi possível verificar que quando se soldou com velocidades mais altas, houve um pequeno desvio do arco para uma das superfícies da cavidade, este apresentou cordões irregulares e não se conseguiu depositar uniformemente. Aparentemente esta irregularidade do cordão ocorreu porque, o desvio do arco nas superfícies limitantes da cavidade e o baixo volume de deposição de solda causa uma má distribuição de calor nas superfícies. No entanto, com a diminuição da velocidade de soldagem o cordão tendeu a ser formar corretamente sem a oscilação do arco, estabilizando-se uniformemente nas superfícies limitantes da cavidade. A Tabela (4.1) mostra os resultados destes testes. Para a variação do volume de metal depositado, fixou-se a velocidade de alimentação do arame (V_a) e variou-se a velocidade de soldagem (V_s).

Tabela 4.1. Verificação da influência na variação de taxa de deposição com ângulo de inclinação da tocha de soldagem de 60°

Teste	Ip (A)	Ib (A)	Tp (ms)	Tb (ms)	Im (A)	Ts (V)	Vs (mm/s)	Va (m/min)	Cordão
1	380	80	2,4	3,6	204	23,5	10	8	irregular
2	380	80	2,4	3,6	204	23,5	9	8	irregular
3	380	80	2,4	3,6	204	23,5	8	8	regular

A partir da Figura 4.4, pode-se observar que o volume depositado com a velocidade de soldagem mais baixa foi suficiente para depositar o cordão de solda sem defeitos.

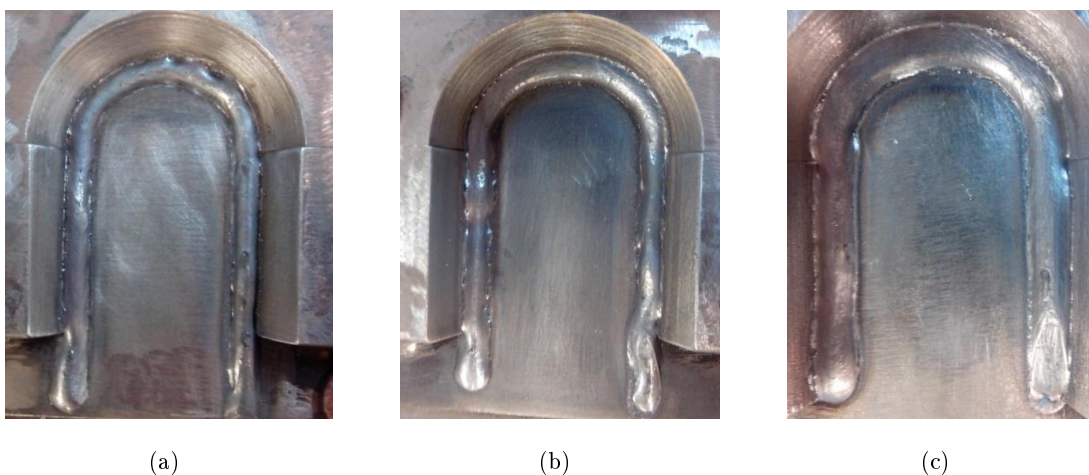


Figura 4.4. Influência da variação de taxa de deposição com ângulo de inclinação da tocha de soldagem de 60° : (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3

4.3 NÚMERO DE CAMADAS DE SOLDA

A máxima profundidade existente, calculada a partir da diferença entre a superfície reconstruída e a superfície danificada do corpo de prova, foi de 15,875 mm. Sendo assim, para realizar a recuperação da região danificada do corpo de prova foram necessárias cinco camadas de solda, uma vez que, a altura média de cada camada de solda é de 3,175 mm.

Contudo, a altura final das camadas após preenchimento da cavidade não é simplesmente a soma do reforço do cordão isolado, pois dois fenômenos contribuem para a sua altura final. O primeiro se refere à diferença de molhabilidade do metal de solda na placa mata-junta, pois, na primeira camada a placa mata-junta é o aço AISI 1020, enquanto na segunda camada, é o próprio material do metal de solda diluído, o que proporciona uma maior molhabilidade resultando num cordão de solda mais largo e com um reforço menor. O outro fenômeno envolvido é relativo ao efeito da sobreposição dos cordões que proporciona um aumento da altura da camada à medida que essa aumenta. Assim a título de comparação, foi considerado o efeito destes dois fenômenos (ver Figura 4.5).

Portanto, foi verificado que a situação que produzia a recuperação da região danificada era com escolha da sobreposição de 46% (3,31 mm de altura de cada camada), correspondente aos parâmetros do teste 1 da Tabela 3.9). Com isso o acabamento da última camada acaba sendo bastante oneroso em termos de tempo gasto, tanto para depositar material a mais quanto para retirá-lo depois através do esmerilhamento.

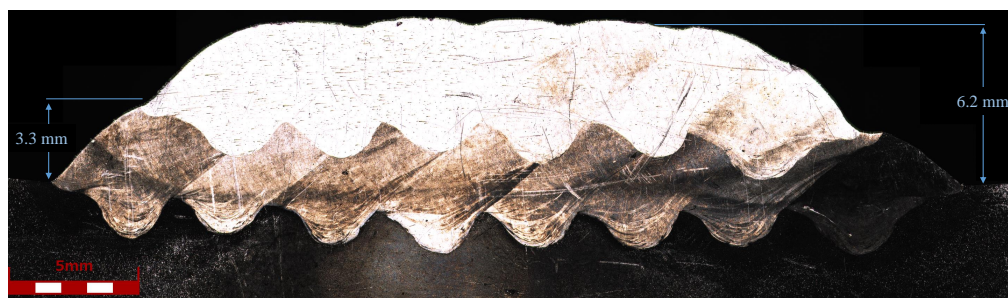


Figura 4.5. Altura final de duas camadas com sobreposição de 46%

4.4 RECOBRIMENTO DA SUPERFÍCIE PELO PROCESSO DE SOLDAGEM

Após definição dos parâmetros de soldagem e definição da estratégia, o preenchimento metálico ocorreu com falhas. No procedimento de soldagem, sugeriu-se que os cordões de preenchimento deveriam iniciar-se e terminar fora da região a ser preenchida, de modo que possíveis

falhas de ignição e ou decorrentes do processo de desligamento da fonte não ocorressem na região preenchida e fossem removidas durante o acabamento do processo de recuperação. Entretanto, observou-se que a partir da segunda camada de preenchimento, os cordões iniciais de cada camada apresentavam defeitos na parte externa à cavidade, principalmente aqueles que iniciavam a deposição de uma nova camada. Isso se deveu ao fato de o modelo de cavidade ter superfícies limitantes oblíquas à placa mata-junta, implicando que os cordões iniciais das camadas depositadas após a primeira não tinham suporte em sua parte externa à cavidade (ver Figura 4.6). Para solucionar esse problema, seria necessário completar a camada depositada com cordões de preenchimento na região externa à cavidade antes de se iniciar a deposição da camada seguinte. Neste trabalho, o objetivo era estabelecer a melhor estratégia de preenchimento a ser utilizada, motivo pelo qual decidiu-se realizar os ensaios com início e fim dos cordões no limite da abertura da cavidade, de modo a não ser necessário programar o robô para depositar os cordões de suporte necessários à estratégia delineada anteriormente. Obviamente, um preenchimento real demandaria a deposição desses cordões.



Figura 4.6. Defeitos após preenchimento completo com cordões que iniciaram fora do volume da cavidade e terminaram também fora deste

Definidas as camadas conforme descrição no parágrafo anterior, consideraram-se agora as trajetórias obtidas para a primeira camada de deposição, ou seja, a camada a ser depositada sobre a placa mata junta, como mostram as Figuras 3.16, 3.17 e 3.18. A seguir, após definição dos pontos de soldagem e sua adaptação à linguagem ARLA (trecho mostrado no Apêndice C), o preenchimento do corpo de prova foi realizado pelo robô de soldagem com paradas programadas para resfriamento e limpeza manual dos cordões por meio de escova com cerdas de aço, para remoção de fuligem. A Figura 4.7 mostra os corpos de prova após finalização da primeira camada (camada raiz).

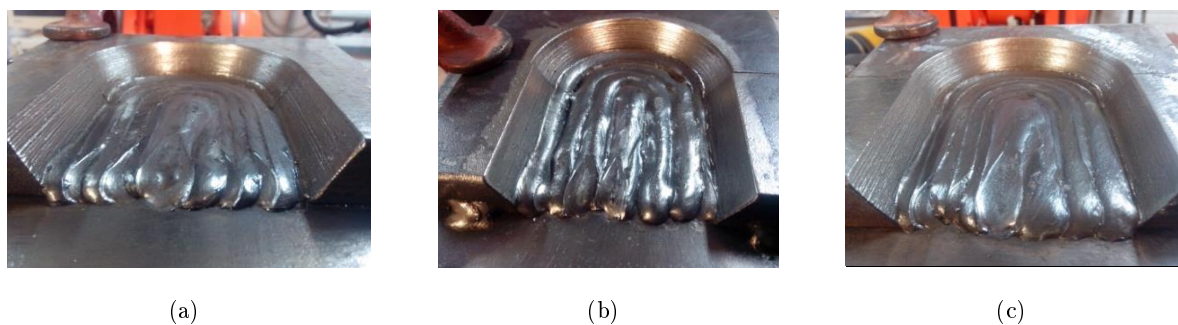


Figura 4.7. Execução da trajetória de soldagem da primeira camada de deposição: (a) sequencial invertido, (b) intercalados e (c) cordões duplos

Para recobrir a superfície danificada são necessários vários passes de soldagem. Isso implica que as trajetórias de solda sejam organizadas em camadas. Portanto, nas camadas subsequentes, os cordões foram executados com o seu eixo equidistante dos eixos dos dois cordões formadores da camada já depositada, mantendo-se os 46% de sobreposição entre os cordões. Essa técnica auxilia a manter intercaladas as ZTAs e lóbulos de penetração e foi empregada em todos os recobrimentos apresentados neste trabalho. A Figura 4.8 mostra os corpos de prova após preenchimento completo.

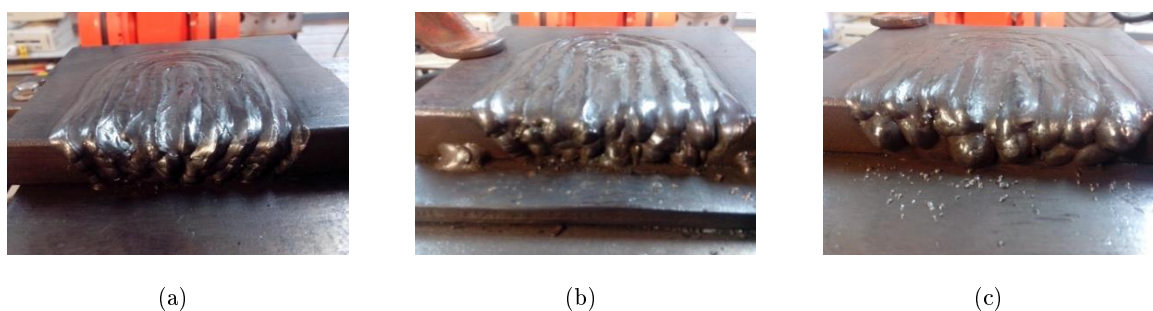


Figura 4.8. Corpos de prova após preenchimento completo: (a) sequencial invertido, (b) intercalados e (c) cordões duplos

Devido à baixa capacidade de dissipação térmica do corpo de prova e à influência da elevação da temperatura sobre a geometria do cordão de solda, utilizou-se temperatura de interpasse entre 145 °C e 150 °C, sendo seu monitoramento realizado com a câmera termográfica Thermovision A40M (*FLIR Systems*) e posicionada a uma distância de 1,80 m da peça [6]. Neste trabalho não foi realizado preaquecimento ou pós-aquecimento.

No entanto, o controle da temperatura de interpasse durante a soldagem é requerido para minimizar problemas na microestrutura final da junta soldada [6]. A Figura 4.9 mostra a visualização por termografia do corpo de prova em preenchimento. A emissividade utilizada para a recuperação dos valores de temperatura foi de 0,55 [45].

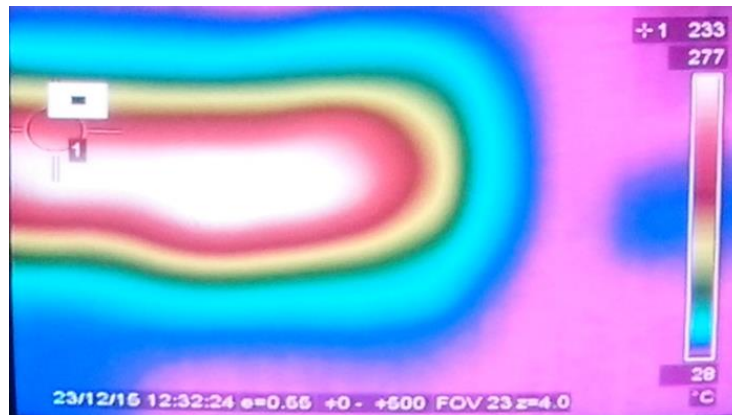


Figura 4.9. Monitor de visualização da câmara termográfica

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho, estudou-se o problema do preenchimento de cavidades provenientes da remoção de trincas em placas espessas de metal, utilizando o processo GMAW-P. Estudaram-se diferentes estratégias para a deposição dos cordões formadores de cada camada e propôs-se uma nova estratégia de preenchimento de cavidades. O desenvolvimento desta estratégia corresponde, em primeira instância, em determinar o envelope de parâmetros de soldagem do processo GMAW-P, visando à obtenção de cordões com qualidade adequada e com processo estável. Em uma segunda instância, relacionaram-se os parâmetros de soldagem com a geometria esperada do cordão e o crescimento da camada de solda. Nessa etapa desenvolveram-se modelos de predição de altura do reforço e de largura esperada para o cordão de solda em função dos parâmetros de soldagem (velocidade de alimentação de arame, tensão de soldagem e velocidade de soldagem), a seguir o mapeamento da altura de crescimento da camada em função da variação da distância entre os cordões. Assim, considerou-se que a qualidade superficial da camada de metal a ser depositada foi determinada pelo afastamento entre os passes de cordões de solda. O número de camadas necessárias ao preenchimento total depende da profundidade máxima da cavidade e da altura esperada para cada camada depositada, o que, por sua vez, depende dos parâmetros de soldagem e do afastamento adotado entre os cordões componentes de cada camada.

Após definição dos parâmetros de soldagem e do afastamento adotado entre os cordões de solda, as estratégias de preenchimento foram testadas experimentalmente, por meio da deposição de camadas por soldagem robotizada, realizado em um corpo de prova usinado como simulação de cavidade resultante da remoção de uma trinca. Esse corpo de prova foi projetado em SolidWorks e posteriormente obtidos os pontos de soldagem que foram programados de forma *off-line* no robô de soldagem utilizando o aplicativo SportS3, em linguagem ARLA.

Analisando os resultados obtidos no preenchimento metálico, pode-se verificar, de acordo com a Figura 4.7, que as amostras soldadas com a condição de cordões sequenciais apresentaram-se aptas para a realização de camadas, formando inicialmente cordões com bom acabamento. Diferentemente, as amostras resultantes da deposição de cordões intercalados apresentaram vários defeitos formados durante o processo de deposição.

Ainda, verificou-se que, logo após iniciar a soldagem do terceiro cordão, houve uma grande

oscilação do arco, cujo resultado foi seu desvio, causando uma instabilidade na transferência metálica. Tal comportamento resultou no aspecto do cordão de solda mostrado na Figura 4.7(b), o qual não conseguiu sobrepor o cordão linearmente e preencher a região entre passes.

Adicionalmente, observa-se uma maior quantidade de respingos formados pelas estratégias com cordões intercalados e por cordões duplos. No entanto, as camadas de solda, produzidas pela estratégia de cordões sequenciais, apresentam excelente acabamento superficial e são isentas de respingos e salpicos (ver Figura 4.8).

Com o intuito de se verificar a ocorrência de defeitos de preenchimento nas amostras preenchidas com as diferentes estratégias de sequenciamento de cordões testadas, realizou-se uma análise macrográfica das seções em corte dos corpos de prova. Os defeitos procurados nessa análise eram do tipo porosidades, falta de fusão e retenção de inclusões no volume depositado e em suas interfaces com o material de base. Não se encontraram tais defeitos nas seções analisadas (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3), porém observaram-se diferenças na coloração das regiões reveladas pelo ataque químico realizado com o reagente *Kalling*, o qual é indicado para revelação de microestrutura em aços inoxidáveis. Observam-se regiões mais claras nas partes superiores, com distribuição diferente para cada estratégia de preenchimento testada, e regiões mais escuras nas partes inferiores do preenchimento. Essa diferença de coloração pode indicar variações microestruturais como as observadas por Santos [45], que pesquisou o efeito metalúrgico nas camadas inferiores de soldagem multicamadas, do aço AWS 410 NiMo sobre o aço CA6NM, decorrente dos diversos ciclos térmicos impostos pela superposição de cordões. Santos observou que os cordões inferiores apresentavam microestrutura com grãos refinados e os passes superiores apresentavam microestrutura típica de soldagem, com grãos maiores e orientados na direção do gradiente de temperatura. Marques, Modenesi e Bracarense [47] também afirmam que na soldagem multipasse ocorre refinamento de grãos nos passes inferiores decorrente dos ciclos térmicos produzidos pelos passes superiores.

Na Figura 5.1, as linhas horizontais azuis representam estimativas dos planos de início de cada camada, considerando que o crescimento por camada foi mantido em 3,31 mm. A macrografia revelou, pelo menos na seção analisada, a inexistência de porosidades em toda a região recuperada. O resultado da avaliação geométrica da superfície recuperada mostrou, com relação à superfície original, um excesso de metal situado na faixa de 0 a 2,0 mm. A penetração observada na placa mata junta foi de aproximadamente 1,3 mm.



Figura 5.1. Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento sequencial invertida

No caso de cordões intercalados, a Figura 5.2 mostra a macrografia desse ensaio. Observam-se que a qualidade superficial da camada depositada piora à medida que o número de camadas cresce, produzindo ondulações inaceitáveis, quando comparadas com o critério adotado de 1 mm pico a pico.



Figura 5.2. Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento por cordões intercalados

Já em relação à Figura 5.3 formada por cordões duplos, também é possível notar regiões mais claras na parte superior central e regiões mais escuras nas partes inferiores do preenchimento. Provavelmente, provocado pela maior transferência de calor à peça devido à elevação do comprimento do cordão de solda em cada passe. Esse fenômeno é intensificado nos ensaios pela baixa taxa de dissipação de calor do modelo, a qual não é suficiente para resfriar a peça à realização do retorno do cordão de solda. Nota-se ainda a unificação das poças de solda, durante a execução dos cordões duplos e maior desalinhamento volumétrico na superfície final, percebido pela marcação da linha na cor azul. A penetração observada na placa mata junta foi de aproximadamente 1,5 mm.



Figura 5.3. Macrografia do ensaio da estratégia de preenchimento por cordões duplos

5.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTROS AUTORES

A importância dos resultados obtidos na estratégia para o preenchimento por deposição robotizada de planos paralelos de metal de solda, pode ser observada mais facilmente quando são comparados com os resultados obtidos por outros autores que abordam o mesmo problema na literatura científica. Detalhes a serem observados incluem a forma de preenchimento em camadas e suas análises sobre a qualidade superficial em processos de recuperação de trinca. Com a finalidade de realizar uma avaliação qualitativa, faz-se a comparação dos resultados deste trabalho com os relatados nas referências [6] e [35].

A primeira comparação é feita com os resultados obtidos no trabalho de Pinheiro [6], por ter antecedido a presente pesquisa. Desta maneira, podem-se observar na Figura 5.4 a qualidade superficial dos corpos de prova obtidas após preenchimento completo, realizadas neste e naquele trabalho. O preenchimento metálico de Pinheiro ocorreu sem trincas, porém observaram-se regiões com falta de preenchimento nas interfaces entre as extremidades dos cordões e as superfícies laterais da cavidade, principalmente nas regiões internas da trinca. Esse problema poderia levar à retenção de inclusões ao se depositar uma camada subsequente, ou deixar vazios. Ambas as situações poderiam se configurar em novos nucleadores de trincas. Diferentemente, os resultados da presente pesquisa mostram-se satisfatórios sobre a qualidade superficial em processos de recuperação de trinca, não apresentando falhas de preenchimento. Neste trabalho, considerou-se que a melhor solução para o preenchimento de cada camada é a deposição de material em caminhos não necessariamente retilíneos, porém paralelos às intersecções entre as superfícies limitantes da cavidade e os planos de cada camada.



(a)



(b)

Figura 5.4. Comparação dos corpos de prova após preenchimento completo com os resultados de Pinheiro [6]

Há também outras diferenças, uma maior quantidade de respingos formados pelas estratégias de preenchimento a partir das primeiras camadas (ver Figura 5.5). Nota-se que esses respingos significam perda de material que deveria ser depositado na junta, além de requerer esforço extra para remoção da superfície da peça, assim, são indesejáveis e devem ser minimizados. Essa diferença é devida provavelmente pela seleção do modo de transferência metálica. Pinheiro [6] optou pela escolha da transferência por curto-circuito, pois é aquela utilizada na prática que apresenta maior geração de respingos, se comparada com a transferência pulsada (GMAW-P).



Figura 5.5. Comparação da primeira camada de deposição com os resultados de Pinheiro [6]

Por último, por meio da Figura 5.6 faz-se a comparação entre as macrografias dos corpos de prova nos dois trabalhos. No preenchimento de Pinheiro [6] as análises macrográficas das seções de corte revelaram presença de inclusões/vazios, sendo que essas inclusões podem ser responsáveis por início de novas trincas, porém esses defeitos foram evitados com a aplicação da nova estratégia de preenchimento proposta neste trabalho.



Figura 5.6. Comparação macrográfica das seções de corte do corpo de prova com os resultados de Pinheiro [6]

Outra comparação interessante pode ser feita com os resultados obtidos por Didenko e Zak [35] referência recorrente em trabalhos de pesquisa similares em recuperação de trinca, mas com

menos detalhes em preenchimento multicamada. Da mesma forma que com o autor anterior [6], apresenta-se na Figura 5.7 a comparação do preenchimento metálico. No presente trabalho o preenchimento metálico ocorreu sem trincas provocadas pelo processo de soldagem, já no estudo de Didenko e Zak [35] após etapa de soldagem observa-se que os resultados foram insatisfatórios, apresentando novas trincas nas laterais do cordão de solda, como consequência da contração térmica do material durante o resfriamento da solda. Vale salientar que nestes dois trabalhos não foi realizado preaquecimento.



Figura 5.7. Comparação do preenchimento metálico após etapa de soldagem com os resultados de Didenko e Zak [35]

De acordo com todos estes testes realizados, é importante indicar que o preenchimento ocorreu sem trincas provocadas pelo processo de soldagem, e não se observam regiões com inclusões nas interfaces entre as extremidades dos cordões e as superfícies limitantes da cavidade, isso vem a mostrar que a estratégia adotada de preencher a cavidade com cordões depositados em trajetórias paralelas às superfícies limitantes da cavidade, seguindo o contorno definido pela intersecção dessas com a superfície da placa mata-junta pode ser a indicada. Portanto, comprovam a viabilidade do reparo, do ponto de vista geométrico, da cavidade do tipo trinca a partir das definições de estratégias de preenchimento por deposição metálica por um robô de soldagem.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados ensaios de preenchimento metálico pelo processo GMAW-P utilizando diferentes estratégias implementadas em laboratório por meio de um robô industrial. Os resultados do trabalho permitiram concluir:

- As camadas de solda, produzidas pela estratégia de cordões sequenciais invertidos, apresentaram-se melhores que aquelas produzidas pelas estratégias de deposição intercalada e de cordões duplos, do ponto de vista geométrico, sendo isentas de respingos e salpicos.
- A estratégia de cordões sequenciais invertidos apresentou maior planicidade em cada camada depositada, resultando em maior compatibilidade com os modelos de previsão de altura de camadas utilizados na etapa de fatiamento da cavidade.
- Do ponto de vista de qualidade do preenchimento, independente da forma de sequenciamento dos cordões, não se observaram defeitos tipo inclusão ou vazios nos cortes realizados.
- Com as estratégias de deposição intercalada e por cordões duplos apresentaram maior nível de ejeção de gotículas e maior instabilidade, não se pode afirmar que não houve formação de defeitos internos.
- Para manter a regularidade da geometria do primeiro cordão de solda em cada camada, reorientou-se a tocha de soldagem de modo que o eixo do arame ficasse na bissetriz do ângulo formado entre a face lateral e os planos de cada camada.
- O preenchimento ocorreu sem trincas, e não se observaram regiões com inclusões nas interfaces entre as extremidades dos cordões e as superfícies limitantes da cavidade.
- A faixa de sobreposição dos cordões de solda proporcionou uma ondulação máxima menor que 1,0 mm nas camadas de solda atendendo, desta forma, o critério adotado para aprovação geométrica do revestimento.

- Todas estratégias propostas tiveram qualidade superficial satisfatória, porém o acabamento secundário por esmerilhamento é necessário com objetivo de adequação ao perfil original.
- Através das estratégias 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 eletrodo tubular inox de alma metálica de 1,2 mm de diâmetro sobre superfícies em cavidades que simulam trincas de aço carbono 1020.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho não foram consideradas algumas situações para o problema de reparo de cavidades por soldagem robotizada a partir da deposição de camadas paralelas de metal de solda, permitindo pesquisas e aperfeiçoamentos no desenvolvimento deste trabalho.

Assim, como trabalhos futuros sugere-se:

- Instalação de sistema de resfriamento fluídico com controle da temperatura da peça em preenchimento, objetivando simular a capacidade de dissipação térmica da massa da turbina e permitir execução de outras estratégias de preenchimento, como tecimento ou preenchimento sem interrupção;
- Visto que a geometria do cordão de solda e o resultado qualitativo da deposição multicamada influenciam no resultado do preenchimento, outras posições de soldagem além da plana poderiam ser avaliadas utilizando-se as mesmas estratégias;
- Devido ao fato de o modelo de cavidade ter superfícies limitantes oblíquas às placa mata-junta, implicando que os cordões iniciais das camadas depositadas após a primeira não tem suporte em sua parte externa à cavidade, é necessário completar a camada depositada com cordões de preenchimento na região externa à cavidade antes de se iniciar a deposição da camada seguinte.
- Avaliar a relação entre tipo de gás de proteção e arame de solda de modo a encontrar uma combinação que elimine necessidade de limpeza por escovação após a deposição de cada cordão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIU, X.; LUO, Y.; WANG, Z. A review on fatigue damage mechanism in hydro turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 54, p. 1–14, 2016.
- [2] BOUDREAU, E. et al. Traitement thermique localisé après soudage pour une roue de turbine en acier inoxydable martensitique au moyen un procédé robotisé de chauffage par induction développé pour les applications in situ. *Advances in Hydroelectric Turbine Manufacturing and Repair*, Materials Science and Technology, Conference paper, Montreal, Québec, Canada, Aug. 2015.
- [3] HAZEL, B. et al. Field repair and construction of large hydropower equipment with a portable robot. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 102–122, 2012.
- [4] NICHOLSON, A. *Rapid adaptive programming using image data*. Tese (Doutorado) — Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia, 2005.
- [5] BONACORSO, N. G.; DUTRA, J. C. Adaptation of the plasma process with automatic wire feeding for recovery of surfaces by automated welding. *Welding International*, Taylor & Francis, v. 23, n. 2, p. 106–111, 2009.
- [6] PINHEIRO, L. S. *Mapeamento 3D e planejamento de trajetórias para preenchimento de cavidades por meio de soldagem em múltiplos passes usando o processo Gmaw robotizado*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- [7] DING, D. et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from cad to finished part. *Computer-Aided Design*, v. 73, p. 66–75, 2016.
- [8] GONÇALVES, B. H. B. *Estudo Comparativo da Resistência à Erosão por Cavitação do Metal de Solda Depositado por um Arame Tubular Tipo 13% Cr-4% Ni-0, 4% Mo e do Aço Fundido ASTM A 743 CA-6NM*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [9] HART, D.; WHALE, D. A review of cavitation - erosion resistant weld surfacing alloys for hydroturbines. *Eutectic Australia Pty. Ltd., Sydney*, 2007.

- [10] BINACIONAL, I. 2010. disponível em:<<http://jie.itaipu.gov.br/node/45217>>.
- [11] KAH, P. et al. Usability of arc types in industrial welding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Springer, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2014.
- [12] MOREIRA, A. F. *Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- [13] DIAZ, V. V.; DUTRA, J. C.; OLIVEIRA, A. S. C. M. Deposição por plasma com arco transferido. *Soldagem & Inspeção*, Scielo, v. 15, n. 1, p. 41–51, 2010.
- [14] HUTH, H. J. *Fatigue design of hydraulic turbine runners*. Tese (Doutorado) — Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Engineering Design and Materials, Trondheim, Norway, 2005.
- [15] GOUVEIA, R. R. et al. Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por gtaw do aço astm a743-ca6nm. *Soldagem & Inspeção*, Scielo, v. 18, n. 2, p. 127–137, 2013.
- [16] BILMES, P.; SOLARI, M.; LLORENTE, C. Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13cr - nimo martensitic steel weld metals. *Materials Characterization*, v. 46, n. 4, p. 285–296, 2001.
- [17] THIBAUT, D. et al. Residual stress characterization in low transformation temperature 13% cr-4% ni stainless steel weld by neutron diffraction and the contour method. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 527, n. 23, p. 6205–6210, 2010.
- [18] VAZ, C. T. *Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13% Cr-4% Ni-0, 4% Mo*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [19] MODENESI, P. J. *Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais*. [S.l.]: Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2009.
- [20] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in gma welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 6, p. 1406–1413, 2012.
- [21] OGINO, Y.; HIRATA, Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas - shielded gmaw. *Welding in the World*, Springer, v. 59, n. 4, p. 465–473, 2015.

- [22] NORRISH, J. Process control and automation developments in welding. In: *8th Int. Conf. on Trends in Welding Research*. ASM. [S.l.: s.n.], 2009. p. 17–24.
- [23] KRISHNAN, S.; KULKARNI, D.; DE, A. Probing pulsed current gas metal arc welding for modified 9cr-1mo steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer, v. 24, n. 4, p. 1462–1470, 2015.
- [24] JOSEPH, A. et al. Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, Maney Publishing, v. 8, n. 6, p. 400–406, 2003.
- [25] JEFFUS, L. *Welding: principles and applications*. [S.l.]: 7 ed., Clifton Park, New York: Cengage Learning, 2012.
- [26] CHAVEZ, J. J. M. *Uma metodologia para obtenção e validação de parâmetros ótimos em soldagem GMAW Pulsado*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- [27] MODENESI, P.; AVELAR, R. de. The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1–3, p. 226–232, 1999.
- [28] HERMANS, M. J.; OUDEN, G. D. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. *Welding Journal-New York*, Welding Research Supplement, p. 137 – s, 1999.
- [29] IBRAHIM, I. A. et al. The effect of gas metal arc welding (gmaw) processes on different welding parameters. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 1502–1506, 2012.
- [30] TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem mig/mag. *Soldagem & Inspeção*, Scielo, v. 17, n. 3, p. 218–228, 2012.
- [31] ESAB. *Soldagem MIG/MAG. Tradução de Cleber Fortes e Assistência Técnica consumíveis*. [S.l.]: ESAB BR,135p, 2005.
- [32] GODIN, S. et al. On - site post - weld heat treatment of welds made of 410nimo steel. *Advances in Hydroelectric Turbine Manufacturing and Repair*, Materials Science and Technology, Conference paper, Montreal, Québec, Canada, Oct. 2013.
- [33] ZHAO, H. et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 212, n. 1, p. 276–285, 2012.

- [34] SIMINSKI, M. *Weld path optimisation for rapid prototyping and wear replacement by robotic gas metal arc welding*. Tese (Doutorado) — Faculty of Engineering, University of Wollong, Australia, 2003.
- [35] DIDENKO, T.; ZAK, M. Turbine shroud cracking investigation and repair. *Journal of failure analysis and prevention*, Springer, v. 12, n. 3, p. 314–317, 2012.
- [36] XIONG, J. et al. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic gmaw-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 417–423, 2013.
- [37] SURYAKUMAR, S. et al. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 331–344, 2011.
- [38] CAO, Y. et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic mag welding process. *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 27, n. 3, p. 641–645, 2011.
- [39] DING, D. et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (waam). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 31, p. 101–110, 2015.
- [40] SHARMA, A.; ARORA, N.; MISHRA, B. K. Mathematical model of bead profile in high deposition welds. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 220, p. 65–75, 2015.
- [41] HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S.; GEORGE, E. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building*. [S.l.]: New York:John Wiley & Sons, 1978.
- [42] MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. [S.l.]: 4 ed., New Jersey:John Wiley & Sons, 2016.
- [43] MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. *Introduction to linear regression analysis*. [S.l.]: 4 ed., New Jersey:John Wiley & Sons, 2015.
- [44] AURES, J. E. V. *Avaliação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- [45] SANTOS, M. T. *Determinação da emissividade e análise microestrutural do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM decorrente da soldagem GMAW em múltiplos passos com metal de deposição AWS 410 NiMo*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

- [46] WONG, Y. R.; LING, S. F. An investigation of dynamical metal transfer in gmaw - effects of argon shielding gas. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 214, n. 1, p. 106–111, 2014.
- [47] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. [S.l.]: 3 ed., Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

APÊNDICE

A. MODELAGEM TAMANHO DO CORDÃO

O procedimento de soldagem para realização dos cordões de solda sobre os corpos de prova conforme descrito na seção 3.3.2, resultou em 20 experimentos. Nesta etapa apresenta-se a concepção dos modelos de segunda ordem a partir das medições realizadas. As tabelas de planejamento experimental acompanham cada modelo, assim como as respectivas superfícies de resposta. Na Tabela (A.1), a seguir, tem-se os experimentos selecionados e especificam-se os valores correspondentes para cada variável. O primeiro modelo em estudo é a da altura do cordão.

Tabela A.1. Planejamento experimental para o tamanho do cordão

Ensaio	Variáveis de entrada						Parâmetros de resposta	
	Codificadas			Originais			H (mm)	W (mm)
	x_1	x_2	x_3	Va (m/min)	Ts (V)	Vs (mm/s)		
1	-1	-1	-1	7	23	9	3,014	6,691
2	1	-1	-1	8	23	9	3,692	7,587
3	-1	1	-1	7	24	9	2,336	8,526
4	1	1	-1	8	24	9	3,201	9,881
5	-1	-1	1	7	23	11	2,538	5,606
6	1	-1	1	8	23	11	2,999	6,031
7	-1	1	1	7	24	11	2,219	6,456
8	1	1	1	8	24	11	2,725	7,497
9	-1,68	0	0	6,659	23,5	10	2,264	6,345
10	1,68	0	0	8,341	23,5	10	3,187	8,068
11	0	-1,68	0	7,5	22,659	10	2,985	5,528
12	0	1,68	0	7,5	24,341	10	2,466	8,605
13	0	0	-1,68	7,5	23,5	8,318	3,231	9,657
14	0	0	1,68	7,5	23,5	11,682	2,307	6,143
15	0	0	0	7,5	23,5	10	2,613	7,363
16	0	0	0	7,5	23,5	10	2,553	7,343
17	0	0	0	7,5	23,5	10	2,593	7,573
18	0	0	0	7,5	23,5	10	2,673	7,583
19	0	0	0	7,5	23,5	10	2,533	7,303
20	0	0	0	7,5	23,5	10	2,554	7,573

A.1 MODELO DA ALTURA DO CORDÃO

Para o caso do modelo da altura do cordão, a Equação (2.6) refere ao modelo de segunda ordem como:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon$$

assim, com referência às Equações (2.8) e (2.10), e em relação aos níveis codificados e o planejamento experimental, para o modelo de segunda ordem temos que:

$$\begin{aligned} \hat{y} = 2,58 + 0,30x_1 - 0,19x_2 - 0,24x_3 + 0,029x_1x_2 - 0,072x_1x_3 + 0,072x_2x_3 \\ + 0,068x_1^2 + 0,068x_2^2 + 0,084x_3^2 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Para obter o modelo em função dos fatores de entrada utiliza-se a Equação (3.2), assim:

$$\begin{aligned} \hat{y} = 2,583 + 0,298 [(\xi_1 - 7,5) / 0,5] - 0,193 [(\xi_2 - 23,5) / 0,5] - 0,243 (\xi_3 - 10) \\ + 0,029 [(\xi_1 - 7,5) / 0,5] [(\xi_2 - 23,5) / 0,5] - 0,072 [(\xi_1 - 7,5) / 0,5] (\xi_3 - 10) \\ + 0,072 [(\xi_2 - 23,5) / 0,5] (\xi_3 - 10) + 0,069 \{0,31 [(\xi_1 - 7,5) / 0,5]\}^2 \\ 0,069 \{[(\xi_2 - 23,5) / 0,5]\}^2 + 0,084 [(\xi_3 - 10)]^2 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

onde: \hat{y} é a altura do cordão (Y_H), ξ_1 é o valor da velocidade do arame (V_a), ξ_2 é o valor da tensão (T_s) e ξ_3 é o valor de velocidade de soldagem (V_s). Simplificando, tem-se:

$$\begin{aligned} Y_H = 228,566 - 4,818V_a - 15,598T_s - 4,225V_s + 0,116V_a * T_s - 0,144V_a * V_s + 0,144T_s * V_s \\ + 0,275V_a^2 + 0,275T_s^2 + 0,084V_s^2 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

assim, a Equação (A.3) é o modelo final da altura do cordão expressado nos parâmetros de soldagem. A seguir a Tabela (A.2) registra os resíduos encontrados em cada ponto de trabalho do modelo e a Figura A.1 apresenta o gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

Tabela A.2. Resíduos para o modelo da altura do cordão

Ensaio	Velocidade do arame (m/min)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Altura do cordão (mm)		
				Valor medido	Resposta do modelo	Resíduos
1	7	23	9	3,014	2,972	0,042
2	8	23	9	3,692	3,652	0,039
3	7	24	9	2,336	2,384	-0,048
4	8	24	9	3,201	3,181	0,020
5	7	23	11	2,538	2,486	0,052
6	8	23	11	2,999	2,879	0,120
7	7	24	11	2,219	2,186	0,033
8	8	24	11	2,725	2,695	0,030
9	6,659	23,5	10	2,264	2,276	-0,013
10	8,341	23,5	10	3,187	3,278	-0,091
11	7,5	22,659	10	2,985	3,102	-0,117
12	7,5	24,341	10	2,466	2,453	0,013
13	7,5	23,5	8,318	3,231	3,229	0,02
14	7,5	23,5	11,682	2,307	2,413	-0,105
15	7,5	23,5	10	2,613	2,583	0,030
16	7,5	23,5	10	2,553	2,583	-0,030
17	7,5	23,5	10	2,533	2,583	-0,050
18	7,5	23,5	10	2,673	2,583	0,090
19	7,5	23,5	10	2,593	2,583	0,010
20	7,5	23,5	10	2,553	2,583	-0,030

A Figura A.1 mostra que os resíduos são distribuídos ao longo da linha reta que forma a distribuição normal. Com a finalidade de calcular o comportamento do modelo se faz uso das equações (2.11), (2.12), (2.13), (2.15) e (2.16) que calculam o desvio padrão (σ) e o coeficiente de determinação múltipla ajustado (R^2), assim:

$$\sigma = \sqrt{\frac{SQE}{n - (k + 1)}} = 0,085 \quad (\text{A.4})$$

, onde $SQE = 0,0718$, $SQT = 2,8810$, $n = 20$ e $k = 9$

$$R^2_{ajustado} = 1 - \left[\frac{n - 1}{n - (k + 1)} \cdot \frac{SQE}{SQT} \right] = 0,9526 \quad (\text{A.5})$$

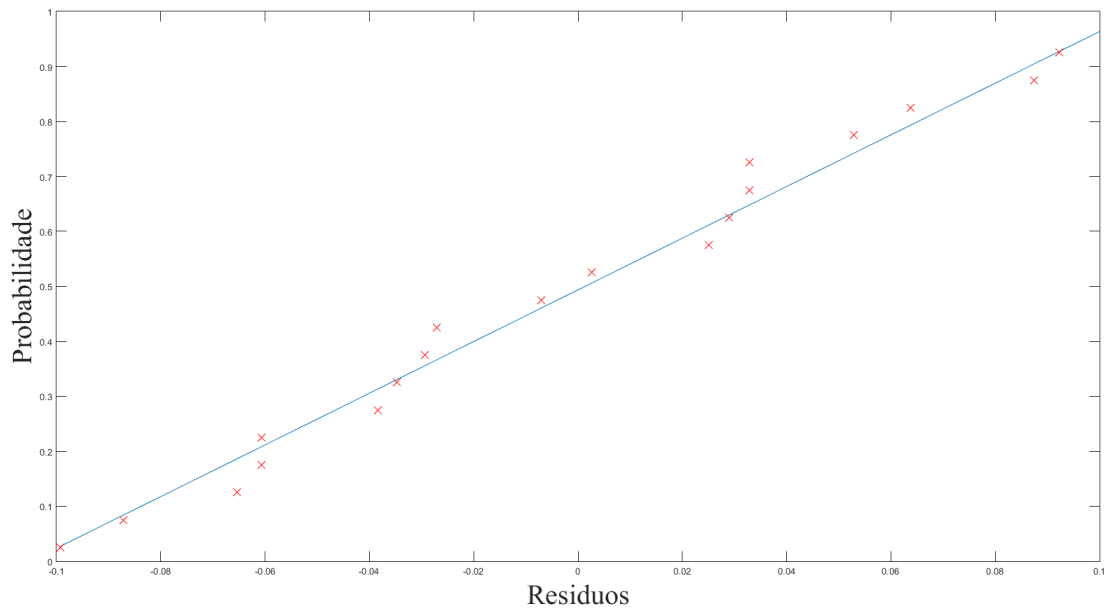


Figura A.1. Probabilidade normal VS Resíduos para altura do cordão

Isto indica que o modelo consegue explicar 95,26% da variação apresentada nos valores medidos. O gráfico da Figura A.2, traçado a partir da equação levantada, apresenta uma vista da superfície de resposta do modelo em função dos fatores de entrada, da tensão e da velocidade de arame.

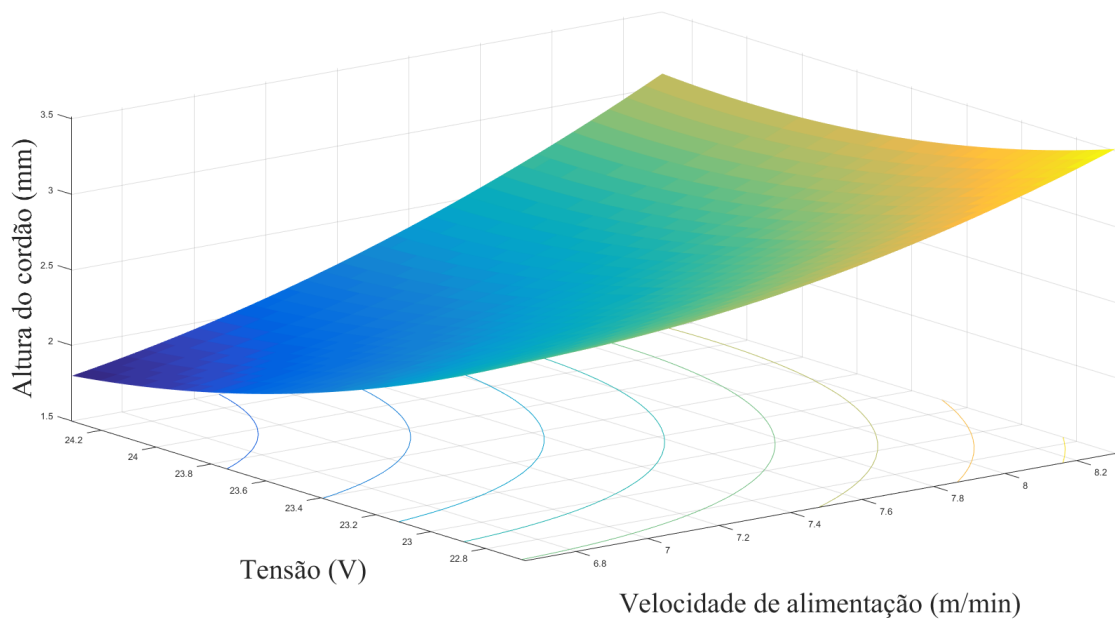


Figura A.2. Superfície de resposta do modelo da altura do cordão

A Figura A.2 evidencia a tendência da altura de reduzir a medida em que diminui a velocidade de arame e a tensão aumenta.

A.2 MODELO DA LARGURA DO CORDÃO

A partir da metodologia utilizada para encontrar o modelo da altura do cordão é possível encontrar o modelo da largura do cordão, neste caso o modelo em função dos níveis codificados é dado por:

$$\hat{y} = 7,426 + 0,492x_1 - 0,825x_2 - 0,966x_3 + 0,090x_1x_2 - 0,054x_1x_3 - 0,182x_2x_3 - 0,058x_1^2 - 0,156x_2^2 + 0,083x_3^2 \quad (\text{A.6})$$

Mudando novamente os níveis codificados pelos valores correspondentes, o modelo da largura do cordão em função dos fatores de entrada é:

$$Y_W = -408,070 - 2,936V_a + 31,875T_s + 6,744V_s + 0,360V_a * T_s - 0,107V_a * V_s - 0,365T_s * V_s - 0,231V_a^2 - 0,623T_s^2 + 0,083V_s^2 \quad (\text{A.7})$$

A Tabela (A.3) referência aos resíduos encontrados para cada ponto de trabalho e a Figura A.3 apresenta a distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

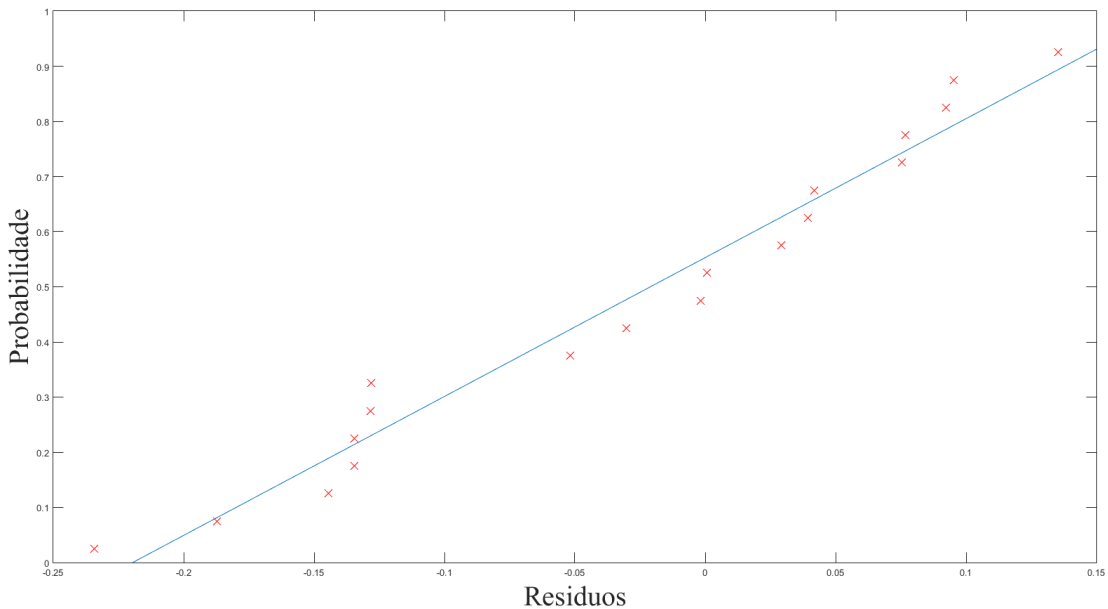


Figura A.3. Probabilidade normal VS Resíduos para a largura do cordão

Novamente o gráfico de probabilidade normal possibilita observar uma boa aproximação do modelo em relação aos dados medidos dos experimentos com um erro distribuído de maneira aleatória e uniforme ao redor das respostas.

Tabela A.3. Resíduos para o modelo da largura do cordão

Ensaio	Velocidade do arame (m/min)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Altura do cordão (mm)		
				Valor medido	Resposta do modelo	Resíduos
1	7	23	9	6,691	6,799	-0,107
2	8	23	9	7,587	7,710	-0,124
3	7	24	9	8,526	8,634	-0,107
4	8	24	9	9,526	9,905	-0,379
5	7	23	11	5,606	5,339	0,267
6	8	23	11	6,031	6,036	-0,005
7	7	24	11	6,456	6,445	0,012
8	8	24	11	7,497	7,502	-0,005
9	6,659	23,5	10	6,345	6,435	-0,091
10	8,341	23,5	10	8,341	8,091	0,250
11	7,5	22,659	10	5,528	5,598	-0,070
12	7,5	24,341	10	8,605	8,374	0,231
13	7,5	23,5	8,318	9,657	9,286	0,371
14	7,5	23,5	11,682	5,824	6,037	-0,213
15	7,5	23,5	10	7,257	7,426	-0,169
16	7,5	23,5	10	7,596	7,426	0,170
17	7,5	23,5	10	7,491	7,426	0,065
18	7,5	23,5	10	7,643	7,426	0,217
19	7,5	23,5	10	7,201	7,426	-0,225
20	7,5	23,5	10	7,343	7,426	-0,084

A partir do procedimento anterior, calcula-se o desvio padrão (σ) do modelo como:

$$\sigma = 0.271 \quad (\text{A.8})$$

, o coeficiente de determinação múltipla ajustado é:

$$R_{ajustado}^2 = 0,9484 \quad (\text{A.9})$$

Este valor de coeficiente de determinação é considerado satisfatório para obtenção de um modelo válido e útil para fins preditivos, como mostrou a Figura A.3.

A Figura A.4 mostra uma vista da superfície de resposta em função da velocidade de alimen-

tação do arame e da tensão respectivamente. Neste caso, pode-se ver como a largura do cordão aumenta com os fatores de entrada.

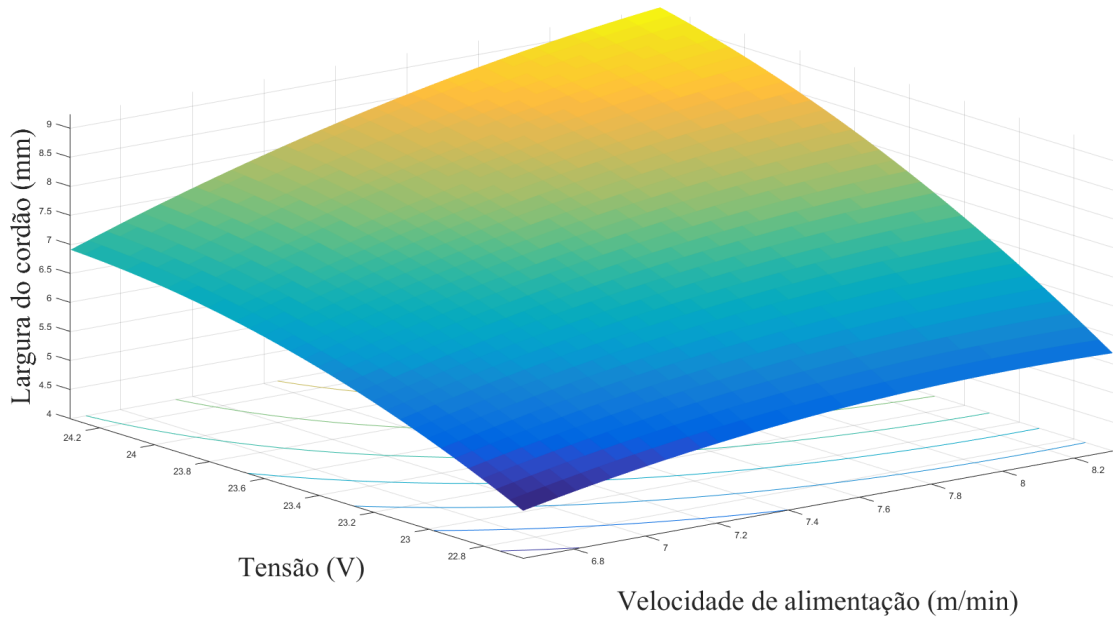


Figura A.4. Superfície de resposta do modelo da largura do cordão

A.3 MODELO MATEMÁTICO REDUZIDO

Após a determinação dos coeficientes da regressão, foram levantados através da análise de variância, a probabilidade P (P-value), onde a mesma é verificada através da comparação com o fator F para 9 graus de liberdade e 95% de nível de significância. Vale ressaltar que, para a adequação do modelo a um nível de significância de 95%, o valor de P-value deve ser menor do que $P_{95\%} = 0,05$. Os valores para cada modelo do experimento em análise podem ser verificados na Tabela (A.4).

Tabela A.4. Valores obtidos significância da regressão para adequação do modelo matemático

Modelo	Causas de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	P-value
Altura do cordão	Regressão	2,8093	9	0,3121	43,4728	0,000
	Resíduo	0,0718	10	0,0072	-	-
	Total	2,8811	19	-	-	-
Largura do cordão	Regressão	26,2094	9	2,9122	39,7779	0,000
	Resíduo	0,7321	10	0,0732	-	-
	Total	26,9415	19	-	-	-

Observa-se que os modelos são adequados para um nível de significância de 95%. Todavia, deve-se verificar ainda a adequação dos modelos reduzidos. A próxima fase de análise foi o teste de significância dos coeficientes. Os resultados dos testes podem ser vistos na Tabela (A.5).

Tabela A.5. Significância (P) dos coeficientes dos modelos completos

Coeficiente	Termo	Significância P-value	
		H (mm)	W (mm)
β_1	V_a	0,0000	0,0000
β_2	T	0,0000	0,0000
β_3	V_s	0,0000	0,0000
β_{12}	$V_a * T_s$	0,3558	0,3683
β_{13}	$V_a * V_s$	0,0371	0,5875
β_{23}	$T_s * V_s$	0,0371	0,0838
β_{11}	V_a^2	0,0121	0,4369
β_{22}	T_s^2	0,0121	0,0537
β_{33}	V_s^2	0,0038	0,2719

A probabilidade P-value para os coeficientes, indicada na Tabela A.5, exprime a significância dos coeficientes dentro dos modelos. Quanto menor o valor de P-value, maior a significância do mesmo dentro do modelo, sendo que na Tabela (A.5) os valores em negrito indicam aqueles considerados significativos. Logicamente, mesmo com altos valores para P-value, foram considerados os fatores individuais nos modelos reduzidos em casos de interações significativas.

A partir daí, foi possível a determinação do modelo matemático reduzido, através da eliminação dos coeficientes com menor significância (maior valor para P-value). As Equações Equações (A.10) e (A.11) apresentam os modelos matemáticos reduzidos a partir dos novos coeficientes, isto objetivou a obtenção de um resultado mais preciso.

$$Y_H = 207,057 - 2,058V_a - 14,651T_s - 4,219V_s - 0,144V_aV_s + 0,144T_s * V_s + 0,273V_a^2 + 0,273T_s^2 + 0,084V_s^2 \quad (\text{A.10})$$

$$Y_W = -462,991 + 0,984V_a + 34,936T_s + 7,600V_s - 0,364T_s * V_s - 0,631T_s^2 \quad (\text{A.11})$$

Os novos valores para a probabilidade P-value, (R^2) (ajustado) e desvio padrão (σ) são mostrados na Tabela (A.6). Observa-se que todos os modelos continuam adequados, tendo os valores de P-value ainda diminuídos, o que aumenta a adequação do mesmo. Além disto, os

valores de (R^2) (ajustado) sofreram aumento e os valores para o desvio padrão diminuíam, o que aumenta a confiabilidade do modelamento.

Tabela A.6. Valores de R^2 (ajustado), erros padrão e P-value para os modelos reduzidos

Resposta	R^2 (Ajustado) %	Desvio padrão (σ)	P-value
Altura do cordão	95,29	0,084	0,000
Largura do cordão	95,05	0,26	0,000

Através dos modelos, é possível identificar que os parâmetros velocidade de alimentação de arame (V_a), tensão (T_s), e velocidade de soldagem (V_s) mostram-se significativos e comportam-se de acordo com o esperado na literatura.

B. AJUSTE DA FUNÇÃO

Conforme a seção 3.3.2, foram feitos 3 testes. A seguir encontra-se a Tabela (B.1), com os valores para as dimensões da seção transversal dos cordões de solda (vide Figura B.1) e valor dos resíduos.

Tabela B.1. Teste experimental para o tamanho do cordão

Teste	Va (m/min)	Ts (V)	Vs (mm/s)	Valor medido (mm)		Resposta do modelo (mm)		Resíduos (mm)	
				H	W	H	W	H	W
1	8	23,5	10	2,759	8,187	3,061	7,867	0,302	0,320
2	8	24	11	2,551	7,571	2,788	7,393	0,237	0,178
3	7	23,5	10	2,347	7,673	2,464	6,883	0,117	0,80

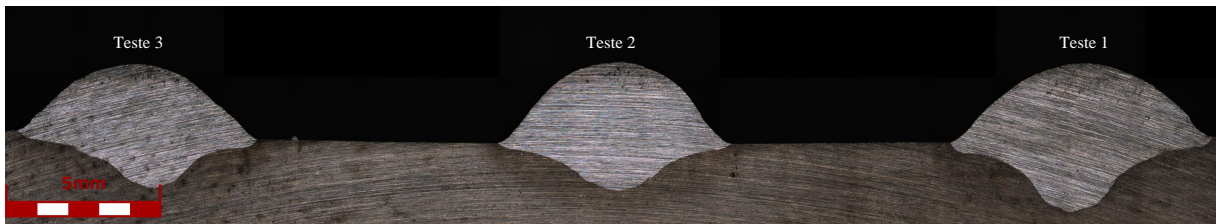


Figura B.1. Macrografia dos três testes

As Figuras B.2 e B.3 mostram o perfil da seção transversal dos cordões de acordo com os testes mostrados na Tabela (B.1) e A Figura B.4 mostra os gráficos experimentais em relação aos valores teóricos com o perfil do cordão, usando as duas funções: função parábola e a função senoidal.

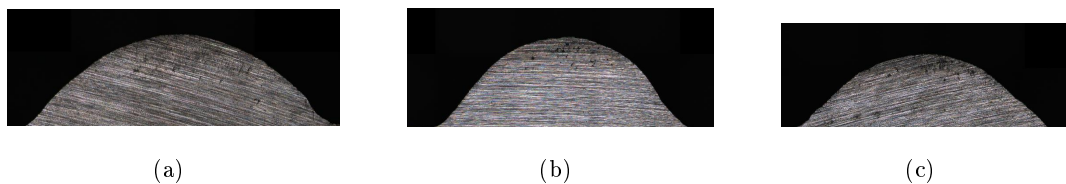


Figura B.2. Imagens macrograficas: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3, respectivamente

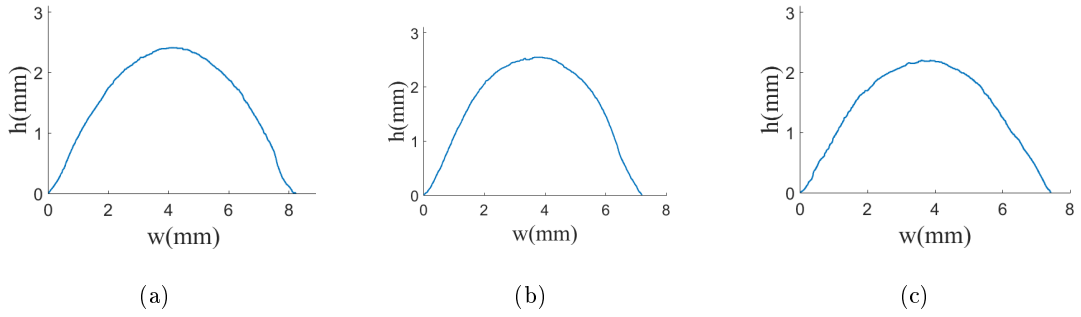


Figura B.3. Perfil da seção transversal dos cordões de solda: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3, respectivamente

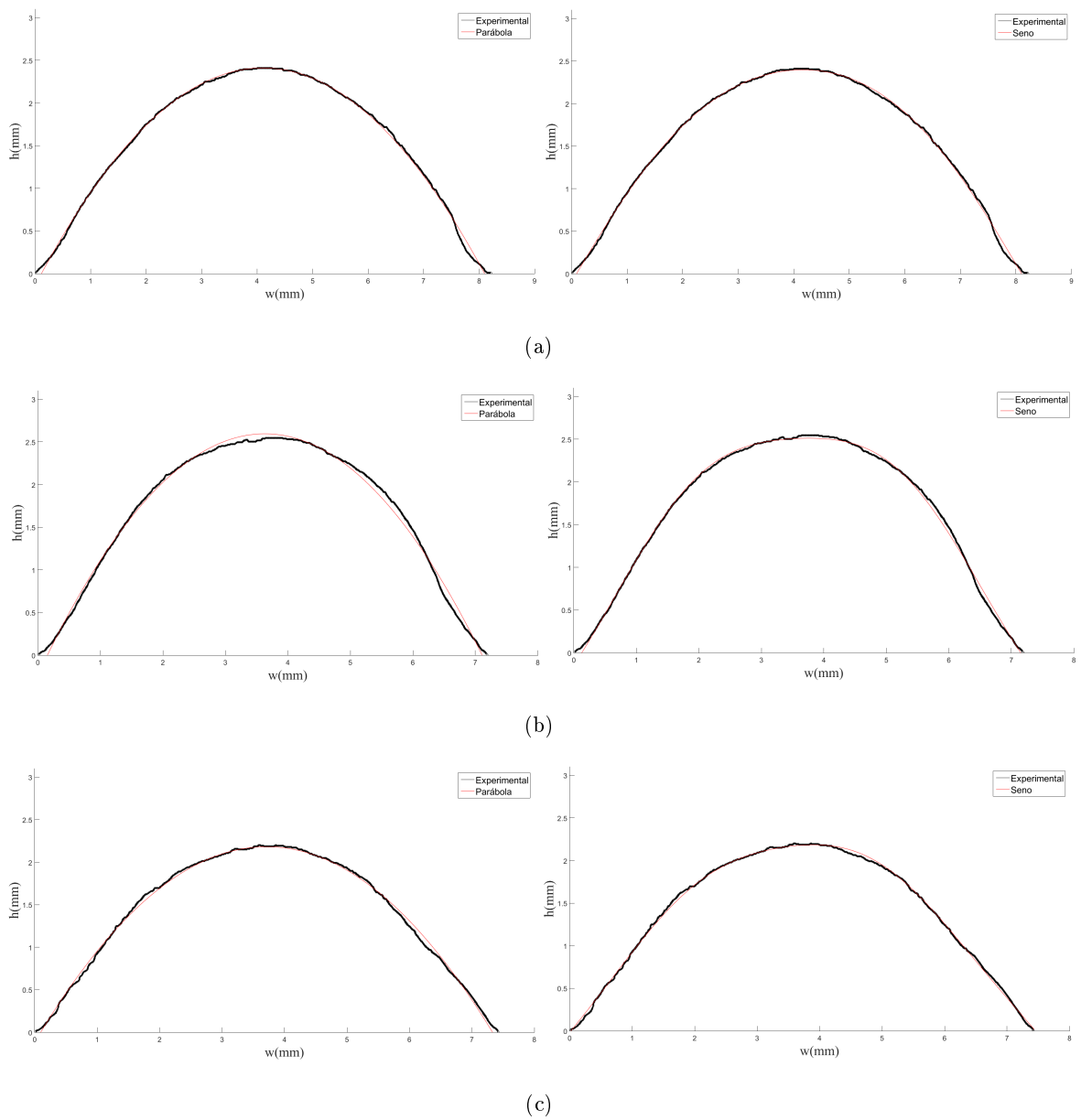


Figura B.4. Ajuste da função ao perfil do cordão: (a) teste 1, (b) teste 2 e (c) teste 3

Realizou-se a análise de resíduos, para verificar a qualidade do ajuste; na determinação do coeficiente de Determinação (R^2), que fornece uma medida da proporção da variação. A Tabela (B.2) apresenta os resultados das duas funções ajustadas, observa-se que estas funções apresentam um coeficiente de determinação alto, sendo que qualquer uma das mesmas pode representar o perfil do cordão, porém a função seno tem maior precisão aos dados experimentais nos três testes.

Tabela B.2. Comparação dos ajustes de curvas nas funções

Teste	Função	Coeficientes curvilíneos			Coeficiente de determinação	Erro padrão
		a	b	c		
1	Parábola	-0,1512	1,242	-0,1386	0,9976	0,0369
	Seno	2,565	6,28	16,41	0,9981	0,0328
2	Parábola	-0,2145	1,557	-0,2313	0,9939	0,0636
	Seno	2,518	6,28	14,62	0,9974	0,0414
3	Parábola	-0,1667	1,238	-0,1171	0,9964	0,0409
	Seno	2,234	6,28	14,83	0,9966	0,0402

C. CÓDIGO ARLA

```
COMMENT Preenchimento Trinca
V=100.0 MAX=1000.0
TCP 1
ROBOT COORD
FRAME 0
COMMENT Reset Weld Start
RESET OUTP 5
COMMENT Pwr Src ErrReset
SET OUTP 6
RESET OUTP 6 DELAY 0.01 S
COMMENT Sel Par Int Mode
LET R 1 = 3
COMMENT CAMADA 1 OFFSET 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=75.63 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
COMMENT INICIO PONTO 1
POS V=10.00% FINE X=1368.00 Y=75.63 Z=1028.00 Q1=0.9648 Q2=-0.2628 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
COMMENT PONTO 2-3
POS V=8.00% FINEC X=1320.95 Y=75.00 Z=1028.00 Q1=0.9648 Q2=-0.2628 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=8.00% CIRCLE X=1295.38 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=0.9648 Q2=0.0000 Q3=0.2628 Q4=0.0000
POS V=8.00% PATH X=1320.95 Y=126.13 Z=1028.00 Q1=0.9648 Q2=0.2628 Q3=0.0000 Q4=0.0000
COMMENT PONTO 3-4
RECT COORD
COMMENT PONTO 4
POS V=8.00% FINE X=1368.00 Y=127.25 Z=1028.00 Q1=0.9648 Q2=0.2628 Q3=0.0000 Q4=0.0000
COMMENT PONTO 5
RESET OUTP 5
COMMENT OFFSET 2
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=120.43 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
```

```

POS V=20.00% FINE X=1368.00 Y=120.43 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
POS V=10.00% FINEC X=1320.95 Y=120.43 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% CIRCLE X=1301.08 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% PATH X=1320.95 Y=80.70 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
POS V=8.00% FINE X=1368.00 Y=80.70 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RESET OUTP 5
COMMENT OFFSET 3
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=84.80 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=20.00% FINE X=1368.00 Y=84.80 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
POS V=10.00% FINEC X=1320.95 Y=84.80 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% CIRCLE X=1305.18 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% PATH X=1320.95 Y=116.13 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
POS V=10.00% FINE X=1368.00 Y=116.13 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RESET OUTP 5
COMMENT OFFSET 4
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=112.23 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=20.00% FINE X=1368.00 Y=112.23 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
POS V=10.00% FINEC X=1320.95 Y=112.23 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% CIRCLE X=1309.28 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% PATH X=1320.95 Y=88.90 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000

```

```

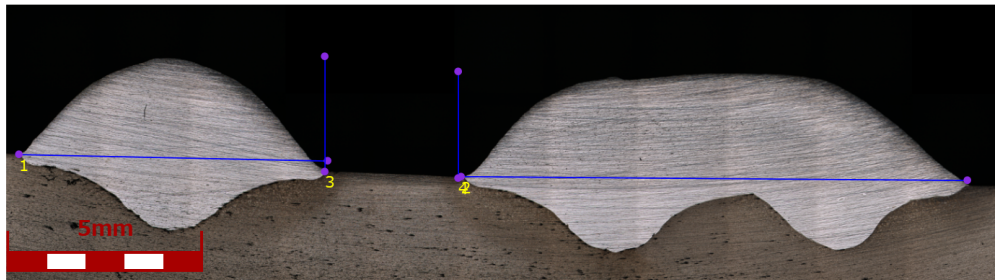
RECT COORD
POS V=10.00% FINE X=1368.00 Y=88.90 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RESET OUTP 5
COMMENT OFFSET 5
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=93.10 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=20.00% FINE X=1368.00 Y=93.10 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
POS V=10.00% FINEC X=1320.95 Y=93.10 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% CIRCLE X=1313.48 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=10.00% PATH X=1320.95 Y=108.03 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
POS V=10.00% FINE X=1368.00 Y=108.03 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RESET OUTP 5
COMMENT OFFSET 6
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=40.00% FINE X=1368.00 Y=103.83 Z=1100.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
TCP 1
WAIT UNTIL INP 5 = 1
TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
POS V=20.00% FINE X=1368.00 Y=103.83 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
COMMENT Ativa com input
WAIT UNTIL INP 5 = 1
SET OUTP 5
WAIT 0.30 S
POS V=7.50% FINEC X=1320.95 Y=103.83 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=14.00% CIRCLE X=1317.68 Y=100.57 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
POS V=14.00% PATH X=1320.95 Y=97.30 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RECT COORD
POS V=7.50% FINE X=1368.00 Y=97.30 Z=1028.00 Q1=1.0000 Q2=0.0000 Q3=0.0000 Q4=0.0000
RESET OUTP 5

```

D. DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DOS CORDÕES

LEXT

Perfil - 36.34%

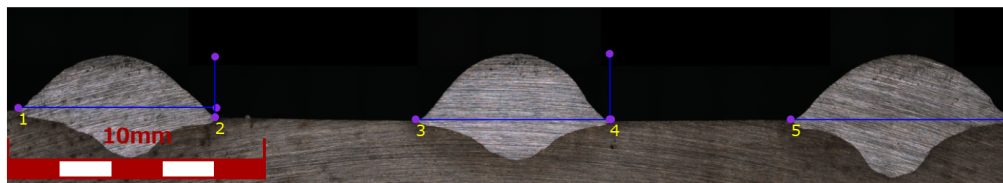


merge_160128_091047
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5412X1509
 Image size[μm]: 25400x7113
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

User ID: ADMIN
 User name: Administrator
 Description: FIRST ADMINISTRATOR
 USER

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	7879.772	merge_160128_091047
<input checked="" type="checkbox"/>	2	12942.843	merge_160128_091047
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2958.696	merge_160128_091047
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2725.990	merge_160128_091047
Count	4	4	
Average		6626.825	-
Min.		2725.990	-
Max.		12942.843	-
Range		10216.853	-
σ		4835.068	-
3σ		14505.204	-
Tolerance	Off	Off	
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

Perfil 02

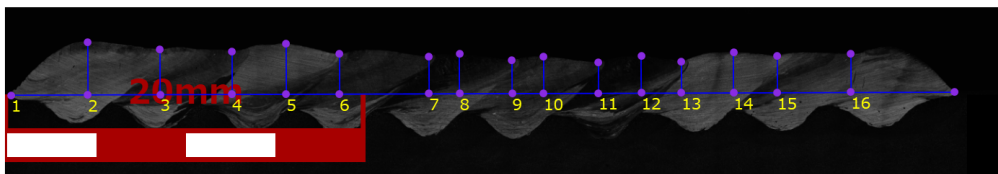


merge_160128_111225
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5376X973
 Image size[μm]: 38994x7088
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

User ID: ADMIN
 User name: Administrator
 Description: FIRST ADMINISTRATOR
 USER

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	7673.168	merge_160128_111225
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2347.610	merge_160128_111225
<input checked="" type="checkbox"/>	3	7571.536	merge_160128_111225
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2551.750	merge_160128_111225
<input checked="" type="checkbox"/>	5	8187.850	merge_160128_111225
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2759.680	merge_160128_111225
Count		6	6
Average		5181.932	-
Min.		2347.610	-
Max.		8187.850	-
Range		5840.240	-
σ		3030.902	-
3σ		9092.706	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

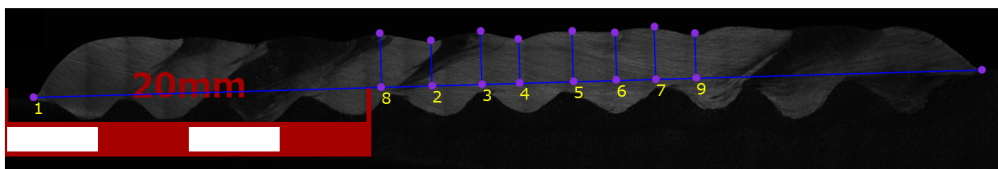
Amostra 01 - 34%



merge_160331_100010
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fine scan + Color
 Image size[pixels]: 5448X928
 Image size[μm]: 55788x9503
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	52443.063	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2937.366	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2514.071	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2388.066	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2798.231	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2234.997	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2074.966	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	8	2202.557	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	9	1844.405	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	10	2023.065	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	11	1705.499	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	12	2066.513	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	13	1731.142	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	14	2244.183	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	15	2020.924	merge_160331_100010
<input checked="" type="checkbox"/>	16	2140.549	merge_160331_100010
Count	16	16	
Average		5335.600	-
Min.		1705.499	-
Max.		52443.063	-
Range		50737.564	-
σ		12566.579	-
3σ		37699.736	-
Tolerance	Off	Off	
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

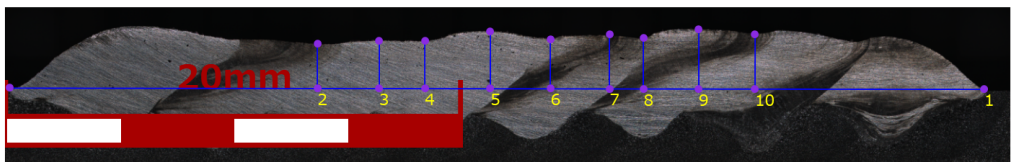
Amostra 02 - 36.34%



merge_160415_093736
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5145X844
 Image size[μm]: 54880x9042
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	51898.346	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2505.645	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2928.523	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2436.932	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	5	2781.723	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2640.721	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	7	2864.989	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	8	2946.413	merge_160415_093736
<input checked="" type="checkbox"/>	9	2440.999	merge_160415_093736
Count		9	9
Average		8160.477	-
Min.		2436.932	-
Max.		51898.346	-
Range		49461.414	-
σ		16402.936	-
3σ		49208.807	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

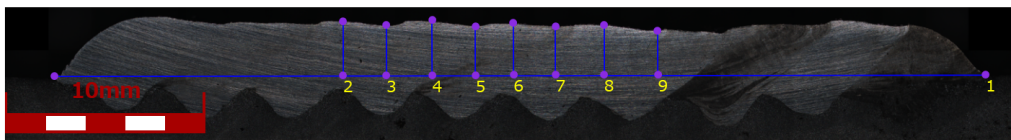
Amostra 03 - 38%



merge_160415_111108
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5152X803
 Image size[μm]: 43964x6882
 Objective lens: MPLFLN5x

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	42625.427	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2674.567	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	3	2793.276	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	4	2795.979	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	5	3202.616	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	6	2860.933	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3094.566	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	8	2923.956	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	9	3329.975	merge_160415_111108
<input checked="" type="checkbox"/>	10	3103.139	merge_160415_111108
Count		10	10
Average		6940.443	-
Min.		2674.567	-
Max.		42625.427	-
Range		39950.860	-
σ		12761.437	-
3σ		38284.310	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

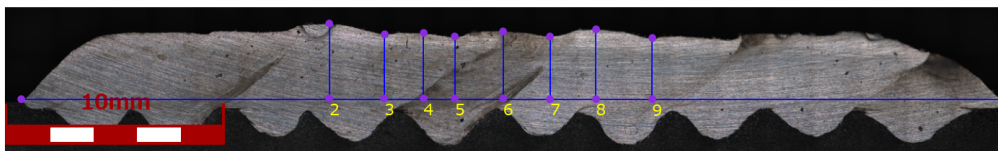
Amostra 04 - 42%



merge_160415_121116
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5135X696
 Image size[μm]: 50391x6860
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	46624.762	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	2	3328.975	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	3	3124.997	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	4	3382.311	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	5	3046.430	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	6	3238.905	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3035.114	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	8	3094.201	merge_160415_121116
<input checked="" type="checkbox"/>	9	2822.788	merge_160415_121116
Count		9	9
Average		7966.498	-
Min.		2822.788	-
Max.		46624.762	-
Range		43801.974	-
σ		14697.813	-
3σ		44093.438	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

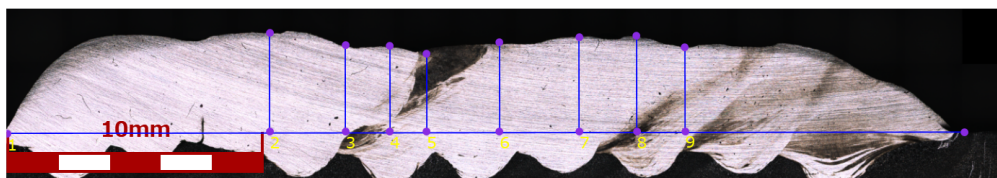
Amostra 05 - 46%



merge_160415_125444
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5107X754
 Image size[μm]: 45759x6785
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	44842.782	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	2	3722.583	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	3	3246.814	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	4	3309.089	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	5	3131.331	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	6	3373.829	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3137.137	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	8	3499.253	merge_160415_125444
<input checked="" type="checkbox"/>	9	3083.452	merge_160415_125444
Count		9	9
Average		7927.363	-
Min.		3083.452	-
Max.		44842.782	-
Range		41759.330	-
σ		13941.416	-
3σ		41824.247	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

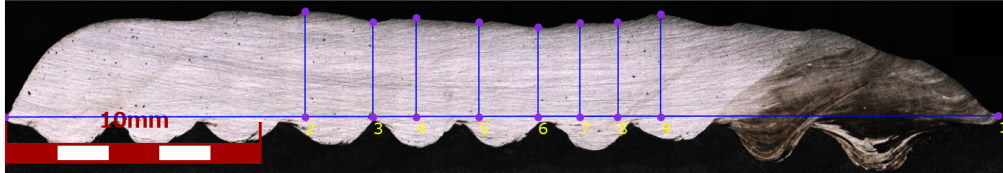
Amostra 06 - 50%



merge_160415_133957
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5096X886
 Image size[μm]: 39137x6834
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	37384.869	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	2	3878.850	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	3	3413.788	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	4	3360.187	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	5	3050.892	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	6	3507.976	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3708.598	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	8	3756.742	merge_160415_133957
<input checked="" type="checkbox"/>	9	3293.150	merge_160415_133957
Count		9	9
Average		7261.672	-
Min.		3050.892	-
Max.		37384.869	-
Range		34333.977	-
σ		11299.100	-
3σ		33897.299	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

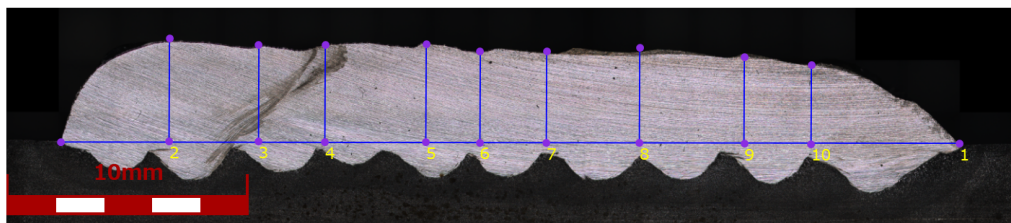
Amostra 07 - 54%



merge_160415_145616
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5102X882
 Image size[μm]: 39183x6803
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	38756.511	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	2	4153.917	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	3	3743.654	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	4	3897.503	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	5	3743.654	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	6	3538.522	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3692.371	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	8	3743.654	merge_160415_145616
<input checked="" type="checkbox"/>	9	4051.351	merge_160415_145616
Count		9	9
Average		7702.349	-
Min.		3538.522	-
Max.		38756.511	-
Range		35217.989	-
σ		11646.835	-
3σ		34940.506	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

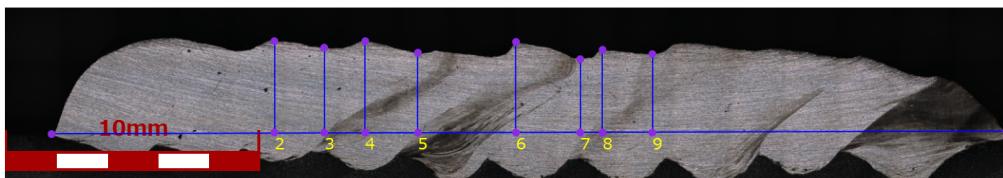
Amostra 08 - 57%



merge_160419_113127
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5131X1113
 Image size[μm]: 41595x9062
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	37185.169	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	2	4266.402	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	3	4010.324	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	4	4022.413	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	5	4095.104	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	6	3778.188	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	7	3790.276	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	8	3970.423	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	9	3608.312	merge_160419_113127
<input checked="" type="checkbox"/>	10	3293.766	merge_160419_113127
Count		10	10
Average		7202.038	-
Min.		3293.766	-
Max.		37185.169	-
Range		33891.403	-
σ		10538.563	-
3σ		31615.690	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

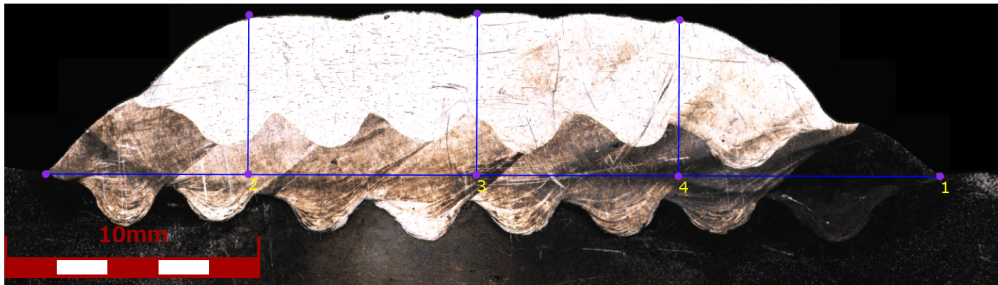
Amostra 09 - 58%



merge_160415_161721
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5152X892
 Image size[μm]: 39567x6880
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	2		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	3		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	4		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	5		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	6		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	7		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	8		merge_160415_161721
<input checked="" type="checkbox"/>	9		merge_160415_161721
Count		9	9
Average		7395.081	-
Min.		3199.988	-
Max.		37537.984	-
Range		34337.996	-
σ		11406.344	-
3σ		34219.032	-
Tolerance		Off	Off
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-

Amostra 10 - 46%



merge_160419_103953
 [Acquisition parameters]
 Scanning mode: XYZ fast scan + Color
 Image size[pixels]: 5111X1453
 Image size[μm]: 39252x11207
 Objective lens: MPLFLN5x
 Zoom: 1x
 DIC: Off

No.	Result	Distance[μm]	File name
<input checked="" type="checkbox"/>	1	35090.853	merge_160419_103953
<input checked="" type="checkbox"/>	2	6262.967	merge_160419_103953
<input checked="" type="checkbox"/>	3	6366.608	merge_160419_103953
<input checked="" type="checkbox"/>	4	6156.040	merge_160419_103953
Count	4	4	
Average		13469.117	-
Min.		6156.040	-
Max.		35090.853	-
Range		28934.812	-
σ		14414.747	-
3σ		43244.240	-
Tolerance	Off	Off	
Upper tolerance		0	-
Standard		0	-
Lower tolerance		0	-