



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM DA FORMA GEOMÉTRICA DE CORDÕES
DE SOLDA UTILIZANDO AJUSTE DE CURVAS PARA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

DÉBORA PEREIRA PINTO

Belo Horizonte, Fevereiro de 2011

DÉBORA PEREIRA PINTO

**MODELAGEM DA FORMA GEOMÉTRICA DE CORDÕES
DE SOLDA UTILIZANDO AJUSTE DE CURVAS PARA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo José Lima II

Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelos esforços em tornar possível os meus estudos e a realização desse trabalho. Ao meu namorado, pelo incentivo e por ter me ajudado a encontrar e trilhar esse novo caminho. Às minhas amigas, amigos da Física e primos pela amizade, momentos de diversão e apoio.

A todos do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) por compartilharem comigo conhecimentos de uma área até então completamente nova para mim, principalmente à Fernanda, Leandro e Wesley, por me ajudarem com a parte experimental e com a preparação das amostras. Agradeço em especial ao Professor Eduardo pelo apoio, incentivo e pela paciência ao transmitir seus conhecimentos.

E agradeço a Deus, por se fazer presente me dando forças para seguir em frente através de todas as pessoas que tornaram possível a conclusão desse trabalho.

A todos, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
RESUMO	12
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 – Processo GMAW	19
2.1.1 – Robotização do Processo GMAW.....	22
2.2 Modelagem Física Aplicada à Soldagem	24
2.2.1 Modelagem Física aplicada à Predição da Geometria de Cordões de Solda.....	26
2.3 Modelagem por Regressão Linear Múltipla.....	28
2.3.1 Abordagem Matricial para Regressão Linear Múltipla	30
2.3.2 Transformações	31
2.3.3 Modelo de Regressão Aplicado à Predição da Geometria de Cordões de Solda	31
2.4 Redes Neurais Artificiais.....	38
2.4.1 Treinamento e Aprendizagem	40
2.4.2 Backpropagation.....	41
2.4.3 Generalização	42
2.4.4 Redes Neurais Artificiais na Predição da Geometria de Cordões de Solda	44
2.5 Lógica Fuzzy	49
2.5.1 Representação Fuzzy do Conhecimento – Variáveis Linguísticas.....	52
2.5.2 Regras e Inferência Fuzzy	53
2.5.3 Aplicação da Lógica Fuzzy na Predição da Geometria de Cordões de Solda.....	54

	5
2.6 - Geometria da Seção do Cordão de Solda	57
2.6.1 – Modelagem Gráfica do Cordão de Solda	61
2.7 – Algoritmos de Otimização.....	63
3. METODOLOGIA.....	66
3.1 Ensaio para obtenção dos cordões de solda.....	66
4. RESULTADOS	69
4.1 Obtenção das bordas dos cordões de solda.....	69
4.2 Algoritmos de ajuste da geometria dos cordões de solda.....	71
4.2.1 Ajuste Parábola.....	72
4.2.2 Ajuste Elipse.....	74
4.2.3 Ajuste por uma Equação de 4° grau	76
4.3 Parametrização da geometria dos cordões de solda	78
4.3.1 Parábola	78
4.3.2 Equação de 4° grau.....	79
4.4 Aplicação das Técnicas de Modelagem	81
4.4.1 Modelo de Regressão Quadrática.....	82
4.4.2 Redes Neurais Artificiais.....	85
4.5 Construção do Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda	87
4.6 Implementação do Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda.....	91
4.6.1 Interface Gráfica – Simulação no Matlab.....	93
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
6. CONCLUSÃO.....	97

7. TRABALHOS FUTUROS	98
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Soldagem GMAW (esquemática)	19
Figura 2.2 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência metálica na soldagem GMAW com gás de proteção a base de Argônio (esquemático).	20
Figura 2.3 – Equipamento para soldagem GMAW	21
Figura 2.5 – Forças que agem durante o processo de soldagem.....	25
Figura 2.6 – Poça líquida bidimensional	26
Figura 2.7 - Parâmetros de qualidade medidos através das imagens dos cordões.	35
Figura 2.8 - Bordas do cordão de solda identificadas pelo algoritmo de Canny.....	36
Figura 2.9 - Escala milimétrica utilizada para medição dos parâmetros de geometria dos cordões.....	36
Figura 2.10 - Componentes básicos de um neurônio biológico.	39
Figura 2.11 - Modelo básico de um neurônio artificial.	39
Figura 2.12 – (a) Dados ajustados adequadamente (boa generalização) (b) Dados ajustados em excesso (generalização pobre)	42
Figura 2.13 – Variação do erro de validação e erro de treinamento em função do número de épocas durante um treinamento. O ponto circulado corresponde ao menor valor do erro de validação.....	44
Figura 2.14 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.	45
Figura 2.15 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.	47
Figura 2.16 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.	48
Figura 2.17 – Diagrama H-E dos conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande”.....	51
Figura 2.18 – Conjunto fuzzy resultante da operação de complementação do “não grande”..	51

Figura 2.19 – Conjunto fuzzy resultante da operação de união “grande OU médio”	52
Figura 2.20 – Conjunto fuzzy resultante da operação de interseção “médio E pequeno”	52
Figura 2.21 – Diagrama típico de um modelo de inferência de Mamdani	54
Figura 2.22 - Tela inicial do <i>Fuzzy Logical Toolbox</i>	56
Figura 2.23 – Representação elíptica do cordão de solda.....	58
Figura 2.24 – Comparação entre os valores reais e a aproximados previstos pelo modelo (semi-elipse e parábola) para a área depositada do cordão de solda.	59
Figura 2.25 – Representação da forma experimental e da aproximação por uma parábola prevista pelo modelo. O quadrado pontilhado corresponde às medidas reais do cordão de solda.....	59
Figura 2.26 - Aproximação da geometria de um cordão de solda por arcos de circunferência.	60
Figura 2.27 – Seção do cordão real (à esquerda) e os elementos que constituem a representação da forma do cordão.	60
Figura 2.28 – (a) Arco de circunferência desenhado utilizando a largura e a altura do cordão de solda. (b) Revolução do arco para formar da seção do cordão de solda.....	61
Figura 2.29 - Exemplos de calotas esféricas obtidas com a variação da razão entre largura e altura.	62
Figura 2.30 – Sobreposição de calotas esféricas formando um cordão de solda.....	62
Figura 2.31 - Modelo gráfico do cordão de solda durante a simulação.....	63
Figura 2.32 – Mínimos e máximos locais e globais em uma função bidimensional.....	65
Figura 3.1 - Sequência de soldagem realizada durante o ensaio.	67
Figura 3.2 - Amostra dos cordões de solda produzidos.....	68
Figura 3.3 - Macrografia de um dos cordões de solda (escala em milímetros).....	68

Figura 4.1 - (a) Imagem do cordão de solda. (b) Bordas do cordão de solda identificadas pelo algoritmo de Canny.	69
Figura 4.2 - Curva representativa da borda do cordão de solda.	69
Figura 4.3 – (a) Exemplo de uma imagem e (b) Matriz binária representando a imagem em preto e branco.	70
Figura 4.7 – Ajuste do cordão de solda por uma parábola.	72
Figura 4.8– Exemplos de ajustes do cordão de solda por uma parábola. (a) Erro = 155,271 pixels. (b) Erro = 111,335 pixels.	73
Figura 4.9 – Ajuste do cordão de solda por uma elipse (Erro = 1138,71 pixels).	74
Figura 4.10 – Melhor ajuste obtido pelo algoritmo de otimização para um mesmo cordão. (a) Sem a utilização de refinamentos sucessivos (Erro = 1665,39 pixels). (b) Com a sua utilização (Erro = 738,873 pixels).	75
Figura 4.11 – Ajuste por uma elipse de um cordão de solda com boa molhabilidade em diferentes escalas (Erro = 16388,4 pixels).	76
Figura 4.12 – Ajuste por uma parábola de um cordão de solda com boa molhabilidade (Erro = 15631,6 pixels).	76
Figura 4.13 – Ajuste de um cordão de solda com boa molhabilidade (pequeno ângulo de contato θ) por uma equação de quarto grau (Erro = 722,476 pixels).	77
Figura 4.14 – Tela do “Curve Fitting Analysis” do Matlab®. As curvas em azul correspondem ao cordão de solda e as curvas em vermelho representam os valores da derivada segunda. ...	78
Figura 4.15 – Representação do cordão de solda por uma parábola.	78
Figura 4.16 – Representação do cordão de solda por uma curva de 4° grau.	80
Figura 4.17. Retas que melhor se ajustam aos dados reais versus previstos pelo Modelo Quadrático para (a) Não-Molhabilidade, (b) Largura e (c) Altura do reforço do cordão de solda.	84
Figura 4.18. Retas que melhor se ajustam aos dados reais versus previstos pelas Redes Neurais para (a) Não-Molhabilidade, (b) Largura e (c) Altura do reforço do cordão de solda.	87

Figura 4.19 – Estrutura do modelo de predição da geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem.	88
Figura 4.20 – Desenho esquemático da rede neural utilizada no Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda.	88
Figura 4.21 – Variação da altura do reforço do cordão em função dos parâmetros de soldagem obtida pela rede neural.....	91
Figura 4.22 – Cordão de solda real (azul) e simulado (vermelho) obtido com 22,0 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 91 mm/s e velocidade de soldagem de 14 mm/s.	92
Figura 4.23 – Cordão de solda real (azul) e simulado (vermelho) obtido com 19,9 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 136 mm/s e velocidade de soldagem de 12 mm/s.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Faixa de valores dos parâmetros de soldagem utilizada na fabricação dos cordões de solda sobre chapa.	67
Tabela 4.1 - Erro médio obtido através do Modelo de Regressão Quadrática para a não-molhabilidade (NM), largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda associados a diferentes combinações de parâmetros de soldagem.	83
Tabela 4.2 - Erro médio obtido através de uma simulação utilizando o Modelo Quadrático para a não-molhabilidade (NM), largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda.	85
Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros de soldagem correspondentes aos 5 cordões de solda utilizados para a simulação da rede neural.	89
Tabela 4.4 – Valores reais e simulados pela rede neural do modelo de predição dos parâmetros geométricos para os 5 cordões de solda.	90

RESUMO

A busca por um método de produção industrial mais sistemático, com melhor controle de qualidade e maior produtividade tem impulsionado o uso de robôs nos mais diversos setores industriais. E a soldagem, como processo de fabricação industrial mais comumente utilizado, também vem passando por um processo de robotização. Porém, para tornar a soldagem robotizada mais eficiente e econômica é necessário reduzir o desperdício de material e o tempo gasto com ensaios destrutivos e não-destrutivos através do desenvolvimento de modelos que simulem os processos de soldagem e sejam capazes de prever com relativa precisão a geometria final do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem. Para isso, é imprescindível que os modelos apresentem alto grau de confiabilidade na predição da geometria dos cordões de solda para permitir que um processo realizado com os parâmetros determinados forneça uma junta com as propriedades mecânicas desejadas. A confiabilidade desejada é obtida com modelos que apresentem grande precisão e, para isso, é necessário saber qual a real forma geométrica do reforço do cordão de solda. Assim, tendo em vista a importância da robotização da soldagem industrial e de sua aplicação de forma eficiente, este trabalho propõe um estudo crítico e comparativo dos modelos de predição da geometria de cordões de solda até então desenvolvidos e propõe um modelo baseado nas melhores técnicas de parametrização e simulação da forma geométrica para predição da geometria de cordões de solda através dos parâmetros de soldagem. O modelo desenvolvido foi baseado em ensaios experimentais realizados em laboratório, utilizando o processo GMAW realizado por robô industrial de 6 graus de liberdade. Foram soldados vários cordões sobre chapa com valores diferentes de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, de modo a comparar a precisão dos resultados de predição obtidos através do modelo e os resultados reais.

Palavras Chaves: Modelagem, Simulação computacional, Gas Metal Arc Welding.

ABSTRACT

The search for a industrial method of production more systematic, with better quality control and increased productivity have driven the use of robots in various industrial sectors. And the welding, as an industrial and manufacturing process commonly used, has also been going through a process of robotics. However, to make the welding robot more efficient and economical it is necessary to reduce material waste and time spent on destructive and non-destructive tests by developing models that simulate the welding process and are able to predict the final geometry of the weld bead from the welding parameters. Therefore, the models should be highly reliable in predicting the weld bead geometry to allow a process carried out with the determined parameters to provide a bead with the desired mechanical properties. The desired reliability is achieved with models that have great accuracy, and for this it is necessary to know the real geometry of the weld bead reinforcement. Thus, considering the importance of the robotic welding and its application in an efficient way, this dissertation proposes a critical and comparative study of models for predicting the weld beads geometry described in the literature and proposes a model based on the best techniques of parameterization and simulation to predict the geometric shape of the weld bead reinforcement through the welding parameters. The model will be based on experimental data obtained in laboratory, using the GMAW process carried out by a six degrees of freedom industrial robot. Various weld beads were made with different values of voltage, wire feed rate and travel speed in order to analyze the prediction accuracy of the model results and actual results.

Key-words: Modelling, Computational simulation, Gas Metal Arc Welding

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união de metais mais importante e comumente utilizado nos setores industriais. Sendo assim, a geometria do cordão de solda é um importante fator na engenharia de projetos e de manufatura em uma indústria de fabricação, pois afeta diretamente a complexidade do plano de soldagem e determina os custos de estruturas de aço e dispositivos mecânicos.

Originalmente, a soldagem a arco era realizada unicamente de forma manual, de modo que a qualidade da solda era totalmente controlada pela habilidade do soldador. Enquanto soldava, ele podia monitorar diretamente a transferência metálica para a poça de fusão e fazer ajustes imediatos nos parâmetros de soldagem para obter uma boa solda. Por esse motivo, a soldagem a arco requer soldadores com experiência significativa, que sejam capazes de selecionar apropriadamente os parâmetros a fim de se obter uma boa solda.

No entanto, o termo “boa solda” é um conceito subjetivo e normalmente é determinado através testes de qualificação de acordo com a aplicação específica. Ensaio destrutivo e não destrutivo são empregados a fim de identificar a microestrutura, comportamento mecânico da junta e geometria do cordão de solda.

A grande preocupação com a qualificação e o uso das normas em soldagem se deve à busca de uma produção uniforme, melhor controle de qualidade e um método mais sistemático de produção. Uma vez que a realização de soldas inadequadas pode resultar em sérios acidentes, com grandes perdas materiais e eventualmente humanas e danos ambientais, é imprescindível que se tenha uma garantia da qualidade da soldagem.

Assim, a normalização da solda e a qualificação dos soldadores são de fundamental importância na realização de uma “boa solda”, ou seja, uma solda que atenda às especificações de determinada aplicação. Porém, o processo de soldagem, e consequentemente as características do cordão de solda, são influenciados por um grande número de parâmetros que afetam sua qualidade e produtividade. Além disso, a relação entre os parâmetros do processo e a geometria do cordão de solda é multivariável devido ao grande número de parâmetros envolvidos.

O uso de sistemas de controle na soldagem a arco pode minimizar o processo de tentativa e erro, baseado na experiência prévia e em julgamentos subjetivos frequentemente empregado pelos soldadores para especificar os parâmetros de soldagem adequados para determinado projeto. Além de se garantir uma repetibilidade no processo de soldagem.

A soldagem robotizada então é definida pela American Welding Society - AWS (Associação Americana de Soldagem) como uma “soldagem com equipamento (robô, manipulador etc.) que executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda.” (Bracarense *et al.*, 2002)

Dentre os vários processos de soldagem existentes, atualmente o processo mais utilizado na soldagem robotizada é o processo de soldagem a arco com eletrodo sólido contínuo sob proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW). Uma das razões para a maior robotização do processo GMAW é o eletrodo sólido contínuo, que permite a mecanização da alimentação do arame.

Para garantir o uso de robôs na indústria de uma forma eficiente e econômica, é importante o desenvolvimento de modelos que simulem os processos de soldagem, como o GMAW, a fim de reduzir o tempo gasto com testes e com ensaios destrutivos e não-destrutivos que permitem a verificação das características do cordão de solda somente após a realização do processo. Os modelos devem apresentar um alto grau de confiabilidade na predição da geometria do cordão de solda a fim de fornecer uma junta com as propriedades mecânicas desejadas.

Para isso, modelos que relacionem os parâmetros do processo de soldagem e o formato do cordão de solda têm sido desenvolvidos. O modelo pode ser físico, baseado em equações de conservação que descrevem os fenômenos físicos envolvidos no processo, ou matemático, que utiliza técnicas de regressão, redes neurais artificiais, lógica Fuzzy ou outros algoritmos de aproximação de funções.

Os modelos desenvolvidos conseguem com certa precisão prever, a partir de determinadas variáveis do processo de soldagem, a geometria do cordão de solda. E alguns modelos utilizam o processo inverso para prever, a partir de uma dada geometria do cordão, os melhores parâmetros de soldagem. Sendo então de fundamental importância no desenvolvimento de um sistema robótico/automatizado de soldagem.

Os modelos físicos desenvolvidos baseiam-se na teoria de fluxo de calor, principalmente nas equações de Rosenthal (Rosenthal, 1941). Nesse caso, as forças que governam o fenômeno da

soldagem, tais como a força eletromagnética, tensão superficial e força gravitacional precisam ser consideradas.

Apesar de possibilitar um fundamental entendimento dos fatores que controlam o processo de soldagem, modelos físicos desenvolvidos para a predição da geometria de cordões de solda não são muito usados na prática. A complexidade das equações aumenta com o número de parâmetros físicos que se deseja considerar, aumentando os custos computacionais e o tempo de processamento da solução, inviabilizando seu uso.

Sendo assim, muitos modelos matemáticos estão sendo desenvolvidos utilizando ensaios experimentais a fim de relacionar as variáveis de soldagem e prever determinados parâmetros da solda em situações reais.

Os procedimentos experimentais consistem em se fazer diversos cordões de solda, variando-se os parâmetros da soldagem, conforme projeto fatorial (Henriques *et al.*, 2006) . Devido ao grande número de parâmetros envolvidos no processo de soldagem, somente alguns são escolhidos na modelagem do cordão de solda, de modo a reduzir sua complexidade. Em cada modelo desenvolvido, podem ser encontrados diferentes parâmetros de entrada e saída, de acordo com o que cada autor considerar mais relevante.

A partir dos parâmetros de entrada, que consistem geralmente dos valores de corrente, tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, dentre outros, e dos parâmetros de saída, que consistem dos valores correspondentes à geometria do cordão de solda, são utilizadas técnicas que buscam a partir de relações matemáticas, desenvolver um modelo capaz de simular um processo de soldagem real.

Os modelos de regressão apresentam precisão razoável visto a simplicidade das equações que relacionam os parâmetros de soldagem à geometria do cordão de solda. Além da possibilidade de se obter, a partir dessas equações, a influência das variáveis de soldagem sobre os parâmetros de qualidade do cordão de solda (Henriques *et al.*, 2006).

Os trabalhos desenvolvidos baseados no modelo neural fornecem maior precisão, mas tem sua complexidade aumentada devido às complexas e desconhecidas relações que se estabelecem entre os nodos da rede neural, cujos parâmetros e topologia precisam ser cuidadosamente ajustados a fim de se obter um melhor resultado. (Chan *et al.*, 1999, Kim *et al.*, 2005, Manikya Kanti *et al.*, 2008)

A Lógica Fuzzy oferece uma alternativa à linguagem puramente matemática que se obtêm nos outros modelos, pois a partir dela é possível extrair as relações entre os parâmetros de soldagem em uma linguagem que possibilite melhor interpretação, fornecendo informações mais facilmente entendidas pelos soldadores.

O modelo criado pode ser então implementado em softwares de simulação robótica para representar a geometria do cordão de solda durante uma simulação de soldagem, tornando-a mais realista.

Assim, o uso de softwares de simulação robótica permite uma análise da viabilidade técnica e econômica da soldagem robotizada, através da determinação do tempo dos ciclos de trabalho do robô. A visualização e otimização dos movimentos realizados pelo manipulador é outra importante aplicação. (Almeida *et al.*, 2007, Lima II *et. al.*, 2008)

O desenvolvimento de modelos cada vez mais capazes de simular com precisão o processo soldagem e a geometria do cordão de solda, implementados em softwares de simulação robótica (Lima II *et. al.*, 2008, Jo *et al.* 2009), também possibilita a criação de ambientes virtuais de treinamento de soldagem (realidade virtual, realidade aumentada etc), reduzindo os custos com testes de soldagem e o tempo com treinamentos.

Dessa forma, as diferentes técnicas empregadas na modelagem da geometria do cordão de solda buscam aliar precisão na predição e menores tempos de processamento e custo computacional, além de tentar obter informações acerca das relações que governam os parâmetros de soldagem.

Este trabalho consiste de 3 partes, cujo objetivo final é simular e modelar a geometria do cordão de solda e implementar o modelo desenvolvido em um software de simulação comercial.

A primeira parte busca fazer uma análise de algumas das técnicas de modelagem e dos modelos para predição da geometria de cordões de solda mais relevantes até então desenvolvidos, a fim de tentar identificar, com base na precisão de seus resultados previstos, sua aplicabilidade. Os modelos escolhidos serão avaliados com base nos valores previstos e nos valores reais da largura e altura do reforço de cordões de solda obtidos através de experimentos realizados em laboratório.

A segunda parte do trabalho consiste de um estudo sobre a real forma da seção do cordão de solda. Alguns trabalhos já foram desenvolvidos a fim de se determinar qual o formato do reforço do cordão de solda. Porém, ainda não há um consenso sobre a real forma de sua seção. Nesses trabalhos (Matsunawa e Ohji, 1982, Chan *et al.* 1999, Lima II *et al.* 2008 e Jo *et al.* 2009), o reforço do cordão de solda foi aproximado por uma parábola, por uma semi-elipse, um arco de circunferência ou ajustado por uma equação matemática, mas apesar de fornecer uma aproximação razoável, nenhum dos modelos corresponde realmente ao formato do reforço.

E por fim a terceira parte deste trabalho faz uma aplicação prática de todo o estudo desenvolvido nas partes anteriores ao implementar um modelo de simulação do cordão de solda que determina e desenha a geometria do cordão de solda baseado nos parâmetros de soldagem fornecidos. Para levantamento desse modelo, foi realizado um ensaio experimental em que foram soldados 125 cordões sobre chapa pelo processo GMAW, com diferentes combinações dos valores de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, com base em um projeto fatorial. Para cada combinação foi feito um cordão de solda, cujos parâmetros da geometria do cordão, largura e altura do reforço, foram medidos a fim de serem aplicados na análise dos modelos de predição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Processo GMAW

O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um processo de soldagem a arco, que emprega eletrodo sólido contínuo sob proteção gasosa. A união das peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos.

No Brasil, o processo é conhecido como MIG (Metal Inert Gas) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (Metal Active Gas) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos (Marques *et al.*, 2007). A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo.

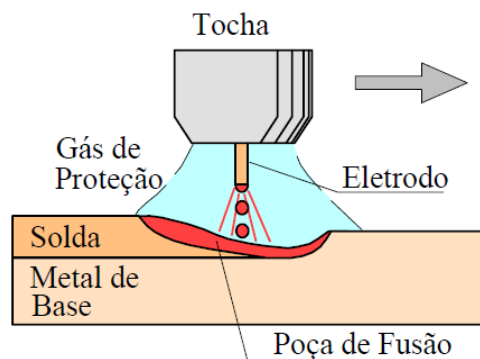


Figura 2.1 – Soldagem GMAW (esquemática)

Fonte: Modenesi e Marques (2006), p.18.

O calor gerado pelo arco elétrico é usado para fundir as peças a serem soldadas e o arame eletrodo, que é transferido para a junta e constitui o metal de adição. O modo de transferência do metal fundido na ponta do eletrodo para a poça de fusão é vital na soldagem GMAW, pois afeta muitas das características do processo, como a estabilidade do arco, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem, e as características do cordão de solda, como o nível de respingos gerados.

De forma geral, pode-se considerar que existem três formas principais de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência por “spray” ou aerossol. O modo de transferência metálica varia de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados (Modenesi, 2001). A Figura 2.2 mostra esquematicamente os campos operacionais das principais formas de transferência metálica na soldagem GMAW com gás de proteção a base de Argônio.

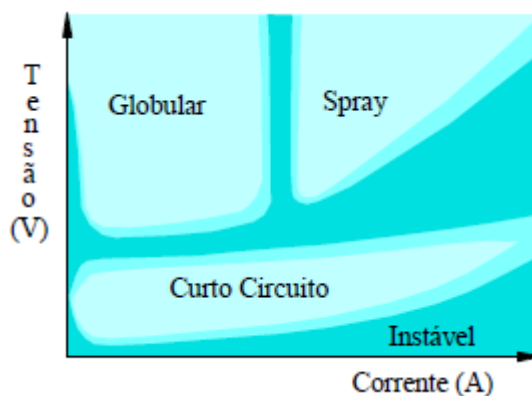


Figura 2.2 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência metálica na soldagem GMAW com gás de proteção a base de Argônio (esquemático).

Fonte: Modenesi (2001), p.25.

A transferência por curto-circuito ocorre quando se utilizam baixos valores de tensão e, em geral, com baixos valores de corrente. Nesta forma de transferência, uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro, até tocar a poça de fusão, ocasionando o curto-circuito e a extinção do arco. Esse modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade do arco, podendo apresentar intensa formação de respingos.

A transferência globular ocorre com valores altos de tensão e baixa corrente. Resulta em um arco mais estável que na transferência por curto circuito, contudo a transferência metálica é mais caótica e imprevisível. Caracteriza-se pela formação, na ponta do eletrodo, de grandes gotas de metal líquido (diâmetro superior ao do eletrodo), que se transferem sob a ação da gravidade para a poça de fusão com uma baixa frequência.

À medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a poça de fusão diminui. Acima de certo nível de corrente, conhecida como “corrente de transição” (I_c), ocorre um aumento no número de gotas e uma redução no seu diâmetro, que passa a ser menor que o diâmetro do eletrodo. Assim, há uma

mudança no modo de transferência, que passa de globular para “spray” ou aerossol, na qual a transferência não é mais controlada pela força da gravidade, passando a ser dominada pela força magnética. As gotas são então lançadas para a poça de fusão independente da posição de soldagem. A transferência metálica por “spray” tende a ser muito estável, com mínimas perturbações no arco, praticamente não há ocorrência de respingos e o cordão obtido é suave e regular.

Os diferentes modos de transferência metálica obtidos no processo GMAW demonstram sua grande sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado, além da necessidade de se ter um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda.

Assim, para se obter cordões que garantam uma junta soldada com as propriedades mecânicas desejadas, são necessários equipamentos capazes de fornecer os parâmetros de soldagem adequados.

O equipamento básico de uma soldagem GMAW convencional consiste de uma fonte de energia regulável de saída tipo tensão constante, tocha de soldagem, fonte de gás e um alimentador de arame regulável de velocidade constante, conforme esquema mostrado na Figura 2.3.

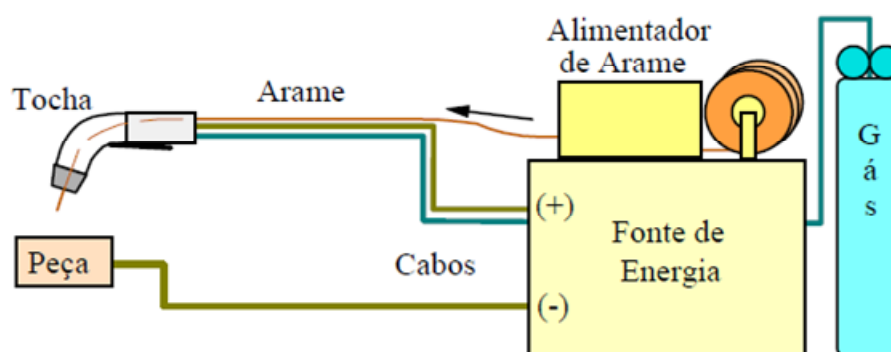


Figura 2.3 – Equipamento para soldagem GMAW

Fonte: Modenesi e Marques (2006), p.19.

Neste tipo de sistema, a tensão e a velocidade de alimentação do arame permanecem aproximadamente constantes durante a operação de soldagem, pois são ajustados

naturalmente através de variações na corrente. Assim, qualquer variação nas condições de soldagem é absorvida principalmente por alterações na corrente, o que possibilita que a soldagem seja realizada com o comprimento do arco relativamente constante. A fácil abertura do arco e seu comprimento constante durante a soldagem são as principais razões da grande popularidade desta forma de operação.

Os benefícios de sua operação aliados a outras vantagens do processo GMAW, como a ampla gama de aplicações e posições de soldagem, altas taxas de deposição, alto fator de ocupação devido ao eletrodo contínuo, quase inexistência de escória e baixos índices de fumo fez desse processo o mais utilizado na soldagem robotizada.

2.1.1 – Robotização do Processo GMAW

Quando uma solda é realizada, deseja-se que as características finais do cordão de solda sejam tais que atendam às exigências das normas de qualificação para determinada junta soldada. Isso é obtido reduzindo erros humanos, através da robotização. O processo GMAW, devido a sua elevada produtividade, sensibilidade dos modos de transferência metálica aos parâmetros de soldagem e principalmente por permitir alimentação mecanizada do arame é um processo com alto grau de robotização no meio industrial.

No processo GMAW robotizado, todas as funções ou passos de uma operação são executados, em sequência, por meios mecânicos e/ou eletrônicos, sem qualquer ajuste feito pelo soldador, exceto uma eventual programação do equipamento. Assim, após a programação de determinada trajetória de soldagem, o robô executa as tarefas de soldagem, que incluem a abertura e manutenção do arco, alimentação do eletrodo consumível, deslocamento da tocha na junta e, por fim, a extinção do arco. A Figura 2.4 apresenta uma célula robótica com configuração básica para soldagem.

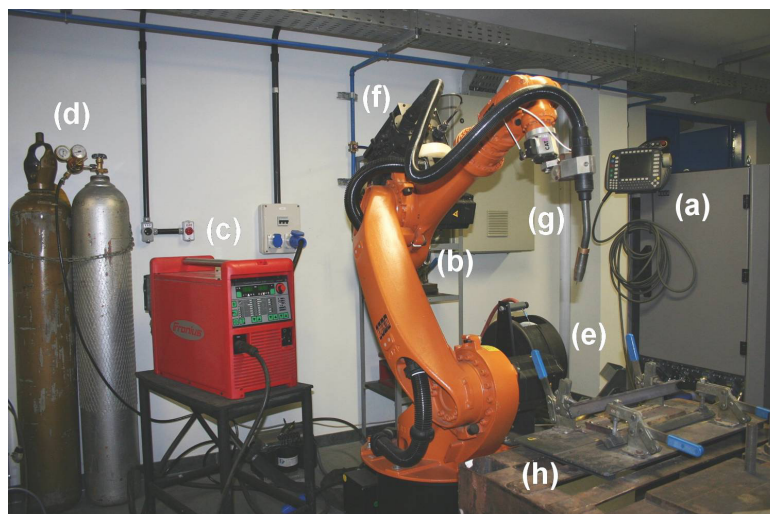


Figura 2.4 – Célula robótica de soldagem. (a) Painel de controle do robô manipulador; (b) Robô manipulador da Soldagem; (c) fonte de soldagem; (d) cilindro de gás; (e) rolo de arame; (f) alimentador de arame; (g) tocha de soldagem e (h) mesa de soldagem com grampos de fixação.

Fonte: Acervo do LRSS.

O objetivo da robotização na soldagem é aumentar a produtividade e garantir uma repetibilidade do processo, melhorando a qualidade e a confiabilidade da junta soldada. Mas para que a aplicação de robôs na indústria seja feita de forma economicamente viável, principalmente na etapa de implantação do processo, é necessário o uso de *softwares* de simulação capazes de simular o processo de soldagem a fim de reduzir o custo e o tempo gasto com testes com o robô e ensaios na junta soldada.

Na robotização de um processo de soldagem em escala industrial, é necessário determinar o tempo dos ciclos de trabalho, através de testes de trajetórias e sequências de fabricação de modo a evitar obstáculos e colisões e otimizar o processo de soldagem. Assim como ajustes nos parâmetros de soldagem e a realização de ensaios destrutivos e não destrutivos nos cordões de solda a fim de verificar se a junta soldada satisfaz as especificações do projeto.

Diversos modelos foram então desenvolvidos utilizando diferentes técnicas a fim de simular os processos de soldagem e poder prever, com base nos parâmetros de soldagem, a geometria do cordão de solda resultante (Almeida *et al.*, 2007, Lima II *et al.*, 2005, 2008, 2009).

Os modelos desenvolvidos, baseados nas relações físicas que governam o processo de soldagem ou em equações matemáticas que buscam descrever as relações entre os parâmetros de soldagem e a geometria final do cordão de solda, constituem então poderosa ferramenta na simulação do processo real de soldagem e serão discutidos nas seções seguintes.

2.2 Modelagem Física Aplicada à Soldagem

As relações entre os parâmetros de soldagem e as dimensões do cordão de solda poderiam ser mais profundamente entendidas com o uso de modelos físicos. Porém, o desenvolvimento desses modelos é desencorajado devido à complexidade de suas equações e o consequente aumento do tempo de processamento e do custo computacional, o que torna seu uso menos aplicável na maioria dos casos práticos.

Porém, apesar de sua aplicação restrita, alguns modelos físicos foram desenvolvidos a fim de se entender as relações existentes em um processo de soldagem. E assim, poder prever a forma e as dimensões do cordão de solda.

Para isso, o modelo físico busca entender as complexas relações entre as propriedades físicas que governam o processo de soldagem considerando as forças envolvidas e a distribuição de calor e seus efeitos durante o processo.

Sabe-se que vários tipos de forças agem durante o processo de soldagem. Tais forças são a força eletromagnética, força de empuxo, força de arraste termodinâmico, forças de termocapilaridade (Marangoni) e força gravitacional (Matsunawa e Ohji, 1982). Essas forças e seu efeito na poça de fusão são mostrados na Figura 2.5.

A força eletromagnética (Lorentz) é resultante da corrente que passa no condutor. Quanto maior a corrente, maior a força eletromagnética, que tende a aprofundar a poça de fusão e consequentemente afinar o cordão de solda.

A força de empuxo é resultante da diferença de densidade do fluido causado pelos gradientes de temperatura. O fluido da região mais quente sobe e o fluido da região mais fria penetra na poça, provocando um fluxo contrário ao fluxo de calor, afinando assim o cordão de solda.

A força de arraste aerodinâmico é produzida pela ação do plasma que flui sobre a superfície da poça, induzindo um fluxo externo ao longo desta, cuja tendência é alargar o cordão de solda.

A força de termocapilaridade ou Marangoni é resultante de uma variação na tensão superficial do fluido causado pelos gradientes de temperatura. Quando a tensão superficial é maior na borda da poça, a convecção Marangoni tende a alargar a poça. Quando a tensão superficial é maior no centro da poça, convecção Marangoni tende a aprofundar a poça, e assim, afinar o cordão.

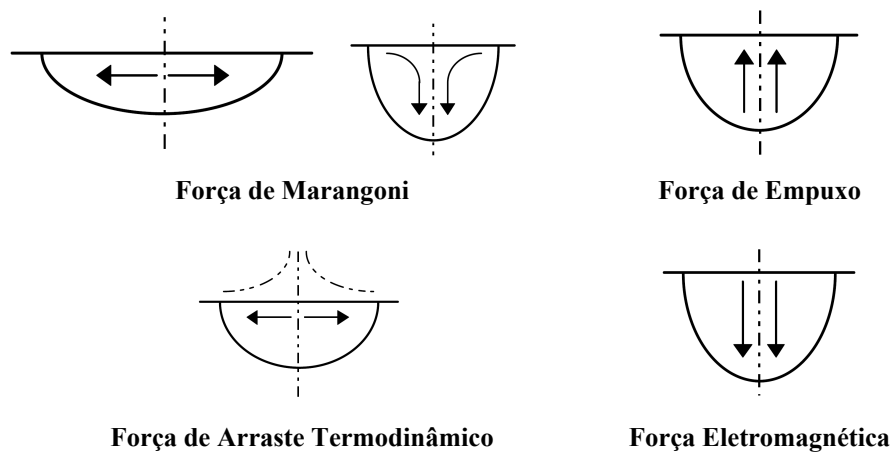


Figura 2.5 – Forças que agem durante o processo de soldagem.

Fonte : Adaptado de Marya e Marya (1998), p.516.

Essas forças que governam o processo de soldagem agem isoladamente ou de maneira combinada, causando influências na transferência metálica, na forma da poça de fusão e nas características do arco elétrico, sendo então fundamentais na definição das características do cordão de solda.

Assim, todas as forças interferem no processo de soldagem, mas com magnitudes diferentes. De tal forma que a mais importante é a força de termocapilaridade (Marangoni), seguida das forças eletromagnética, de arraste termodinâmico e por fim do empuxo.

O maior efeito da força de Marangoni na soldagem pode ser explicado com base no alto valor da tensão superficial do metal fundido na poça e pelo pequeno tamanho da zona fundida (Matsunawa e Ohji, 1982).

Assim, devido a sua maior magnitude e forte dependência com a temperatura, a força de Marangoni é a principal base dos modelos físicos desenvolvidos para predição do cordão de solda, que buscam associar o modelo de fluxo de calor atuante durante a soldagem com as variações da tensão superficial do metal fundido, de modo a prever a geometria final do cordão (Matsunawa e Ohji, 1982; Marya e Marya, 1998).

2.2.1 Modelagem Física aplicada à Predição da Geometria de Cordões de Solda

Matsunawa e Ohji (1982) desenvolveram uma aproximação matemática para determinar o perfil da poça líquida com base nos conceitos de tensão superficial, e assim aplicá-la a cordões de solda reais.

Os autores supõem uma poça líquida bidimensional de forma elíptica, como mostrado na Figura 2.6 e, assumindo a tensão superficial constante sobre toda a superfície, desenvolvem equações para largura, altura do reforço e volume do metal líquido em função do ângulo de contato do cordão de solda com a superfície.

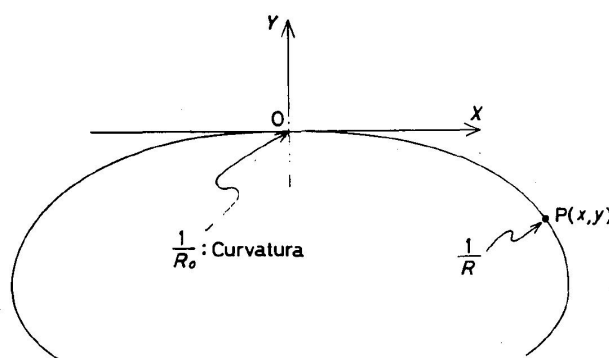


Figura 2.6 – Poça líquida bidimensional

Fonte: Adaptado de Matsunawa e Ohji (1982), p.149.

Como resultado, foi experimentalmente confirmado que a superfície do cordão real solidificado reflete o perfil calculado para metal líquido para uma ampla faixa de condições de soldagem, exceto para condições de corrente e velocidade de soldagem altas.

Porém, a desvantagem desse modelo consiste na suposição de que a forma do cordão é elíptica e, além disso, é necessário conhecer sua forma exata além do ângulo de contato, já que as equações para altura e largura dependem da curvatura do cordão.

Isso pode ser uma provável razão para o modelo não se aplicar em situações de corrente e velocidade de soldagem altas, típicas de processos robotizados, pois nessas condições extremas o cordão de solda pode não assumir um formato elíptico. Além disso, não se sabe quais as faixas de valores da corrente, tensão e velocidade de soldagem utilizados durante o procedimento experimental, pois esses valores não foram bem esclarecidos pelos autores.

É importante ressaltar também que a soldagem foi realizada manualmente, de modo que os parâmetros que normalmente são considerados constantes durante uma soldagem robotizada, como stickout, ângulo de soldagem e vazão de gás, provavelmente não permaneceram constantes durante a soldagem manual.

Marya e Marya (1998) apresentam uma modelagem física para predição de instabilidades na penetração do cordão de solda com base na teoria de fluxo de calor e sua influência na tensão superficial da poça fundida. O processo de soldagem estudado é o GTAW e, portanto, nesse modelo o reforço do cordão de solda não é considerado. Porém, são feitas considerações importantes acerca da relação entre os parâmetros de soldagem – espessura da chapa, potência e velocidade de soldagem - e as dimensões do cordão de solda - largura (W_f), espessura (D), largura da raiz (W_b), e penetração da solda (Z_m).

Do ponto de vista prático, um cordão de solda com grandes variações dimensionais é inaceitável, pois leva a propriedades mecânicas não uniformes ao longo da junta soldada. Para manter uma junta uniforme, as dimensões do cordão de solda, tais como penetração, largura do reforço, largura da raiz da solda (para completa penetração) devem ser mantidas constantes. Tal regularidade algumas vezes é difícil de ser atingida, especialmente próximo a completa penetração da junta, onde mudanças significativas de forma e variações dimensionais são comumente observadas. Os autores em Marya e Marya (1998) afirmam então que variações no aporte térmico da peça soldada pode ser a origem das mudanças inesperadas na geometria do cordão de solda.

Assim, os autores sugerem que as variações na geometria de cordões de solda resultam de mudanças do regime de fluxo de calor, que pode ser originado de 3 causas distintas:

- 1) Variações na intensidade da fonte de calor, possivelmente resultante de alterações inesperadas no comprimento do arco elétrico ou no aporte térmico.
- 2) Mudanças geométricas que promovem bordas ou espessuras irregulares e perturbam o estado quasi-estático do fluxo de calor.

3) A presença de outros elementos secundários na poça de fusão.

O fluxo de calor em um processo de soldagem de cordões sobre chapa é controlado pelos parâmetros de soldagem (potência e velocidade de soldagem) e pelas propriedades físicas e dimensões da chapa utilizada, especialmente a espessura. São esses aspectos que irão determinar se o modelo de fluxo de calor é bi ou tridimensional.

Considerando então o modelo de fluxo de calor para uma dada situação de soldagem foi possível prever variações nas dimensões da penetração do cordão de solda, pois suas características são fortemente influenciadas pela distribuição de calor na chapa.

Apesar de possibilitar um melhor entendimento sobre as relações que governam o processo de soldagem, o modelo físico não é viável na prática. Muitos dos parâmetros considerados no modelo não são mensuráveis nas situações comuns, como a tensão superficial e a densidade do metal líquido, que tem forte dependência com a temperatura e a curvatura da poça líquida, que devem ser medidos durante o processo de soldagem.

As dificuldades inerentes ao processo de medição dos parâmetros considerados no modelo físico, juntamente com as incertezas associadas às medidas, resultam em um modelo complexo e pouco preciso e que não atende às necessidades práticas da soldagem robotizada.

Modelos matemáticos que considerem como parâmetros de entrada as variáveis mensuráveis do processo de soldagem e que consigam obter uma melhor precisão são mais indicados para prever a relação entre a geometria do cordão e os parâmetros de soldagem, como a Modelagem por Regressão Linear Múltipla.

2.3 Modelagem por Regressão Linear Múltipla

Muitos problemas em engenharia e ciências envolvem explorar as relações entre duas ou mais variáveis. A Análise de regressão é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis (Montgomery e Runger, 2009).

A análise de regressão pode ser usada para construir um modelo para prever o comportamento de determinado parâmetro em relação às variáveis das quais ele depende. Quando não se tem o conhecimento teórico das relações entre as variáveis, o desenvolvimento do modelo é baseado nos dados obtidos de forma experimental e, por isso, o modelo de regressão pode ser entendido como um modelo empírico.

Muitas aplicações da análise de regressão envolvem situações em que determinado parâmetro depende de duas ou mais variáveis. Em geral, a variável dependente ou de resposta, Y , pode estar relacionada à n variáveis independentes ou regressoras, x . O modelo então é chamado de modelo de regressão múltipla com n variáveis regressoras e é representado matematicamente pela equação (1):

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n + \epsilon \quad (1)$$

O parâmetro ϵ é um termo de erro aleatório. Os parâmetros a_j , $j = 0, 1, \dots, n$, são chamados coeficientes de regressão e normalmente são estimados através do método dos mínimos quadrados simples.

O método dos mínimos quadrados consiste em se minimizar o quadrado do termo do erro aleatório. Sejam k observações, tal que $k > n$ e seja x_{ij} a i -ésima observação ou nível da variável x_j . Cada observação $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, y_i)$ satisfaz o modelo da equação (1) ou

$$y_i = a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \cdots + a_nx_{in} + \epsilon_i \quad (2)$$

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

A função dos mínimos quadrados a ser minimizada então é

$$L = \sum_{i=1}^k \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^k \left(y_i - a_0 - \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \right)^2 \quad (3)$$

Uma importante classe dos modelos de regressão múltipla são os modelos de regressão polinomial, que são largamente utilizados quando a resposta for curvilínea. Os modelos podem ser representados, por exemplo, por um polinômio de segundo grau em uma variável

$$Y = a_0 + a_1x + a_{11}x^2 + \epsilon \quad (4)$$

ou por um polinômio de segundo grau em duas variáveis

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2 + \epsilon \quad (5)$$

Apesar de o modelo ser ajustado por equações diferentes, o cálculo para determinação dos coeficientes de correlação é idêntico tanto para equações lineares do tipo (1), quanto para as equações polinomiais de (4) e (5).

2.3.1 Abordagem Matricial para Regressão Linear Múltipla

Normalmente é mais conveniente representar as operações matemáticas do modelo de regressão múltipla de forma matricial. Sejam n variáveis independentes e k observações, $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$, e que o modelo que relaciona as variáveis independentes à resposta seja como na equação (2):

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + \dots + a_n x_{in} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Esse modelo é um sistema de k equações, que pode ser expresso em notação matricial como

$$Y = AX + \epsilon \quad (6)$$

sendo

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_k \end{bmatrix}$$

Em geral, Y é um vetor ($k \times 1$) das observações, X é uma matriz ($k \times p$) dos níveis das variáveis independentes, A é um vetor ($p \times 1$) dos coeficientes de regressão e ϵ é um vetor ($k \times 1$) dos erros aleatórios.

O método dos mínimos quadrados é então aplicado de forma a minimizar L :

$$L = \sum_{i=1}^k \epsilon_i^2 = \epsilon^T \epsilon = (Y - AX)^T (Y - AX) \quad (7)$$

L é minimizado fazendo-se

$$\frac{\partial L}{\partial A} = 0 \quad (8)$$

Os detalhes da obtenção das derivadas serão omitidos.

Resolvendo-se as equações resultantes de (6), obtêm-se a seguinte relação:

$$A^T = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

A partir dessa equação é possível então calcular os coeficientes de regressão (a_1, a_2, \dots, a_n) que relaciona as variáveis independentes ($x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_i$), $i = 1, 2, \dots, k$, à variável de resposta Y .

2.3.2 Transformações

Quando a função verdadeira que relaciona as variáveis independentes e a variável de resposta é não-linear, o modelo de regressão da linha reta $Y = a_0 + a_1 x + \epsilon$ não é apropriado para descrever a relação. A não-linearidade do modelo normalmente é visualmente determinada a partir do diagrama de dispersão, através de experiências anteriores ou da análise da teoria em questão. E assim o diagrama de dispersão exibirá uma relação não linear entre Y e x .

Em algumas dessas situações, uma função não-linear pode ser expressa como uma linha reta, usando uma transformação adequada. Tais modelos não lineares são chamados de intrinsecamente lineares (Montgomery e Runger, 2009).

A função exponencial (8) é um exemplo de modelo não-linear, mas intrinsecamente linear, pois pode ser transformada em uma linha reta (9) através de uma transformação logarítmica.

$$Y = a_0 e^{a_1 x} + \epsilon \quad (10)$$

Aplicando-se o logaritmo natural nos dois lados da Equação (8)

$$\ln Y = \ln a_0 + a_1 x + \ln \epsilon \quad (11)$$

Assim, as transformações são muito aplicáveis quando a verdadeira relação entre Y e x não é bem aproximada por uma linha reta.

2.3.3 Modelo de Regressão Aplicado à Predição da Geometria de Cordões de Solda

Modelos de regressão linear múltipla são frequentemente usados como funções de aproximações. Isto é, a verdadeira relação funcional entre Y e x_1, x_2, \dots, x_n é desconhecida,

porém em certas faixas das variáveis independentes, o modelo de regressão linear é uma aproximação adequada (Montgomery e Runger, 2009).

A geometria do cordão de solda é influenciada por um grande número de parâmetros de soldagem, mas apesar da verdadeira relação entre esses parâmetros não ser bem estabelecida, essa relação pode ser escrita através do método de regressão linear.

Kim *et al.* (1996, 2001) desenvolvem um modelo, baseado nas técnicas de regressão múltipla, a fim de determinar uma relação matemática entre parâmetros de soldagem e a geometria do cordão de solda em um processo GMAW.

Kim *et al.* (1996) representam a geometria do cordão como uma função resposta dependente do diâmetro do arame (D), a tensão (V), corrente (I) e velocidade de soldagem (S):

$$Y = f(D, V, I, S) \quad (12)$$

E supõem uma relação não-linear entre as variáveis ao expressar a equação (10) como:

$$Y = a(D)^b (V)^c (I)^d (S)^e \quad (13)$$

Os coeficientes empíricos a, b, c, d, e são constantes dependentes do fluxo do gás, *stickout* e tipo de material de base e foram determinados através dos métodos de regressão múltipla utilizando 54 dados experimentais.

Assim, através desse modelo foram obtidas equações que correlacionam a largura (W), altura do reforço (H) e penetração (P) do cordão de solda aos os parâmetros do processo de soldagem.

Para avaliar a adequação do modelo, foram aplicadas técnicas de análises de variância.

Já em Kim *et al.*, 2001, o mesmo modelo de regressão múltipla foi utilizado, porém o diâmetro do arame não foi considerado. Os parâmetros da geometria considerados também foram largura (W), altura (H) do reforço e penetração (P) do cordão de solda. Os parâmetros de soldagem escolhidos foram: tensão (V), corrente (I) e velocidade de soldagem (S). A relação entre as variáveis proposta pelos autores foi então determinada segundo a equação (14):

$$Y = b_1 (S)^{b_2} (I)^{b_3} (V)^{b_4} \quad (14)$$

As mesmas análises de variância foram feitas para determinar a adequação do modelo. Nesse caso foram usados apenas 27 dados experimentais para ajustar as equações.

Em ambos os trabalhos, a partir dos resultados obtidos, os autores consideraram o modelo desenvolvido como adequado para a predição da geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem.

Outro modelo baseado na técnica de regressão múltipla foi proposto por Lima II *et al.* (2005, 2008). Os autores utilizam um modelo polinomial de regressão múltipla na determinação da relação entre os parâmetros de qualidade do cordão de solda e as variáveis de soldagem em um processo GMAW.

Nesse modelo, são definidos dois vetores, um vetor de entrada P constituído pelos parâmetros de soldagem, seus respectivos quadrados e um termo independente, e o vetor de saída Q composto pelos parâmetros de qualidade do cordão de solda obtidos experimentalmente.

A escolha dos parâmetros para o vetor de entrada é bastante empírica. De modo geral são testadas diferentes combinações de parâmetros de modo a encontrar o melhor resultado. Já a escolha dos parâmetros do vetor de saída é feita com base nas informações que se deseja obter sobre a geometria do cordão de solda.

Considerando a tensão (V), corrente (I) e velocidade de soldagem (v) como parâmetros de entrada e a largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda como parâmetros do vetor de saída, o modelo quadrático é aplicado na forma:

$$P = [V \quad V^2 \quad I \quad I^2 \quad v \quad v^2 \quad 1] \quad (15)$$

e

$$Q = [W \quad H] \quad (16)$$

e obtêm-se então

$$[W \quad H]^T = A [V \quad V^2 \quad I \quad I^2 \quad v \quad v^2 \quad 1]^T \quad (17)$$

onde

$$W = a_{11}V + a_{12}V^2 + a_{13}I + a_{14}I^2 + a_{15}v + a_{16}v^2 + a_{17} \quad (18)$$

$$H = a_{21}V + a_{22}V^2 + a_{23}I + a_{24}I^2 + a_{25}v + a_{26}v^2 + a_{27} \quad (19)$$

e

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A partir de ensaios experimentais, são definidos os vetores P_{exp} e Q_{exp} , constituído pelos valores medidos dos parâmetros de soldagem e dos parâmetros da geometria do cordão de solda resultante, respectivamente.

$$P_{\text{exp}} = \begin{bmatrix} V_1 & V_1^2 & I_1 & I_1^2 & v_1 & v_1^2 & L_1 & L_1^2 & 1 \\ V_2 & V_2^2 & I_2 & I_2^2 & v_2 & v_2^2 & L_2 & L_2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_n & V_n^2 & I_n & I_n^2 & v_n & v_n^2 & L_n & L_n^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Q_{\text{exp}} = \begin{bmatrix} D_1 & W_1 & H_1 & Z_1 \\ D_2 & W_2 & H_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_n & W_n & H_n & Z_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

Os coeficientes da matriz A são então obtidos pelo método da regressão linear por mínimos quadrados através da equação (23):

$$A = (P_{\text{exp}}^T P_{\text{exp}})^{-1} P_{\text{exp}}^T Q_{\text{exp}} \quad (23)$$

Assim, uma vez calculados os coeficientes do modelo, que correspondem aos elementos da matriz A , é possível inferir, para cada conjunto de parâmetros de soldagem desejados, os parâmetros de qualidade do cordão de solda que será obtido.

Em Lima II *et al.* (2005), as variáveis mensuráveis foram tensão de soldagem (V), corrente de soldagem (I) e velocidade de soldagem (v) e largura da poça de fusão (L). Os parâmetros de qualidade analisados foram penetração (D), altura do reforço (H), largura do cordão (W) e tamanho da zona termicamente afetada (Z).

Assim, os parâmetros de soldagem e da geometria do cordão de solda definem, respectivamente, os vetores P e Q :

$$P = [V \quad V^2 \quad I \quad I^2 \quad v \quad v^2 \quad L \quad L^2 \quad 1] \quad (24)$$

$$Q = [D \quad W \quad H \quad Z] \quad (25)$$

Inicialmente foram definidos de forma experimental dois vetores P_1 e Q_1 , que reúnem parâmetros ideais para a solda e produzem um cordão de solda com geometria desejada.

A partir do vetor P_1 , foi definida uma série de outros vetores P_x variando-se os parâmetros de soldagem em níveis, de acordo com a técnica do projeto fatorial. Assim, os três fatores – tensão, corrente e velocidade de soldagem - foram variados em três níveis, resultando em $3^3=27$ vetores com combinações de valores diferentes. Para cada vetor P_x foi feita a monitoração da poça de fusão através de técnicas de visão computacional para determinar o valor da largura correspondente L_x .

Para cada vetor P_x definido foi feito um cordão de solda com o uso de um robô industrial para controle mais preciso dos parâmetros de soldagem e garantia de que outros parâmetros não considerados no modelo, como *stickout*, o ângulo de soldagem e a vazão de gás, permanecessem constantes durante o processo.

As imagens da poça de fusão foram obtidas com o uso de uma câmera de alta velocidade, que possibilitava a captura da imagem durante o período de curto circuito, momento em que o arco elétrico se extingue e a radiação não impede a visualização da poça de fusão. A imagem então foi transferida para um computador, de acordo com a posição em que o corte seria realizado na peça. A largura da borda foi obtida através da análise do algoritmo de Canny (Canny, 1986).

Após a realização dos ensaios, os cordões de solda foram seccionados e preparados para procedimento padrão para observação macroestrutural. Foram feitas imagens utilizando um microscópio para determinação dos vetores Q correspondentes à geometria do cordão de solda, conforme mostrado na Figura 2.7.

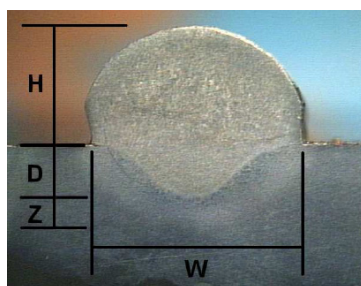


Figura 2.7 - Parâmetros de qualidade medidos através das imagens dos cordões.

Fonte: Lima II *et al.* (2005), p.6.

Para obter medidas de D, W, H e Z de cada cordão, aplicou-se o algoritmo Canny (Canny, 1986) às imagens do cordão de solda, obtendo-se valores em número de pixels, como mostrado na Figura 2.8.

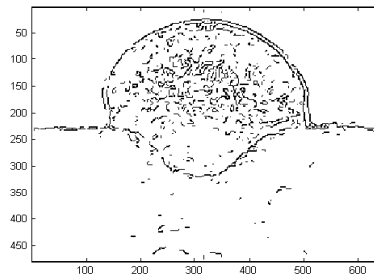


Figura 2.8 - Bordas do cordão de solda identificadas pelo algoritmo de Canny.

Fonte: Lima *et al.* (2005), p.7.

Para converter as medidas para milímetros, o utilizou-se uma escala milimétrica nas direções horizontal e vertical na mesma imagem da seção do cordão. A escala foi utilizada para determinar aproximadamente a correspondência de cada *pixel* com as medidas reais. A Figura 2.9 mostra uma imagem do cordão de solda com escala milimétrica.

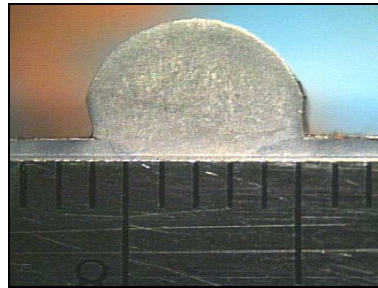


Figura 2.9 - Escala milimétrica utilizada para medição dos parâmetros de geometria dos cordões.

Fonte: Lima *et al.* (2005), p.7.

Foram depositados 27 cordões de solda, porém devido a dificuldades na medição por visão computacional, principalmente pelo modo de transferência metálica, foi possível utilizar apenas 14 dados experimentais. Uma vez determinados os vetores P_x e Q_x correspondente a cada cordão, as equações do modelo quadrático foram montadas na forma matricial:

$$[D \ W \ H \ Z] = A[V \ V^2 \ I \ I^2 \ v \ v^2 \ L \ L^2 \ 1] \quad (26)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} & a_{39} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} & a_{49} \end{bmatrix} \quad (27)$$

E os coeficientes do modelo foram obtidos através do método de mínimos quadrados através da equação (27).

Para avaliar a fidelidade do modelo, Lima *et al.* calcularam o erro entre os valores medidos da geometria dos cordões e os valores calculados pelo modelo, encontrando um erro médio de 0,020 mm para D; 0,138 mm para W; 0,034 mm para H e 0,053 mm para Z.

Outros modelos com vetores P contendo diferentes combinações de parâmetros de soldagem foram aplicados para as mesmas amostras. O melhor resultado para D, H e Z foi obtido com o modelo da equação (26).

Para a largura (W) do cordão de solda, Lima II *et al.* obtiveram um melhor modelo substituindo o termo I^2 por Iv na equação (26). O termo Iv aparentemente sem significado físico no contexto da soldagem foi capaz de diminuir o erro médio, comprovando o caráter empírico da escolha dos parâmetros de soldagem para predição do cordão de solda pelo modelo quadrático.

Outra limitação do modelo quadrático consiste em se restringir a relação entre os parâmetros de soldagem e os parâmetros de qualidade do cordão a uma relação linear ou quadrática, e com isso perde-se em precisão. Porém o modelo quadrático possibilita obter a sensibilidade de cada parâmetro de qualidade do cordão de solda em relação aos parâmetros de soldagem através das derivadas parciais das equações (18) e (19), como foi feito por Henriques *et al.* (2006).

Devido à complexidade e à forte inter-relação entre os fatores envolvidos no processo de soldagem, um modelo capaz de estabelecer outros tipos de relações entre os parâmetros poderia ser mais eficaz e preciso na predição da geometria do cordão de solda, como a técnica de Redes Neurais Artificiais.

2.4 Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos matemáticos que se assemelham às estruturas neurais biológicas com capacidade computacional adquirida por meio de aprendizado e generalização (Braga *et al.*, 2003).

A capacidade de *aprender* através de exemplos e de *generalizar* a informação aprendida é, sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através de RNAs. A generalização, que está associada à capacidade de a rede aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não-conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNAs vai muito além do que simplesmente mapear relações de entrada e saída. As RNAs são capazes de extrair informações não apresentadas de forma explícita através dos exemplos (Braga *et al.*, 2000).

Assim, o processo de aprendizagem de uma RNA é decorrente de sua interação com o meio externo, o que proporciona uma melhora gradativa em seu desempenho.

A estrutura das redes neurais artificiais se baseia na estrutura das redes neurais biológicas, cuja unidade fisiológica básica – o neurônio – tem a função de receber, processar e transmitir os sinais de informação.

O neurônio biológico é dividido em dendritos, corpo celular e axônio. Os dendritos têm a função de receber os sinais oriundos de outros neurônios e conduzi-los para o corpo celular. No corpo celular, os sinais são processados e novos sinais são gerados, que são transmitidos pelo axônio até suas extremidades. A região entre a terminação axônica de um neurônio e o dendrito de outro é chamada de sinapse. É pela sinapse que os neurônios se unem formalmente, formando as redes neurais. A Figura 2.10 ilustra de forma simplificada os componentes de um neurônio biológico.

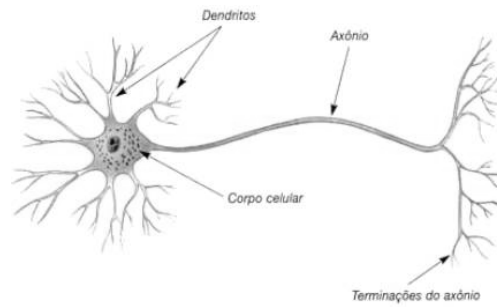


Figura 2.10 - Componentes básicos de um neurônio biológico.

Fonte: <http://peonies42.lastjune.web.id/neuronio-criativo.html>. Acessado em 12/01/2011.

A transmissão de sinais pelo neurônio ocorre quando a soma dos impulsos que ele recebe ultrapassa seu limiar de excitação, produzindo um impulso elétrico que é propagado pelo axônio para os neurônios seguintes. As sinapses, então, atuam como válvulas e são responsáveis por controlar a transmissão dos sinais – fluxo de informação entre os neurônios da rede.

O primeiro modelo de neurônio artificial foi proposto por McCulloch e Pitts (1943) e é uma simplificação do que se sabia a respeito do neurônio biológico. Sua descrição consiste de n terminais de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n), que representam os dendritos, e apenas um terminal de saída y , que representa o axônio. As sinapses são representadas por pesos w_i , que são acoplados a cada uma das entradas e determinam o grau em que o neurônio deve considerar sinais de disparo naquela conexão. Conforme modelo mostrado na Figura 2.11.

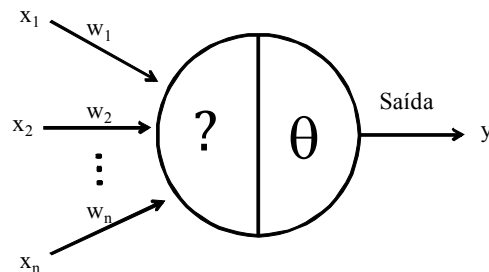


Figura 2.11 - Modelo básico de um neurônio artificial.

Fonte: Adaptado de Braga *et al.* (2000), p.9.

O corpo celular é responsável por somar as entradas ponderadas $w_i x_i$ e comparar o resultado obtido com o limiar de excitação θ do neurônio, também chamado de função de ativação. A

função de ativação restringe a amplitude de saída do neurônio e que pode ser do tipo degrau, linear ou sigmóide. O neurônio então terá sua saída ativa quando a relação (28) for satisfeita:

$$\sum_i^n x_i w_i \geq \theta \quad (28)$$

A maneira pela qual os neurônios de uma rede neural estão estruturados determina diretamente a qualidade do modelo obtido. Mesmo para uma estrutura definida, pode haver um número grande ou mesmo infinito de soluções possíveis. O grande desafio no desenvolvimento de modelos neurais é escolher a melhor entre inúmeras soluções possíveis (Braga *et al.*, 2003).

O número de neurônios das camadas intermediárias depende da complexidade do problema. Quanto maior o número de neurônios nas camadas intermediárias, mais complexas são as funções que podem ser mapeadas com a rede neural.

O número de camadas intermediárias da rede neural nos trabalhos sobre predição da geometria do cordão de solda pesquisados varia de uma ou duas camadas. Segundo Cybenko, 1989 e Hertz *et al.*, 1991, uma camada intermediária é suficiente para aproximar qualquer função contínua. Por outro lado, Cybenko, 1988 afirma que duas camadas intermediárias são necessárias para aproximar qualquer função matemática. Apesar do uso de duas ou mais camadas poder facilitar o treinamento da rede, o uso de um grande número de camadas não é recomendado, pois como somente a última camada tem um valor preciso do erro cometido pela rede, durante o treinamento o erro é propagado para a camada anterior, se tornando menos preciso. Logo, os erros das outras camadas serão somente estimativas sobre o erro.

Normalmente, o número de camadas e o número de neurônios em cada camada são definidos em função de uma inspeção prévia nos dados e na complexidade do problema. Uma vez definida a topologia inicial, a estrutura final mais adequada para a modelagem é normalmente obtida através de refinamentos sucessivos, que podem levar um tempo de dimensionamento alto, já que este tem um grande componente empírico (Braga *et al.*, 2000).

2.4.1 Treinamento e Aprendizagem

A base de funcionamento do modelo neural é o treinamento, onde é apresentada à rede uma sequência de padrões e a classe (resposta) a que estes pertencem. Assim, a rede possui a capacidade de aprender por exemplos e fazer interpolações e extrapolações do que aprenderam.

A etapa de aprendizagem consiste em um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede (os pesos das conexões entre as unidades de processamento) que guardam, ao final do processo, o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando.

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo ser agrupados em dois paradigmas principais: aprendizado supervisionado e aprendizado não-supervisionado. No aprendizado supervisionado, pares de parâmetros de entrada e saída desejados da rede são fornecidos, enquanto no aprendizado não-supervisionado somente os parâmetros de entrada estão disponíveis para a rede.

2.4.2 Backpropagation

O algoritmo de backpropagation é um algoritmo de aprendizado supervisionado que utiliza pares (entrada, saída desejada) para, por meio de um mecanismo de correção de erros, ajustar os pesos da rede. O treinamento ocorre em duas fases, em que cada fase percorre a rede em um sentido. Estas duas fases são chamadas de fase forward e fase backward. A fase forward é utilizada para definir a saída da rede para um dado padrão de entrada. A fase backward utiliza a saída desejada e a saída fornecida pela rede para atualizar os pesos de suas conexões (Braga *et al.*, 2000). O termo backpropagation surge do fato de que o algoritmo se baseia na retropropagação do erro para realizar os ajustes de pesos das camadas intermediárias (Braga *et al.*, 2003).

Assim, o estágio de aprendizado é composto pelo movimento direto do sinal, a comparação entre o valor fornecido pela rede e o resultado desejado e a consequente retropropagação do erro para o ajuste dos pesos. Essas fases se repetem até que o erro da rede seja menor que um valor de tolerância pré-definido. Quando isso acontece, diz-se que o aprendizado foi concluído.

2.4.3 Generalização

Em um algoritmo de backpropagation, inicialmente a rede é treinada a partir de uma amostra contendo pares de dados de entrada-saída a fim de ajustar os pesos sinápticos para que a saída da rede seja a mais próxima possível da saída desejada. Assim, espera-se que a rede seja capaz de generalizar.

Diz-se que uma rede generaliza bem quando o mapeamento de entrada-saída computado pela rede for correto (ou aproximadamente correto) para dados de teste não utilizados para a criação ou treinamento da rede (Haykin, 2001).

Assim, a capacidade de generalização de uma rede neural pode ser atribuída a uma boa interpolação não-linear sobre os dados de entrada (Wieland e Leighton, 1987), como pode ser visto na Figura 2.12.

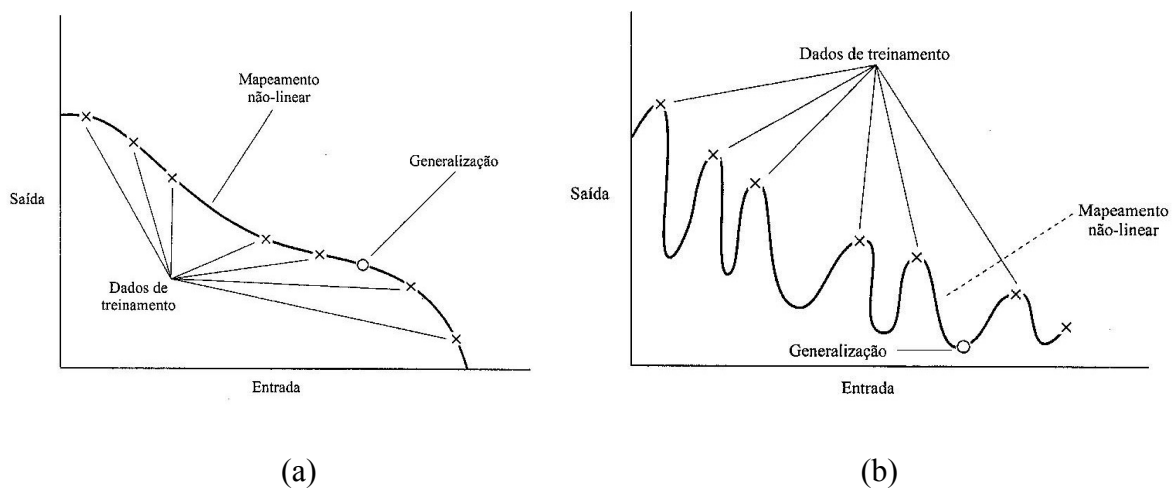


Figura 2.12 – (a) Dados ajustados adequadamente (boa generalização)

(b) Dados ajustados em excesso (generalização pobre)

Fonte: Haykin, (2001), p.233.

Como pode ser visto na Figura 2.12, uma rede neural capaz de generalizar bem produzirá uma saída correta mesmo quando o dado de entrada for diferente daqueles usados para treinar a rede. Entretanto, quando a rede é treinada com muitos exemplos de dados de entrada-saída, a rede pode memorizá-los encontrando uma característica que está presente nos dados, mas que não corresponde à função adjacente que deve ser modelada. Esse fenômeno é conhecido como

excesso de ajuste ou excesso de treinamento. Nesses casos, a rede perde sua capacidade de generalização.

Sendo assim, o problema é saber qual o tamanho do conjunto de dados suficiente para se treinar uma rede para que ela forneça uma boa capacidade de generalização.

Como nesse trabalho o conjunto de dados é fixo, outra alternativa será utilizada a fim de melhorar a capacidade de generalização da rede, como o Método de Treinamento com Parada Antecipada.

Durante um treinamento com um algoritmo de backpropagation, o erro médio quadrado tende a diminuir conforme o número de épocas de treinamento aumenta. Porém é difícil saber qual o número de épocas adequado considerando apenas o erro médio quadrado, pois a rede pode acabar sendo excessivamente ajustada aos dados de treinamento, não correspondendo, portanto, a uma boa capacidade de generalização.

O método de treinamento com parada antecipada é usado para identificar o início do excesso de treinamento. Isso é feito através do uso da validação cruzada, na qual os dados de treinamento são divididos em dois subconjuntos. O primeiro subconjunto é o de treinamento, que é usado para treinar a rede de maneira usual, a fim de ajustar os pesos sinápticos e bias da rede. O segundo subconjunto é o de validação. O erro de validação é monitorado durante o processo de treinamento. Após certo período de treinamento, os pesos sinápticos e os níveis de bias são mantidos constantes e a rede opera no seu modo direto, para frente. O erro de validação é então medido para cada exemplo do subconjunto de validação. O erro de validação normalmente decresce durante a fase inicial de treinamento, assim como o erro de treinamento. Entretanto, quando a rede começa a ser excessivamente ajustada aos dados de treinamento, o erro de validação tipicamente começa a aumentar, como representado esquematicamente na Figura 2.13.

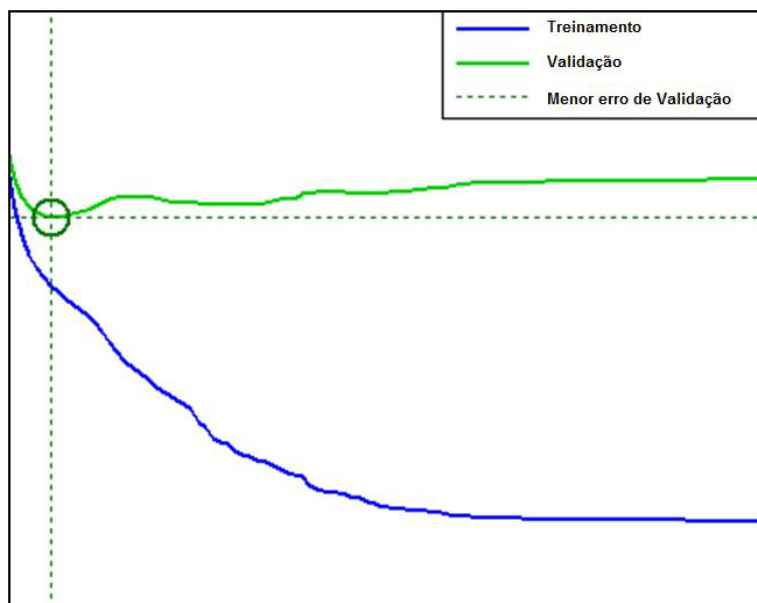


Figura 2.13 – Variação do erro de validação e erro de treinamento em função do número de épocas durante um treinamento. O ponto circulado corresponde ao menor valor do erro de validação.

Quando o erro de validação aumenta para um número específico de iterações, o treinamento é interrompido e os pesos e bias correspondentes ao menor valor do erro de validação são restaurados. Quando a fase de validação é completada, a estimação (treinamento) é reiniciada para um novo período, e o processo é repetido.

2.4.4 Redes Neurais Artificiais na Predição da Geometria de Cordões de Solda

A técnica de Redes Neurais Artificiais busca obter a capacidade de reconhecimento e adaptação que outros algoritmos de aproximação de funções não possuem. Assim, as vantagens do modelo neural é que a rede pode ser continuamente atualizada com novos dados que otimizam sua performance e sua habilidade em relacionar muitas variáveis rapidamente, filtrar e interpolar dados incompletos (Manikya Kanti e Srinivasa Rao, 2007). Além disso, as redes neurais são capazes de estabelecer qualquer tipo de relação entre as variáveis, sendo por isso comumente chamadas de “aproximadores universais”.

Trabalhos baseados no uso das redes neurais na modelagem e predição da geometria dos cordões de solda têm apresentado resultados satisfatórios. Porém, o desempenho da rede neural é fortemente influenciado não só pela estrutura da rede e seu processo de aprendizagem, mas também pela escolha das variáveis a serem consideradas. Apesar dos

vários parâmetros envolvidos no processo de soldagem, somente alguns são selecionados a fim de não aumentar a complexidade da rede. Assim, vários são os trabalhos envolvendo redes neurais, mas cada autor escolhe os parâmetros que considera principais na determinação da geometria do cordão.

Comumente utilizam-se como parâmetros de entrada a Tensão, Corrente e Velocidade de Soldagem por serem esses os parâmetros mais facilmente controláveis e mensuráveis. Outros parâmetros como espessura da chapa e velocidade de alimentação do arame, frequência de pulsos (no caso do processo GMAW pulsado), corrente de pico, entre outros podem também ser considerados.

Os parâmetros de saída variam de acordo com as informações que se deseja obter acerca da característica da geometria do cordão de solda, como largura e altura do reforço, penetração, ângulo de contato, índice de convexidade (razão entre largura e altura do reforço), área total, área do reforço, diluição, entre outros.

Chan *et al.* (1999) utilizam como parâmetros de entrada a tensão (V), corrente (I) e velocidade de soldagem (S). Como parâmetros de saída são utilizados a largura (BW), altura do reforço (BH) e penetração do cordão de solda (Pene). E dois parâmetros não tradicionais para caracterizar a penetração, o “bay angle” (θ) e o comprimento “bay length” (l^{θ}), conforme mostrado no esquema da Figura 2.14.

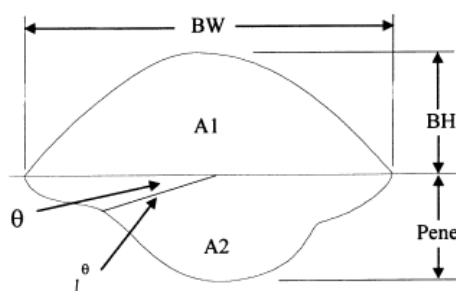


Figura 2.14 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.

Fonte: Chan *et al.* (1999), p.44.

A técnica de backpropagation (BPN) foi usada a fim de prever todos esses parâmetros e a forma geométrica que se ajusta a eles para fornecer uma representação razoável do cordão. As áreas depositada (A1) e fundida (A2) também foram determinadas para fornecer uma estimativa independente do tamanho do cordão.

O processo inverso apresentou-se mais complexo. Fixar os parâmetros do processo (V, I, S) para determinar os parâmetros da geometria do cordão (W, H, P, L) não é adequado na prática quando o vetor de entrada é menor que o vetor de saída, caso análogo a se resolver um problema não-trivial em termos matemáticos. Portanto, foram necessárias quatro redes independentes para determinar os parâmetros geométricos do cordão. Duas redes separadas foram construídas para prever a área depositada (A_1) e a área fundida (A_2).

Foram testadas diferentes estruturas para a rede neural. Um modelo com uma camada intermediária com 4 ou 5 neurônios, e um modelo com duas camadas intermediárias com combinações de 4 e 3, 5 e 3, 6 e 4, e 8 e 6 neurônios em cada camada.

Na parte experimental foram preparados 96 cordões sobre chapa, soldados através do processo GMAW, com gás de proteção à base de argônio. A extensão, diâmetro e polaridade do eletrodo foram mantidos constantes durante todo o experimento. Os parâmetros variados foram tensão, corrente, velocidade de soldagem e espessura da chapa.

Para representar a forma reforço do cordão de solda, foram ajustadas curvas na forma de semi-elipse e parábola. Porém, nenhuma das duas curvas representou realmente o formato do cordão. No entanto, as curvas forneceram boa aproximação da área depositada. Enquanto a elipse tende a superestimar, a parábola tende a subestimar a área depositada. Os autores então escolheram representar o reforço do cordão de solda por uma parábola.

A rede neural usada em Chan *et al.* (1999) foi capaz de prever a largura do cordão com mais precisão que a altura. Os autores justificaram esse fato considerando que o reforço do cordão fica sujeito a maiores variações devido às condições do ambiente (tensão superficial, interações do metal de solda, etc.) e, portanto isso seria esperado.

Kim *et al.* (2005) desenvolveram um sistema inteligente que consiste de duas regressões múltiplas e uma rede neural a fim de fornecer informações sobre a geometria do cordão de solda em relação aos parâmetros de soldagem.

Nesse trabalho, foram selecionados como parâmetros de entrada a tensão, corrente e velocidade de soldagem. Todos os outros parâmetros foram mantidos constantes.

Os cordões foram então seccionados para medir os parâmetros de saída: largura (W), altura do reforço (H), penetração (P), área fundida (A_P), área depositada (A_R), comprimento do

contorno da penetração (B_P) comprimento do contorno do reforço (B_R) do cordão de solda, conforme esquema mostrado na Figura 2.15.

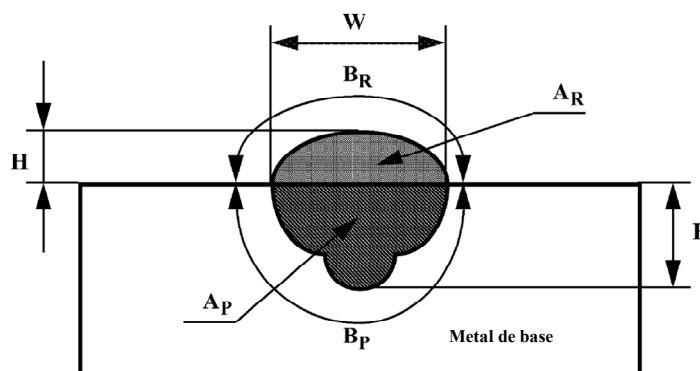


Figura 2.15 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.

Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2005), p.114.

A partir de modelos de regressão múltipla, os efeitos de cada parâmetro de soldagem na geometria do cordão de solda puderam ser determinados. Para avaliar quantitativamente esses efeitos, modelos linear e curvilíneo que expressassem a relação entre os parâmetros de soldagem e os a geometria do cordão foram desenvolvidos.

Um modelo de rede neural também foi desenvolvido utilizando a técnica de backpropagation. A estrutura da rede consistiu de três camadas. A camada de entrada possui três neurônios (tensão, corrente e velocidade de soldagem), a camada intermediária possui apenas um neurônio, e a camada de saída possui onze neurônios, que representam a seção transversal do cordão de solda. Do total dos 27 dados experimentais, 21 foram usados para treinamento e 6 para testar a rede.

Para verificar a eficiência dos modelos desenvolvidos, cordões adicionais foram soldados com parâmetros de soldagem diferentes dos usados para treinar a rede. Os resultados obtidos para a geometria do cordão através dos modelos linear, curvilíneo e da rede neural foram então plotados juntamente com o formato real do cordão adicional.

Os modelos forneceram resultados muito próximos dos valores correspondentes à geometria real do cordão de solda. Porém, o modelo baseado na rede neural foi capaz de prever com maior precisão a geometria do cordão de solda em relação aos modelos linear e curvilíneo de regressão múltipla. Isso se deve ao fato de que a rede neural é capaz de representar melhor a

relação não-linear entre a geometria do cordão de solda e os parâmetros de soldagem que a definem.

Outro modelo baseado em redes neurais foi desenvolvido por Manikya Kanti *et al.* (2008), porém com diferentes parâmetros de entrada e saída.

Os parâmetros de entrada considerados foram espessura da chapa, frequência de pulso, taxa de alimentação do arame, razão entre a taxa de alimentação do arame e a velocidade de soldagem e corrente de pico. Os parâmetros de saída foram penetração e o índice de convexidade, definido como a razão entre a altura do reforço e a largura do cordão de solda, conforme mostrado na Figura 2.16.

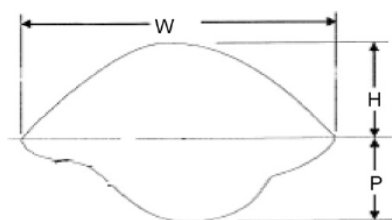


Figura 2.16 – Parâmetros geométricos do cordão de solda.

Fonte: Manikya Kanti, *et al.* (2008), p.301.

Foram soldadas 54 amostras através do processo GMAW para diferentes combinações dos parâmetros de entrada. Assim, diferentes valores de penetração e índice de convexidade foram encontrados. Dessas 54 amostras, 48 foram usadas para treinamento da rede neural, enquanto 6 amostras foram usadas para testes.

A estrutura da rede neural desenvolvida consistiu de cinco neurônios na camada de entrada, uma vez que são cinco os parâmetros de entrada. A camada de saída contém dois neurônios correspondendo à penetração e ao índice de convexidade. E duas camadas intermediárias, contendo cinco e quatro neurônios. Segundo os autores, essa estrutura de rede apresentou maior precisão quando comparada com outras redes. A função transferência utilizada para as duas camadas foi sigmoideal.

Para avaliar a precisão do modelo, os valores obtidos pela rede neural e os valores experimentais foram comparados através do cálculo do coeficiente de correlação e da porcentagem de erro. Os valores medidos experimentalmente e os obtidos através da rede neural foram também plotados. Foi possível observar que os resultados obtidos pelo modelo

de BPN foram próximos dos resultados experimentais, de modo que o modelo desenvolvido possui a capacidade de prever a penetração e o índice de convexidade dentro de uma faixa de erro permitida.

A utilização de modelos de predição da geometria de cordões de solda baseados em redes neurais aparenta ser bastante conveniente na prática, pois a precisão dos resultados obtidos em todos os trabalhos analisados foi bastante satisfatória.

Outra vantagem do uso das redes neurais é que as relações entre os parâmetros de soldagem ficam implícitas nos pesos da rede em um processo por backpropagation, e em princípio é relativamente fácil adicionar novos dados de aprendizagem à rede. Porém é necessário experiência para julgar os valores obtidos e garantir um resultado confiável.

Porém a forma implícita de processamento da rede neural constitui também sua principal desvantagem, pois a técnica não é capaz de fornecer um entendimento das relações entre os parâmetros envolvidos no processo de soldagem e a geometria do cordão de solda. Sendo assim, a rede neural pode ser usada como alternativa à análise de regressão para prever com maior precisão as dimensões do cordão de solda, mas não substitui uma solução física para o problema.

Desse modo, o uso das redes neurais, assim como o modelo quadrático, não fornece um entendimento acerca das relações entre as variáveis, pois o que se obtém é uma série de pesos sinápticos entre os neurônios que levam à relação entre os parâmetros de soldagem e os parâmetros de qualidade do cordão de solda. Um modelo capaz de estabelecer relações linguísticas entre as variáveis poderia contribuir para um melhor entendimento das relações que governam o processo de soldagem e assim, facilitar a manipulação dessas variáveis pelos soldadores. Uma solução possível é a utilização da Lógica Fuzzy.

2.5 Lógica Fuzzy

A teoria clássica de conjuntos permite o tratamento de classes de objetos e suas inter-relações em um universo definido. Este universo pode ser discreto ou contínuo, dependendo da natureza dos objetos que o compõem (Almeida e Evsukoff, 2003). Os elementos pertencentes a uma mesma classe ou que possuem características semelhantes podem ser agrupados em conjuntos. Segundo a teoria clássica, existem três formas de se definir um conjunto. Seja pela enumeração de todos seus elementos, pelo agrupamento de elementos que possuam

características semelhantes em conjuntos que refletem essa característica ou através da expressão do conjunto segundo sua função característica, por exemplo, uma função no plano cartesiano.

Assim, é possível definir as relações de pertinência dos elementos em relação aos conjuntos existentes, ou seja, se o elemento pertence (pertinência total) ou não ao conjunto (relação de não pertinência).

Porém no mundo real existem propriedades que são vagas, incertas ou imprecisas e, portanto, impossíveis de serem caracterizadas por predicados da lógica clássica bivalente. Nesse contexto, a Lógica Fuzzy pode ser entendida como uma extensão da teoria clássica de conjuntos, pois foi criada para tratar graus de pertinência intermediários entre a pertinência total e a não pertinência de elementos com relação a um conjunto (Almeida e Evsukoff, 2003).

Dentro de um universo U tem-se um conjunto fuzzy F caracterizado por uma função característica real, comumente chamada de função de pertinência, mapeada por $u_f : U \rightarrow [0,1]$. A cada elemento $x \in U$ é associado um número real $u_f(x)$ no intervalo $[0,1]$, que representa o grau de pertinência de x em F . Assim, $u_f(x) = 0$ representa a não pertinência, enquanto $u_f(x) = 1$ representa a pertinência total de x em relação a F .

Entre conjuntos fuzzy, são determinadas três operações fuzzy básicas: complemento, união e interseção. Os conjuntos são representados em um diagrama de Hasi-Euler (H-E). Nesta notação, o conjunto é representado graficamente por uma função real, esboçada em um sistema de eixos cartesianos, onde o eixo x representa o universo de discurso e o eixo y representa os graus de pertinência.

Três operações básicas podem ser executadas entre conjuntos fuzzy: complemento, união e interseção. Essas operações serão exemplificadas a partir de três conjuntos fuzzy denominados “pequeno” (μ_P), “médio” (μ_M) e “grande” (μ_G) em um universo de discurso U : $[0,5]$, conforme representado no diagrama da Figura 2.17.

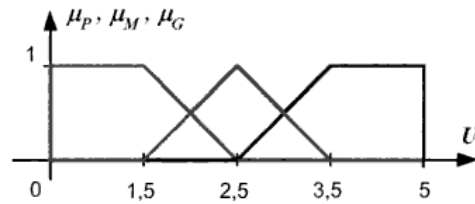


Figura 2.17 – Diagrama H-E dos conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande”.

Fonte: Almeida e Evsukoff (2003), p.174.

O Complemento corresponde ao conectivo “NÃO” e pode ser denotado por $\neg G$, com uma função de pertinência definida por

$$\mu_{\neg G}(x_i) = 1 - \mu_G(x_i) \quad (29)$$

Graficamente, resulta em um conjunto “não grande”, conforme Figura 2.18.

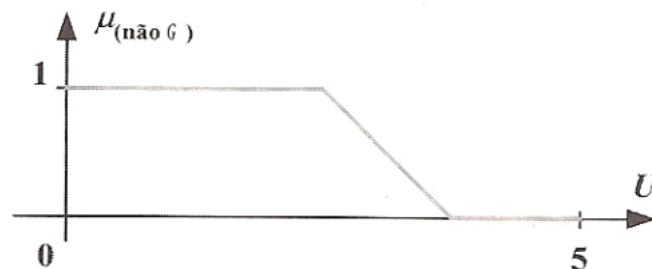


Figura 2.18 – Conjunto fuzzy resultante da operação de complementação do “não grande”.

Fonte: Almeida e Evsukoff (2003), p.175.

A união corresponde ao conectivo “OU” e pode-se representar $\mu_G \cup \mu_M$ ou $\mu_G + \mu_M$ pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{G \cup M} = \max[\mu_G(x_i), \mu_M(x_i)] \quad (30)$$

Graficamente resulta em um conjunto “grande OU médio”, conforme Figura 2.19.

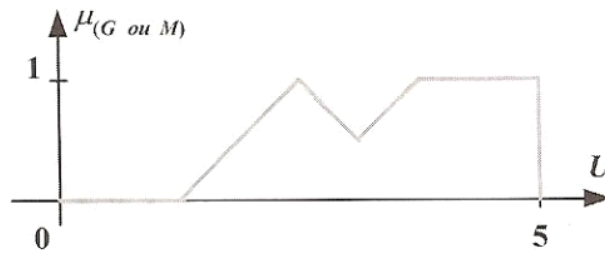


Figura 2.19 – Conjunto fuzzy resultante da operação de união “grande OU médio”.

Fonte: Almeida e Evsukoff (2003), p.176.

A operação de interseção corresponde ao conectivo “E” e pode-se representar $\mu_G \cap \mu_M$ ou $\mu_G \cdot \mu_M$ através da seguinte função de pertinência:

$$\mu_{M \cap P} = \min[\mu_M(x_i), \mu_P(x_i)] \quad (31)$$

Graficamente, resulta em um conjunto “médio E pequeno”, conforme Figura 2.20.

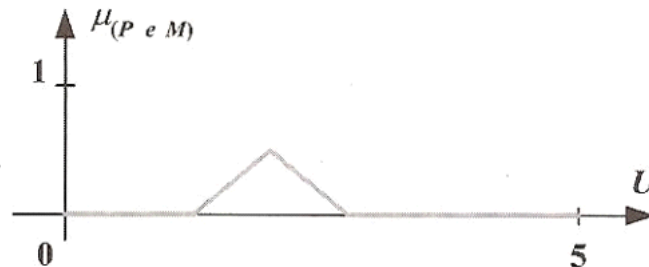


Figura 2.20 – Conjunto fuzzy resultante da operação de interseção “médio E pequeno”.

Fonte: Almeida e Evsukoff (2003), p.177.

2.5.1 Representação Fuzzy do Conhecimento – Variáveis Linguísticas

O ser humano quando busca a solução de um problema complexo estrutura todo o conhecimento acerca do problema de modo geral, estabelecendo relações gerais e imprecisas entre os conceitos, para, posteriormente, definir algoritmos mais detalhados.

As relações definidas *a priori* não permitem uma solução quantitativa do problema, mas conduzem a uma classificação qualitativa do problema em conjuntos de possíveis soluções.

A capacidade de classificar de modo impreciso as variáveis de um problema, em termos de conceitos qualitativos em vez de quantitativos, traduz a idéia de variável linguística. (Almeida e Evsukoff, 2003)

Uma variável linguística concede um conceito linguístico e, portanto impreciso, a uma variável precisa (numérica) e seu valor consiste apenas de expressões linguísticas (frequentemente chamadas de termos primários), como “frio”, “muito frio”, “alto” etc.

A cada conceito linguístico associa-se um conjunto fuzzy existente no universo de discurso U no qual a variável está definida. Para cada valor de x no universo de discurso U, a função de pertinência $\mu_A(x)$ representa o quanto este elemento satisfaz o conceito representado pelo conjunto fuzzy A.

As formas de utilização das variáveis linguísticas dependem basicamente das determinação das regras sintáticas e semânticas que regem o conjunto fuzzy. As regras sintáticas definem o formato em que serão armazenadas as informações linguísticas fuzzy. E as regras semânticas especificam de que modo é extraído o processo de conhecimento.

2.5.2 Regras e Inferência Fuzzy

Em uma base de conhecimento fuzzy, as informações são armazenadas através de regras de produção fuzzy. Uma regra de produção normalmente é formada por duas partes principais:

SE<antecedente>ENTÃO<consequente> (32)

O antecedente são as condições de determinada variável linguística que determinam o processamento do consequente por um mecanismo de inferência fuzzy.

Um modelo de inferência fuzzy traduz matematicamente cada proposição fuzzy especificada pela base de regras. Para tanto, podem ser utilizados dois modelos distintos: Modelo de Mamdani e o Modelo de Takagi-Sugeno.

Em um modelo Mamdani, as regras de produção possuem relações fuzzy tanto nos seus antecedentes quanto nos seus consequentes. Uma regra desse modelo é mostrada em (33):

SE Temperatura = *AumentandoMuito* e Pressão = *MuitoAlta*, ENTÃO
PerigodeExplosão = *Grande* (33)

Em um sistema de processamento de conhecimento fuzzy, os valores das variáveis numéricas de entrada (escalar) são convertidos em variáveis linguísticas de um conjunto fuzzy (fuzzificação). A base de regras é então aplicada às variáveis fuzzy e, no modelo Mamdani, são utilizadas as operações de união (lógica “OU”) e de interseção (lógica “E”) como operadores de máximo e mínimo, respectivamente (inferência Máx-Mín). Feito isso, são obtidas as variáveis fuzzy de saída, que são convertidas novamente em variáveis numéricas (defuzzificação).

Na Figura 2.21 é mostrado um diagrama típico de um sistema de processamento de conhecimento fuzzy que utiliza o modelo de inferência de Mamdani:



Figura 2.21 – Diagrama típico de um modelo de inferência de Mamdani

Fonte: Almeida e Evsukoff (2003), p.180.

Similarmente ao modelo de Mamdani, o Modelo de Takagi-Sugeno é também baseado na utilização de uma base de regras condicionais de inferência. Porém no modelo Takagi-Sugeno os consequentes das regras, em vez de serem formados por relações fuzzy, compõem-se de equações paramétricas relacionando as entradas e as saídas do processo (Almeida e Evsukoff, 2003).

2.5.3 Aplicação da Lógica Fuzzy na Predição da Geometria de Cordões de Solda

O processo de representação de variáveis imprecisas frequentemente empregada pelo ser humano (variáveis linguísticas) em variáveis fuzzy é qualitativo. Na predição da geometria de cordões de solda, a lógica Fuzzy busca traduzir os conhecimentos empíricos dos soldadores em variáveis fuzzy, de modo que possam ser classificadas e relacionadas entre si (Coelho, 2010).

Por exemplo, em relação aos parâmetros de soldagem, valores de variáveis como tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem podem ser classificados como alto, médio ou baixo. Esses três graus de intensidade podem ser representados como três diferentes conjuntos fuzzy e, para um dado valor da variável considerada, a função de pertinência definirá o quanto este elemento satisfaz o conceito representado por cada um dos conjuntos fuzzy.

Do mesmo modo, esse processo conhecido como fuzificação pode ser feito para os parâmetros de qualidade do cordão de solda, que podem ser classificados como largo, médio e estreito para largura e alto, médio e baixo para altura do reforço.

Definindo-se a base de regras que relacionam os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão de solda é possível inferir com relativa precisão as características quantitativas e qualitativas do cordão de solda a partir de determinados parâmetros de soldagem.

Coelho *et al.* (2010) realizaram a modelagem da geometria de cordões de solda através da Lógica Fuzzy. Foram obtidas relações entre os parâmetros de soldagem, tensão, corrente e velocidade de soldagem, e os parâmetros geométricos do cordão, largura e reforço. Foi feita também uma análise da influência de cada parâmetro após a formalização das regras Fuzzy e da definição das funções de pertinência.

Para desenvolver o modelo, foram selecionados como parâmetros para a implementação em MATLAB® apenas os cordões que possuíam parâmetros de soldagem definidos como baixo, médio ou alto, totalizando 27 dados. Os demais parâmetros foram utilizados para testar o modelo e validá-lo após a implementação.

No *Fuzzy Logical Toolbox* do MATLAB® foram inseridas as variáveis de entrada (tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem), as variáveis de saída (Largura e altura do Reforço) e foram definidos os domínios de cada variável de acordo com os valores mínimos e máximos que cada uma atingiu no ensaio.

Foram utilizados como método de inferência o modelo de Mamdani e o método do Centróide para defuzzificação. Segundo os autores, esta combinação foi selecionada por ser simples, eficiente e similar a intuição humana. A Figura 2.22 mostra a tela inicial do *Fuzzy Logical Toolbox* do MATLAB®.

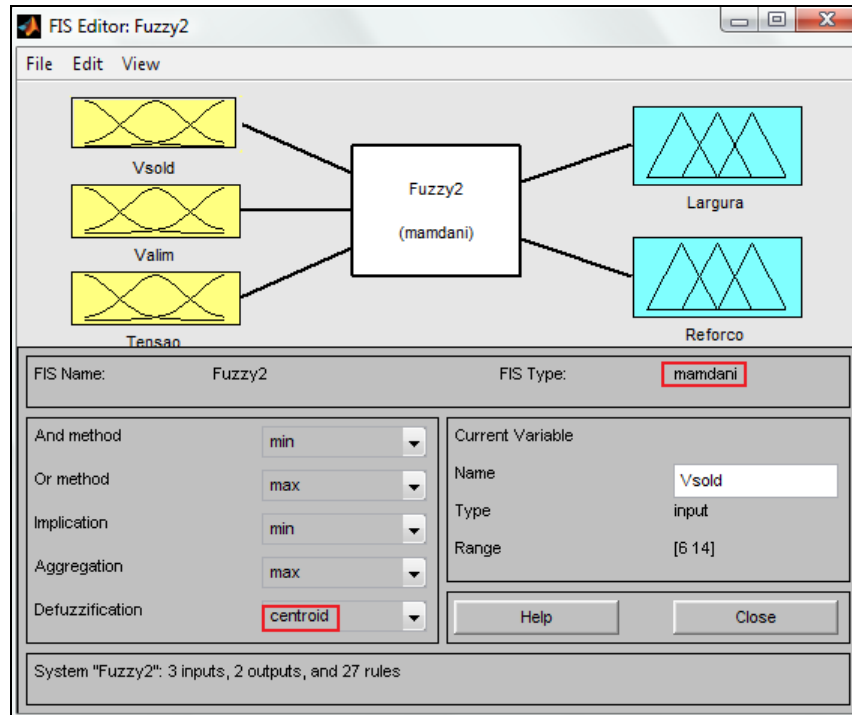


Figura 2.22 - Tela inicial do *Fuzzy Logical Toolbox*

Fonte: Coelho (2010), p.42.

Para cada uma das variáveis de entrada foram utilizadas três funções de pertinência de forma triangular, nomeadas de funções de pertinência baixa, média e alta. Para cada uma das variáveis de saída foram utilizadas cinco funções de pertinência de forma trapezoidal, nomeadas de muito largo, largo, médio, estreito, muito estreito para largura e muito alto, alto, médio, baixo, muito baixo para altura do reforço.

A base de regras foi criada relacionando as variáveis de entrada com as variáveis de saída, a partir dos valores obtidos para 27 dados experimentais. As regras criadas são bastante simples de serem entendidas e representam de maneira clara os conhecimentos empíricos dos soldadores, como pode ser observado em uma das regras criadas:

Se (Vsold é Alta) e (Valim é Baixa) e (Tensão é baixa) então (Largura é Muito Estreito) e (Reforço é Muito Baixo).

O modelo implementado em MATLAB® foi testado utilizando-se os valores de entrada dos demais cordões, os quais não foram utilizados na implementação. Analisando os dados quantitativamente foi possível verificar que as diferenças entre as variáveis medidas e as variáveis calculadas através da Lógica Fuzzy não foram satisfatórias, alcançando, em média, o

valor de 15,5% para a altura do reforço e 14,8% para a largura. O erro médio correspondente foi de 0,877 mm para a altura do reforço e 0,245 mm para a largura.

Em uma análise qualitativa, os valores da altura do reforço e de largura inseridos na mesma faixa classificatória representam 75,2% e 59,2% do total, respectivamente. Todos os resultados que apresentaram alguma diferença estavam localizados em faixas adjacentes, ou seja, um resultado fuzzy sempre estava localizado em uma faixa adjacente ao valor medido. Isso demonstra que o método é válido para realização de análises qualitativas da geometria do cordão de solda.

Com base nesse trabalho é possível verificar a aplicabilidade na lógica Fuzzy na predição da geometria de cordões de solda. O método é válido para análises qualitativas e por disponibilizar o conhecimento e as relações entre as variáveis de soldagem em uma linguagem humana, porém é menos preciso, não fornecendo a precisão necessária para a implementação de um modelo gráfico.

Assim, considerando os objetivos deste trabalho e os resultados obtidos por Coelho *et al.* (2010), a Lógica Fuzzy não será aplicada. Para se obter uma melhor precisão numérica, os modelos discutidos anteriormente, como a Regressão Múltipla e Rede Neural, seriam mais adequados.

Com base na aplicação do presente trabalho, que consiste em se criar um modelo para prever a geometria do cordão de solda e representar o seu formato real de modo a tornar uma simulação de soldagem o mais próximo possível do processo real, foram feitas análises não só dos métodos de modelagem, mas também um estudo acerca da geometria seção do cordão de solda, o que será discutido na seção seguinte.

2.6 - Geometria da Seção do Cordão de Solda

O formato e as dimensões do cordão de solda são fatores importantes que asseguram as propriedades mecânicas de determinada junta soldada. Sendo assim, para se simular um processo de soldagem de forma mais realista, é necessário o desenvolvimento de modelos cada vez mais precisos e capazes de representar a geometria do cordão de solda, para que, implementados em softwares de simulação robótica, possam reproduzir com maior fidelidade a geometria do cordão de solda. Logo, quanto mais realista for a simulação do processo de

soldagem, maior a garantia de que as características finais do cordão de solda produzido irá atender às especificações do projeto, reduzindo assim o tempo gasto com ensaios e testes de qualidade.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos a fim de se modelar o cordão de solda e determinar qual o seu formato real. Matsunawa e Ohji (1982), partindo dos conceitos físicos de tensão superficial e capilaridade, representam em seu modelo o formato da seção do cordão como uma elipse, como mostrado na Figura 2.23.

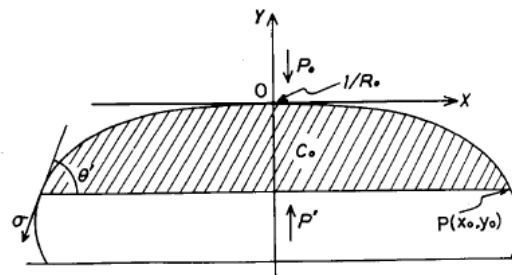


Figura 2.23 – Representação elíptica do cordão de solda.

Fonte: Matsunawa e Ohji (1982), p.150.

Chan *et al.* (1999) afirmam que o reforço do cordão de solda pode ser aproximado por uma parábola ou por uma semi-elipse, mas conclui que apesar de fornecer uma aproximação razoável, nenhum dos dois modelos corresponde realmente ao formato do reforço. Enquanto a elipse tende a superestimar a área depositada, a parábola tende a subestimá-la, como mostra o gráfico da Figura 2.24. A reta apresentada na figura representa um modelo ideal, em que o valor calculado é exatamente igual ao real. Os pontos mostrados como 'x's e 'o's representam os valores calculados por cada modelo. Quanto mais próximos os pontos da reta, melhor a aproximação.

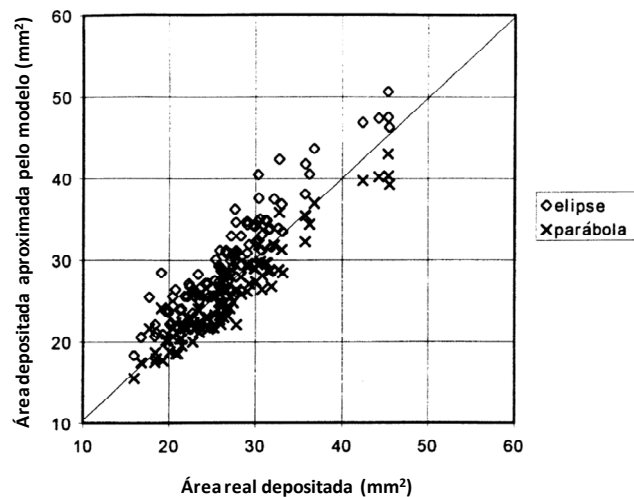


Figura 2.24 – Comparação entre os valores reais e a aproximados previstos pelo modelo (semi-elipse e parábola) para a área depositada do cordão de solda.

Fonte: Adaptado de Chan *et al.* (1999), p.46.

Os autores então propõem a representação da forma do cordão de solda como uma parábola, considerando sua melhor aproximação. A Figura 2.25 mostra uma comparação entre a forma experimental e a aproximação por uma parábola prevista pelo modelo.

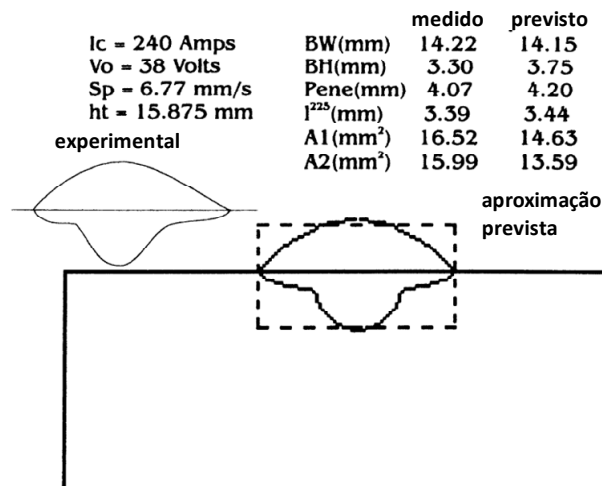


Figura 2.25 – Representação da forma experimental e da aproximação por uma parábola prevista pelo modelo. O quadrado pontilhado corresponde às medidas reais do cordão de solda.

Fonte: Adaptado de Chan *et al.* (1999), p.49.

Lima II *et al.* (2008), aproximam o reforço do cordão de solda por um arco de circunferência, como pode ser visto na Figura 2.26.

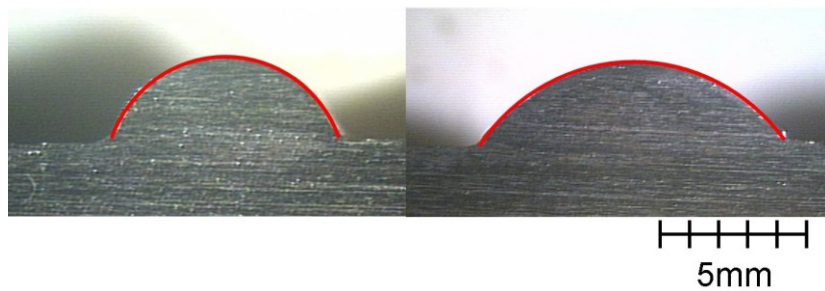


Figura 2.26 - Aproximação da geometria de um cordão de solda por arcos de circunferência.

Fonte: Lima *et al.* (2009), p.8.

Por outro lado, Jo *et al.* (2009) parte dos dados experimentais da seção de um cordão para ajustar uma equação matemática para a forma do reforço do cordão de solda, como pode ser visto na Figura 2.27.

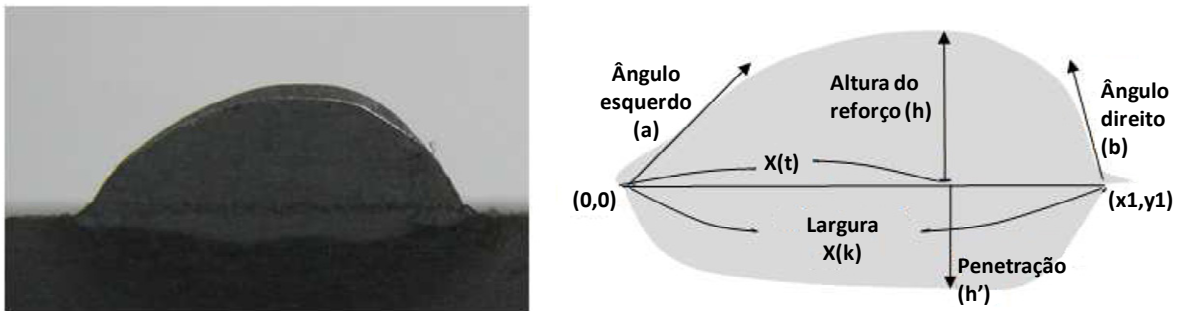


Figura 2.27 – Seção do cordão real (à esquerda) e os elementos que constituem a representação da forma do cordão.

Fonte: Adaptado de Jo *et al.* (2009), p. 270

A curva que representa a forma do cordão de solda consiste de duas equações quadráticas (F_L para o lado esquerdo e F_R para o lado direito) e possui um eixo de simetria no ponto mais alto do cordão ($(X(t), h)$). As equações são definidas como:

$$F_L(x) = M_L * (x - X(t))^2 + h \quad (34)$$

$$F_R(x) = M_R * (x - X(t))^2 + h \quad (35)$$

M_L e M_R são as inclinações das retas tangentes, $X(t)$ é o valor de X no ponto mais alto da superfície do cordão de solda e h é a altura no ponto $X(t)$.

A partir da análise dos trabalhos que modelam o formato do cordão de solda, percebe-se que não há um consenso sobre o formato real da seção do reforço do cordão. Todos os modelos

apresentados se aproximam razoavelmente do formato do cordão de solda, mas nenhum corresponde ao seu formato real.

2.6.1 – Modelagem Gráfica do Cordão de Solda

A simulação gráfica consiste na construção de um modelo que permita uma melhor visualização de um sistema. No caso da soldagem, a modelagem gráfica de cordões de solda torna a simulação do processo de soldagem mais realista, revelando as características finais do cordão de solda antes mesmo da programação do robô.

LIMA II *et al.* (2008) , considerando a forma da seção do cordão de solda como um arco de circunferência, utilizam um programa CAD 3D para gerar uma biblioteca de geometrias de cordões, como em ALMEIDA *et al.* (2007). Um arco de circunferência foi desenhado utilizando a metade da largura e a altura do reforço do cordão como parâmetros independentes, e então revolvido para a criação de uma calota esférica, como pode ser visto na Figura 2.28. Para diminuir o custo computacional durante a execução do programa de simulação do robô, foi criada previamente uma série de formas para a calota esférica com a variação da razão entre largura e altura, como mostrado na Figura 2.29.

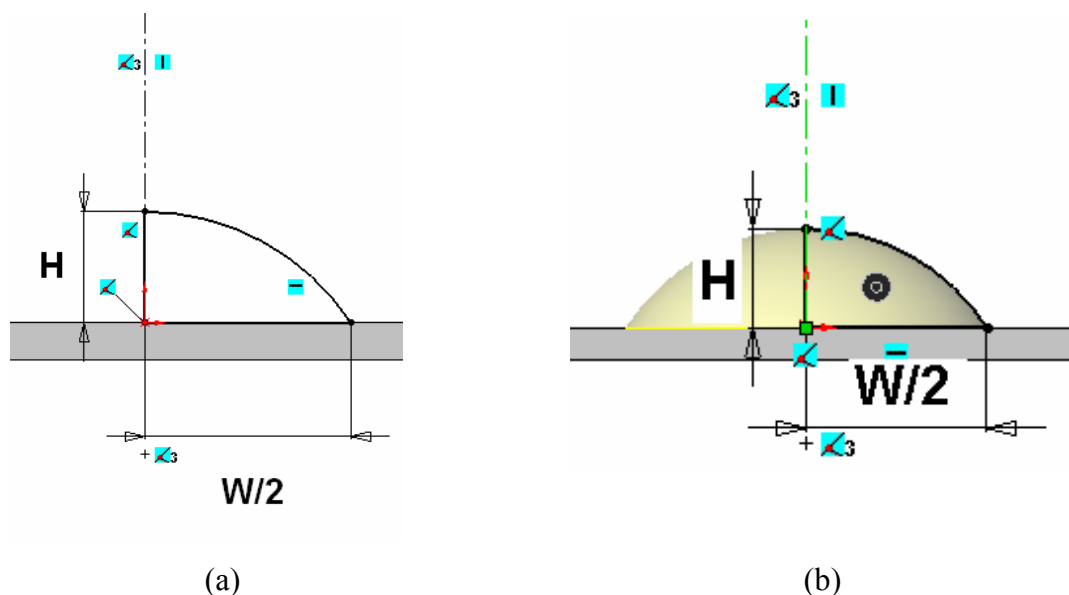


Figura 2.28 – (a) Arco de circunferência desenhado utilizando a largura e a altura do cordão de solda. (b) Revolução do arco para formar da seção do cordão de solda.

Fonte: Almeida *et al.* (2007), p.7.



Figura 2.29 - Exemplos de calotas esféricas obtidas com a variação da razão entre largura e altura.

Fonte: LIMA II *et al.* (2008), p.3.

A biblioteca de calotas esféricas foi então importada no programa de simulação de robôs. A cada ponto da trajetória da ferramenta, o programa cria uma calota esférica com base na biblioteca e a redimensiona com base nos valores da largura e altura do reforço do cordão de solda. As calotas então são repetidas em toda a linha que representa a trajetória de soldagem e são sobrepostas, de acordo com os parâmetros de repetição e espaçamento determinados no programa, como mostra a Figura 2.30.

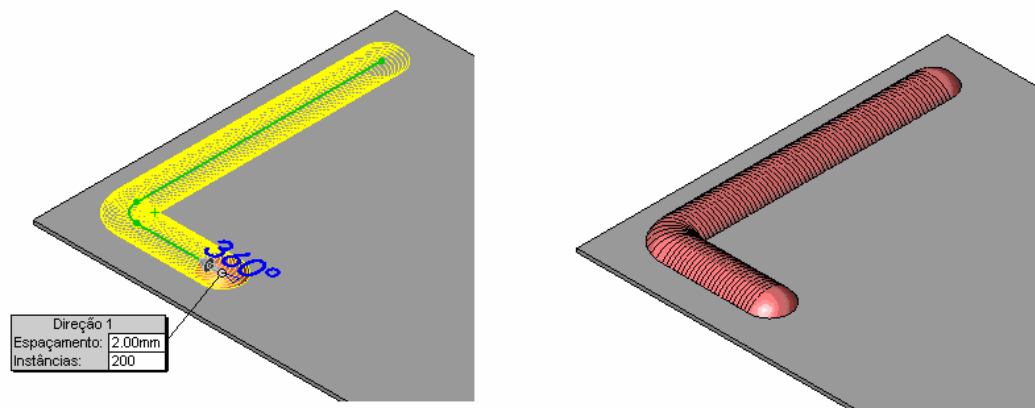


Figura 2.30 – Sobreposição de calotas esféricas formando um cordão de solda.

Fonte: Almeida *et al.* (2007), p.8.

Durante a simulação, a calota é posicionada no ponto onde se encontra o TCP do robô, como pode ser visto na Figura 2.31.

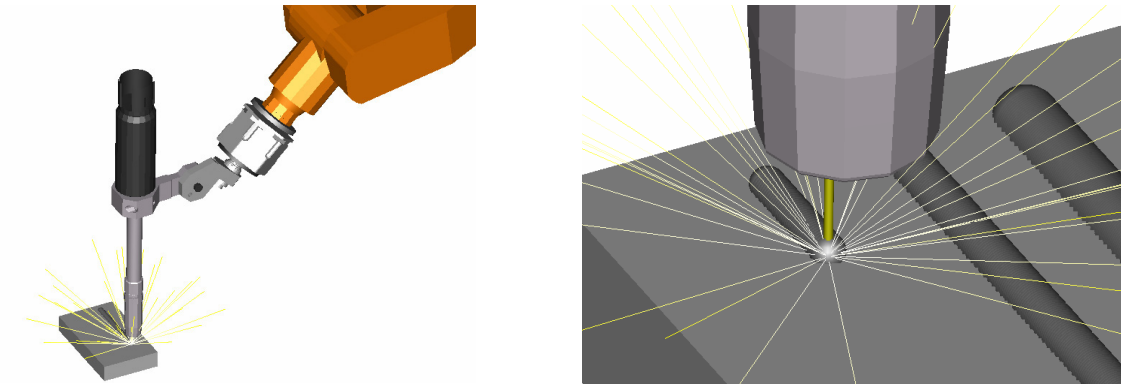


Figura 2.31 - Modelo gráfico do cordão de solda durante a simulação.

Fonte: LIMA II *et al.* (2008), p.3.

Porém, nessa simulação, o cordão de solda assume somente o formato de uma calota esférica e, com base alguns trabalhos anteriormente publicados, como Matsunawa e Ohji (1982), Chan *et al.*, (1999) e Jo *et al.* (2009), percebe-se que não há um consenso sobre a melhor aproximação para a geometria do cordão de solda. Assim, um estudo mais sistemático da geometria do cordão de solda e a definição do real formato de sua seção possibilitariam uma modelagem gráfica mais realista.

No presente trabalho propõe-se que o formato geométrico do cordão de solda varia conforme os parâmetros de soldagem utilizados. Em outras palavras, é possível dizer que o reforço do cordão pode assumir todas as formas geométricas analisadas anteriormente, como elipse, parábola e circunferência dependendo, portanto, das condições de soldagem nas quais o cordão foi feito. De forma a encontrar os melhores parâmetros de geometria de cada curva para cada cordão de solda foram utilizados algoritmos de otimização.

2.7 – Algoritmos de Otimização

A otimização consiste em uma abordagem de um problema complexo através da seleção de valores para um certo número de variáveis inter-relacionadas, concentrando-se em um único objetivo projetado para quantificar o desempenho e medir a qualidade de uma decisão. Esse objetivo consiste em maximizar, ou minimizar, dependendo da formulação do problema, um aspecto adequado de um problema, de modo a oferecer a melhor solução. (Luenberger e Ye, 2008).

Algoritmos de Otimização então são rotinas cujas instruções devem ser executadas a fim de se obter os melhores parâmetros para determinada função característica de um problema. Os algoritmos de otimização podem ser classificados de acordo com seu modo de operação em algoritmos probabilísticos ou algoritmos determinísticos. Algoritmos probabilísticos são algoritmos que possuem ao menos uma instrução que age de forma aleatória. Por isso, algoritmos probabilísticos podem fornecer diferentes resultados a cada execução, para os mesmos parâmetros de entrada. Algoritmos determinísticos são aqueles cujas instruções não são determinadas pelo uso de números aleatórios. Assim, esses algoritmos fornecem sempre o mesmo resultado para os mesmos parâmetros de entrada.

Os algoritmos também podem ser classificados de acordo com suas propriedades, como tempo e precisão, em otimização online e offline. Uma regra geral é que o aumento da precisão implica maior tempo de processamento. Assim, algoritmos de otimização online são utilizados quando os problemas precisam ser resolvidos rapidamente, em questões de poucos minutos ou segundos, à custa de uma menor precisão. Algoritmos de otimização offline são utilizados quando o tempo não é importante e o usuário se permite esperar, talvez até dias, por uma solução mais precisa.

Numericamente, as técnicas de otimização são utilizadas para encontrar um conjunto de parâmetros de projeto, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, que são, em algum aspecto, definidos como ideais. De modo geral, esses parâmetros ideais definem a minimização ou maximização de alguma característica do sistema que depende de x .

Assim, a solução de um problema de otimização é encontrar, dentre todas as soluções possíveis, os melhores parâmetros que minimizam ou maximizam determinada função. Porém, uma função definida em um espaço bidimensional como $f = f(x_1, x_2)$ pode apresentar mínimos e máximos locais, que não correspondem à melhor solução. Uma função de duas variáveis tem um máximo local em (a,b) se $f(x,y) \leq f(a,b)$, quando (x,y) está próximo de (a,b) . O número $f(a,b)$ é chamado máximo local. Se $f(x,y) \geq f(a,b)$, quando (x,y) está próximo de (a,b) , então $f(a,b)$ é um valor mínimo local. Somente quando as inequações anteriores valerem para todos os pontos (x,y) do domínio de f , então f tem um máximo global (ou mínimo global) em (a,b) . Isso pode ser mais facilmente entendido de forma gráfica, como na Figura 2.32.

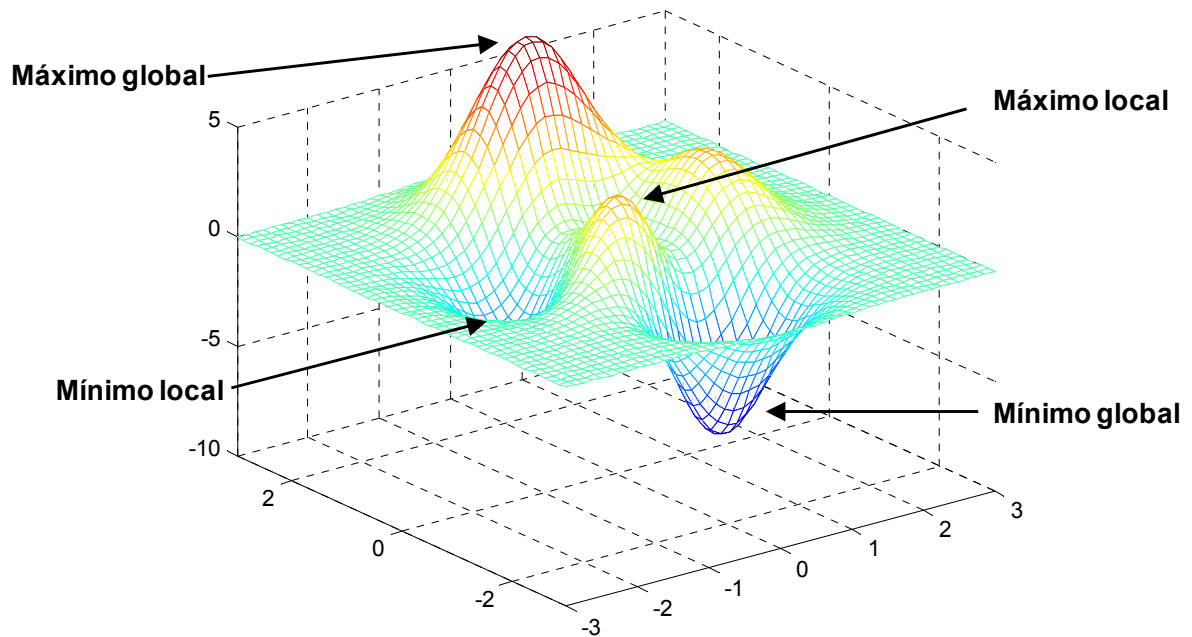


Figura 2.32 – Mínimos e máximos locais e globais em uma função bidimensional.

Quando a função é desconhecida, é impossível distinguir se os valores máximos ou mínimos são locais ou globais sem que se faça uma análise completa no domínio da função. E isso geralmente demanda tempo e esforço computacional.

Nesse caso, a busca pela solução do problema pode ser eficientemente realizada através da técnica de “divisão e conquista” (Divide and Conquer – D&C). Essa técnica consiste em se dividir um problema maior em partes menores até que o problema possa ser resolvido diretamente. Assim, a solução geral é a combinação dos resultados de todos os problemas menores.

Raramente é possível representar plenamente todas as complexidades das interações entre as variáveis, restrições e objetivos de um problema, de modo que, assim como todas as técnicas quantitativas de análise, uma formulação de um problema de otimização deve ser considerada apenas como uma aproximação da solução geral do problema. Assim, habilidade em modelagem, para capturar elementos essenciais do problema e bom senso na interpretação dos resultados são necessários para se obter conclusões significativas. Otimização, então, deve ser considerada como uma ferramenta de conceituação e análise, e não como um princípio que rende uma solução filosoficamente correta. (Luenberger e Ye, 2008).

3. METODOLOGIA

3.1 Ensaio para obtenção dos cordões de solda

Com o objetivo de comparar as metodologias descritas, um robô industrial SK-6, da Motoman, foi utilizado para fabricação de cordões de solda sobre chapa. Os cordões foram soldados pelo processo GMAW sobre chapa de aço-carbono ASTM A36 de 6 mm de espessura. Como consumível utilizou-se arame sólido com diâmetro de 1,0 mm e vazão de gás (15%CO₂/85%Argônio) de 20L/min. A utilização do robô garante que os parâmetros considerados constantes (como *stickout*, ângulo de soldagem, vazão de gás, distância do eletrodo à poça de fusão) permaneçam realmente constantes durante o processo de soldagem.

Foram determinados como parâmetros de entrada dos modelos as seguintes variáveis de soldagem: tensão (V), velocidade de alimentação do arame (v_{alim}) e velocidade de soldagem (v_{sol}). A velocidade de alimentação do arame foi utilizada em substituição ao valor da corrente por ser esse o parâmetro que pode ser diretamente controlado pela máquina de solda. A velocidade de alimentação e a corrente são fortemente relacionadas entre si.

Os parâmetros de saída do modelo que correspondem aos aspectos geométricos do cordão de solda – largura (W) e altura (H) do reforço - foram posteriormente medidos.

Alguns testes foram previamente realizados para definir os valores extremos para os quais a tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem possibilitariam obter um cordão de solda estável e com boas características. Foi observado que para baixos valores de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, o arco elétrico fica instável e a transferência metálica é por curto-circuito, o que é comprovado pelo aspecto do cordão de solda, com intensa formação de respingos. Por outro lado, altos valores de tensão e velocidade de alimentação e baixa velocidade de soldagem caracterizam um cordão de solda muito largo e com grande penetração, que perfurou a chapa. Com base nesses resultados foram definidos os limites e uma faixa de valores aceitáveis foi delimitada.

Os três parâmetros de soldagem – Tensão, Velocidade de Alimentação e Velocidade de Soldagem – foram variados em cinco níveis e, com base na técnica do projeto fatorial, foram

obtidas $5^3=125$ combinações de valores diferentes. Para cada combinação, foi feito um cordão de solda. Os valores dos parâmetros são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Faixa de valores dos parâmetros de soldagem utilizada na fabricação dos cordões de solda sobre chapa.

Tensão (V)	v_{alim} (mm/s)	v_{sol} (mm/s)
17,5	91	6
19,9	113	8
22	136	10
24,3	159	12
26,5	181	14

Para realizar a soldagem e evitar distorções na chapa, foram utilizados dispositivos de fixação para posicionar a chapa e mantê-la rígida durante a soldagem e desenvolveu-se uma sequência ótima de soldagem que possibilitasse a distribuição homogênea de calor sobre a peça, segundo Soares (2006). A sequência de soldagem foi iniciada de dentro para fora, ou do centro para as extremidades, em espiral, conforme mostrado na Figura 3.1.

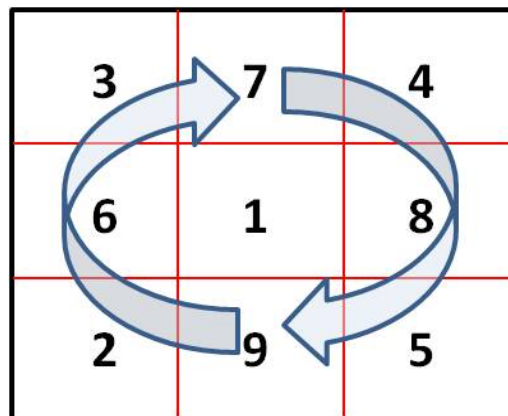


Figura 3.1 - Sequência de soldagem realizada durante o ensaio.

Seguindo essa sequência, foram soldados cinco grupos de cinco cordões com diferentes parâmetros de soldagem em três chapas, num total de 125 cordões de solda. Em cada grupo foram mantidas constantes a tensão e velocidade de alimentação, variando-se apenas a velocidade de soldagem. A Figura 3.2 mostra uma das chapas após a soldagem.

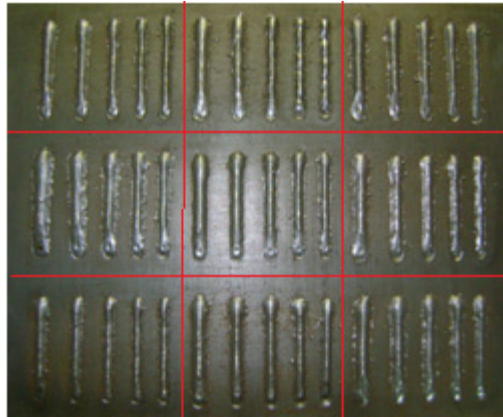


Figura 3.2 - Amostra dos cordões de solda produzidos.

Os cordões foram seccionados na direção transversal e lixados. Foram então feitas imagens com um microscópio da seção dos cordões, para determinação dos parâmetros geométricos. Para obter medidas em milímetros de cada cordão, utilizou-se uma escala milimétrica nas direções horizontal e vertical da seção (considerando que os pixels da câmera não são perfeitamente quadrados), como mostra a Figura 3.3. Assim, foi determinado o correspondente em pixels para cada milímetro real e então foi possível medir as dimensões desejadas.

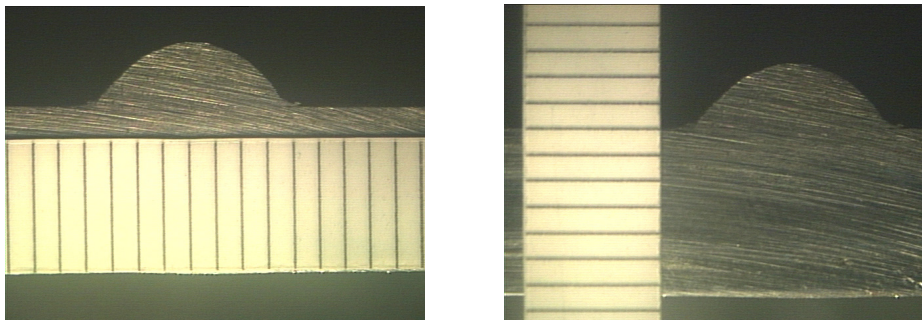


Figura 3.3 - Macrografia de um dos cordões de solda (escala em milímetros).

4. RESULTADOS

4.1 Obtenção das bordas dos cordões de solda

Para se modelar o formato do cordão de solda, as bordas referentes a cada cordão foram extraídas com o uso do algoritmo de Canny (Canny, 1986), a partir das imagens feitas com o microscópio. A Figura 4.1 mostra o algoritmo de Canny aplicado a uma imagem do cordão de solda.



(a)

(b)

Figura 4.1 - (a) Imagem do cordão de solda.

(b) Bordas do cordão de solda identificadas pelo algoritmo de Canny.

A imagem obtida pelo algoritmo de Canny foi então trabalhada de modo a se obter somente a curva representativa da borda do cordão de solda, como mostrado na Figura 3.5.



Figura 4.2 - Curva representativa da borda do cordão de solda.

Para se ajustar curvas matemáticas à borda do cordão de solda e realizar uma análise quantitativa desse ajuste é necessário transcrever a imagem da borda do cordão de uma forma numérica. A curva da Figura 4.2 pode ser representada matematicamente por uma matriz

(1,1), (2,2), (3,3), (4,4), (5,5), (6,6), (7,7), (8,8), (9,9), (9,10), (10,11), (10,12), (11,13),
 (11,14), (12,15), (12,16), (12,17), (11,18), (11,19), (10,20), (10,21), (9,22), (9,23), (8,24),
 (7,25), (6,26), (5,27), (4,28), (3,29), (2,30), (1,31)

As coordenadas de cada par ordenado são separadas e armazenadas em dois vetores, x e y, como pode ser visto abaixo nos vetores posição referentes à matriz da Figura 4.3.

$x=[1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 9 \ 10 \ 10 \ 11 \ 11 \ 12 \ 12 \ 12 \ 12 \ 11 \ 11 \ 10 \ 10 \ 9 \ 9 \ 8 \ 7 \ 6 \ 5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1]$

$y=[1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21 \ 22 \ 23 \ 24 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 29 \ 30 \ 31]$

Isso é feito com o comando *find* do MATLAB®, que percorre toda a matriz em busca do elemento que se quer encontrar, retornando suas coordenadas. Com esses dois vetores é possível plotar uma curva exatamente igual à imagem e, a partir dessa curva, são feitos os ajustes da forma do cordão, seja por uma parábola, elipse etc.

4.2 Algoritmos de ajuste da geometria dos cordões de solda

Dentre os parâmetros envolvidos em um processo de soldagem, sabe-se que de maneira geral a geometria de um cordão de solda é fortemente influenciada pela tensão, corrente e velocidade de soldagem. A corrente, assim como a velocidade de alimentação do arame, e a velocidade de soldagem são os parâmetros frequentemente utilizados para controlar o tamanho de um cordão de solda, pois determinam a quantidade de metal depositado, como pode ser visto nas Figuras 4.4 e 4.5. Já a tensão tem influência direta no formato do cordão de solda, como pode ser visto na Figura 4.6. Todos os cordões possuem os mesmos valores de velocidade de alimentação (91 mm/s) e velocidade de soldagem (6,0 mm/s), somente a tensão foi variada.

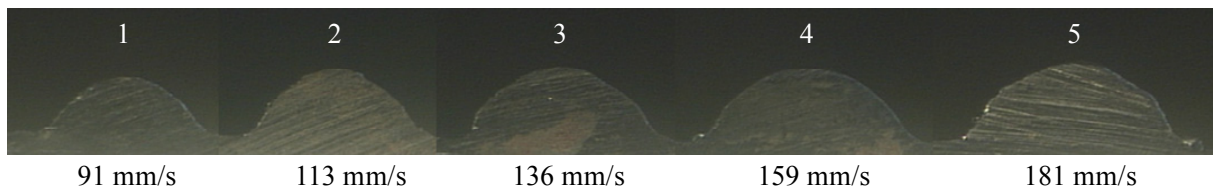


Figura 4.4 - Efeito da variação da velocidade de alimentação no tamanho do cordão de solda. Tensão de 17,5 V e velocidade de soldagem 8,0 mm/s.

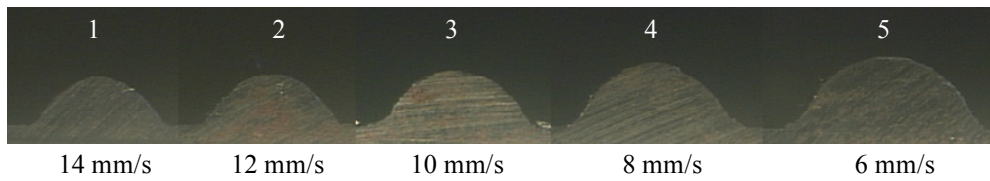


Figura 4.5 - Efeito da variação da velocidade de soldagem no tamanho do cordão de solda Tensão de 17,5 V e velocidade de alimentação 113 mm/s.

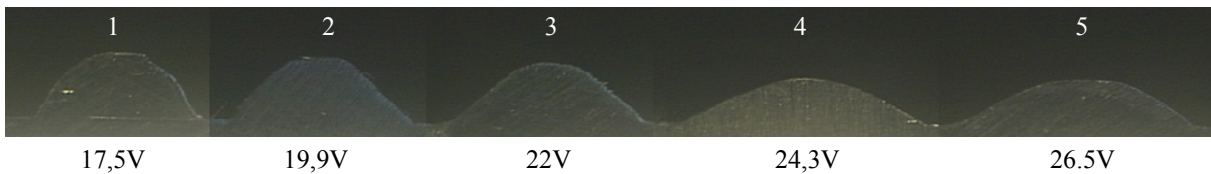


Figura 4.6 - Efeito da variação da tensão no formato do cordão de solda Velocidade de alimentação de 91 mm/s e velocidade de soldagem de 6,0 mm/s.

Assim, para determinar qual forma geométrica que mais se aproxima da forma da seção do cordão, foram desenvolvidos algoritmos capazes de analisar quantitativamente a qualidade dos ajustes da geometria do cordão de solda.

4.2.1 Ajuste Parábola

As parábolas foram ajustadas às bordas das seções dos cordões de solda utilizando a ferramenta *Curve Fitting Tool*, do MATLAB®, como mostra a Figura 4.7.

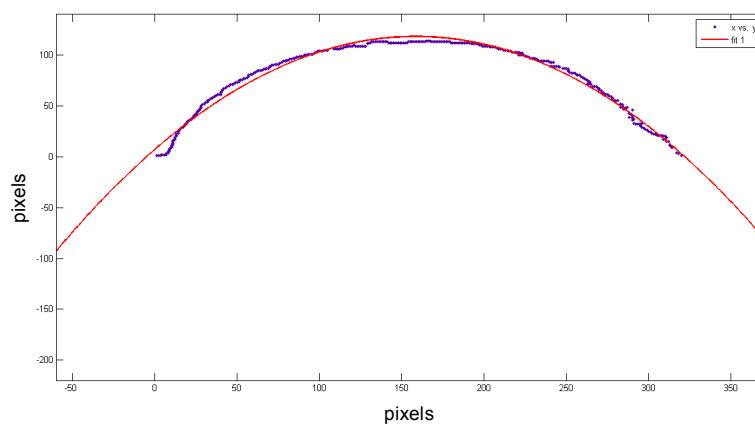


Figura 4.7 – Ajuste do cordão de solda por uma parábola.

Os parâmetros da equação da parábola (36) que melhor se ajusta a cada cordão foram definidos de acordo com o maior valor do coeficiente de determinação (R^2).

$$F(x) = P_1 x^2 + P_2 x + P_3 \quad (36)$$

Uma vez determinados os valores dos coeficientes P_1 , P_2 e P_3 da equação da parábola, um algoritmo que calcula a distância entre os pontos da parábola e os pontos na borda do cordão de solda foi aplicado. O algoritmo plota uma parábola com os parâmetros da curva referente à borda do cordão de solda e calcula o erro baseado na distância entre cada ponto da imagem e o ponto mais próximo da curva ajustada. Ou seja,

$$\text{dist} = (x_{\text{curva}} - x_{\text{borda}})^2 + (y_{\text{curva}} - y_{\text{borda}})^2 \quad (37)$$

A soma das distâncias obtidas corresponde ao erro do ajuste. Assim, quanto menor a distância entre os pontos, melhor o ajuste do cordão de solda à parábola. A Figura 4.8 mostra exemplos de erros obtidos com esse ajuste.

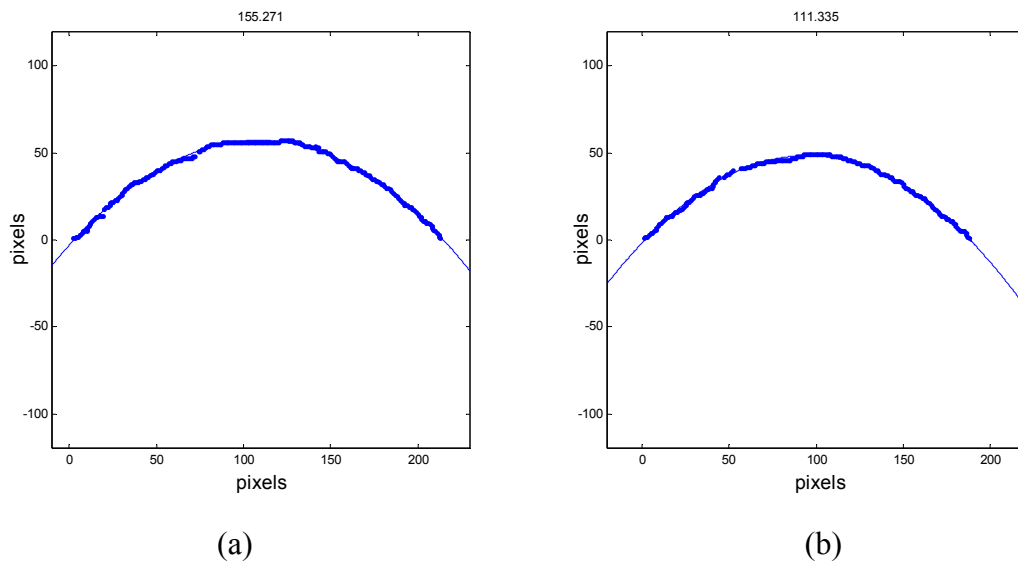


Figura 4.8– Exemplos de ajustes do cordão de solda por uma parábola. (a) Erro = 155,271 pixels. (b) Erro = 111,335 pixels.

4.2.2 Ajuste Elipse

Os algoritmos de ajuste da elipse foram desenvolvidos baseados em algoritmos de otimização. O algoritmo plota uma elipse que se deseja ajustar à curva referente à borda do cordão de solda e calcula o erro baseado na soma das distâncias entre cada ponto da imagem e o ponto mais próximo da elipse ajustada, conforme a equação (37).

A fim de minimizar esse erro, o algoritmo calcula a distância para diferentes valores dos parâmetros da elipse na vizinhança dos parâmetros anteriormente calculados, de modo a encontrar uma menor distância entre os pontos da imagem e a nova elipse ajustada. Quanto menor a distância, menor o erro e, assim, melhor o ajuste da elipse à borda do cordão de solda. O algoritmo é repetido até que não seja possível encontrar uma melhor solução na vizinhança. Um exemplo desse ajuste feito no software MATLAB® pode ser visto na Figura 4.9.

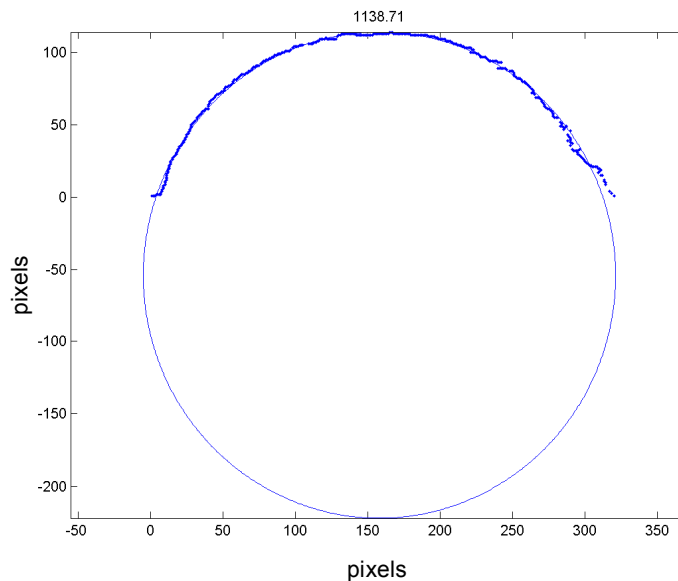


Figura 4.9 – Ajuste do cordão de solda por uma elipse (Erro = 1138,71 pixels).

Porém, nem sempre o menor erro encontrado corresponde à elipse que melhor se ajusta à borda do cordão (Figura 4.10(a)), devido à existência de mínimos locais. Por isso, é necessário o uso de refinamentos sucessivos, o que demanda tempo e esforço computacional.

Uma busca completa no domínio da função poderia ser realizada, porém o tempo gasto com o ajuste de apenas um cordão seria o equivalente a alguns dias. Considerando que o presente trabalho consiste de 125 cordões de solda, uma busca completa seria, portanto, inviável.

Sendo assim, foi usada a técnica anteriormente descrita de “Divisão e Conquista”. Primeiro, são testados diferentes valores para largura (2a), altura (2c) e as coordenadas x e y do centro da elipse. Os valores de erro são calculados variando-se uma janela de pixels em cada parâmetro. Assim que é encontrado o conjunto de parâmetros que fornece um menor erro, o algoritmo passa a testar uma faixa menor de valores, porém com uma precisão maior (Figura 4.10(b)).

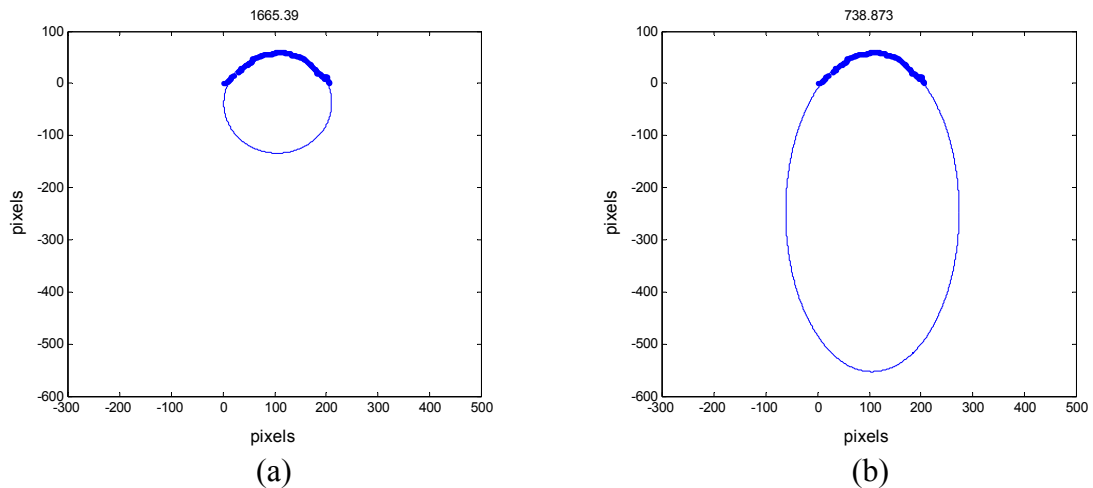


Figura 4.10 – Melhor ajuste obtido pelo algoritmo de otimização para um mesmo cordão. (a) Sem a utilização de refinamentos sucessivos (Erro = 1665,39 pixels). (b) Com a sua utilização (Erro = 738,873 pixels).

Essa técnica não realiza uma varredura total do domínio da função, ou seja, não se pode afirmar que o mínimo encontrado corresponde ao mínimo global da função. Porém, para os propósitos deste trabalho, o algoritmo desenvolvido forneceu resultados visivelmente satisfatórios ao ajustar uma elipse à borda do cordão de solda.

Através da análise dos ajustes do cordão de solda por uma parábola e por uma elipse foi possível confirmar a afirmação feita por Chan *et al.*(1999), na qual ele conclui que, apesar de fornecer uma aproximação razoável, nenhum dos dois modelos corresponde realmente ao formato do reforço. Enquanto a elipse tende a superestimar a área depositada, a parábola tende a subestimá-la.

Logo, no presente trabalho, o ajuste por uma elipse foi descartado uma vez que a parábola apresentou um ajuste ao cordão de solda com menor erro.

4.2.3 Ajuste por uma Equação de 4º grau

Em determinadas combinações dos parâmetros de soldagem utilizados, foi observado que a geometria do cordão de solda resultante não se ajustava de forma satisfatória às curvas de uma elipse ou de uma parábola. Essa situação é caracterizada por um cordão de solda com pequeno ângulo de contato com a superfície (θ), ou seja, com melhor molhabilidade. Como exemplo, as Figura 4.11 e 4.12 mostram respectivamente, para um mesmo cordão de solda, os ajustes obtidos pela elipse e parábola.

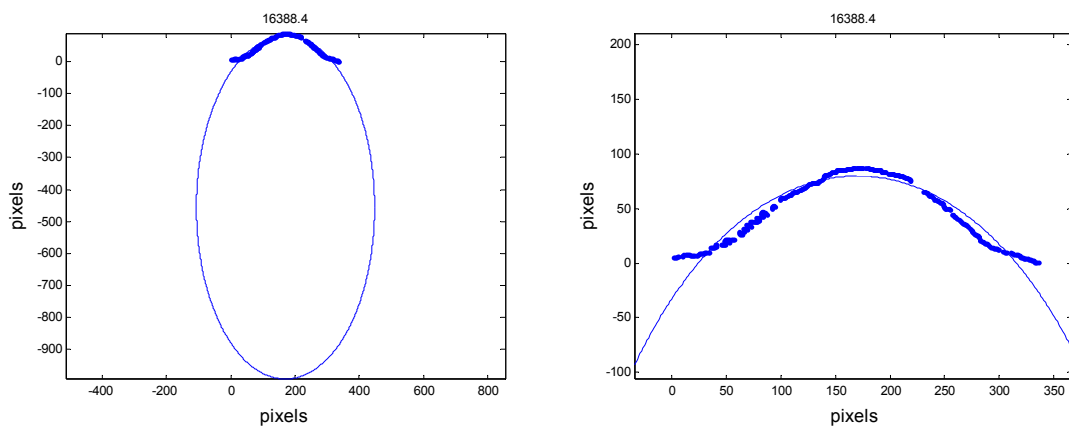


Figura 4.11 – Ajuste por uma elipse de um cordão de solda com boa molhabilidade em diferentes escalas (Erro = 16388,4 pixels).

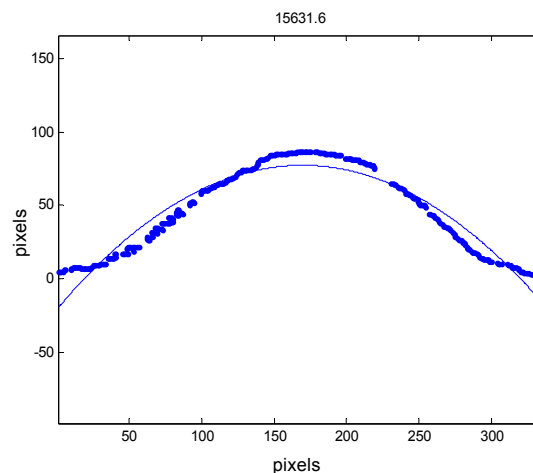


Figura 4.12 – Ajuste por uma parábola de um cordão de solda com boa molhabilidade (Erro = 15631,6 pixels).

Todos os cordões de solda foram então ajustados por uma equação de 4º grau. A Figura 4.13 mostra o ajuste da borda da seção do mesmo cordão para uma curva de 4º grau, para o qual se obteve um erro significativamente menor.

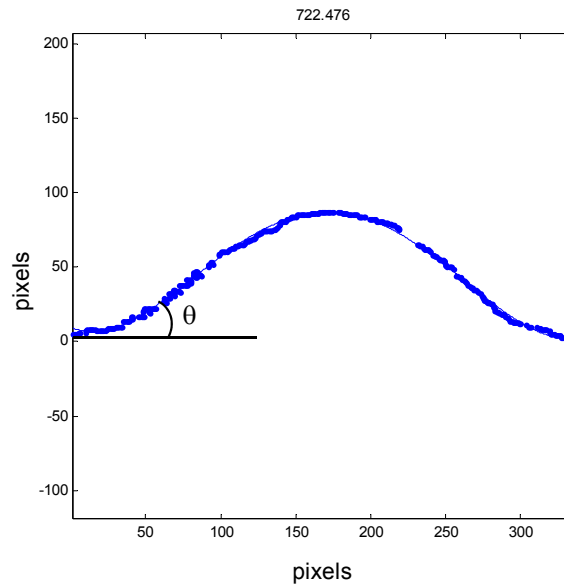


Figura 4.13 – Ajuste de um cordão de solda com boa molhabilidade (pequeno ângulo de contato θ) por uma equação de quarto grau (Erro = 722,476 pixels).

A classificação do cordão em “molha” ou “não molha” foi feita através de uma análise do sinal da segunda derivada da curva que melhor se ajustava ao cordão. Quando o sinal da segunda derivada permanecia negativo ao longo de toda a largura da imagem, ou seja, quando a concavidade da curva estava para baixo em toda a sua extensão, o cordão era considerado como “não molha”. Quando o sinal da segunda derivada se tornava positivo e, portanto, a concavidade da curva mudava, o cordão era classificado como “molha”. As duas situações são exemplificadas na Figura 4.14.

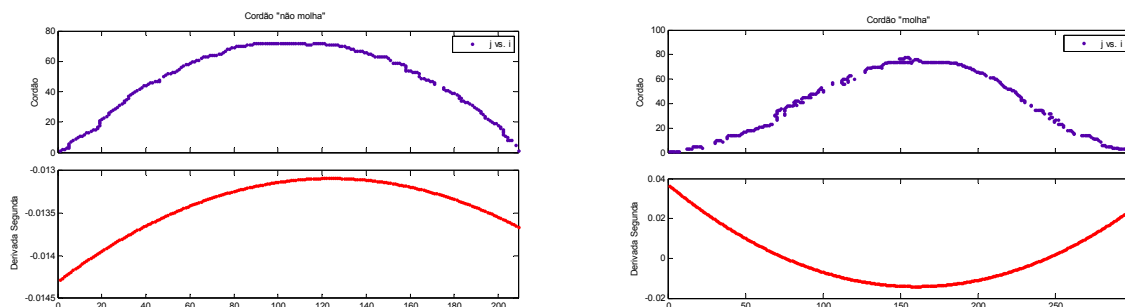


Figura 4.14 – Tela do “Curve Fitting Analysis” do Matlab®. As curvas em azul correspondem ao cordão de solda e as curvas em vermelho representam os valores da derivada segunda.

Diante dessas peculiaridades da forma da seção do cordão de solda e como a parábola, por ter menos parâmetros, não é capaz de modelar cordões com menor ângulo de contato, optou-se por modelar o cordão de solda segundo uma parábola quando o cordão “não molha” ou por uma equação de quarto grau, quando o cordão “molha”.

4;3 Parametrização da geometria dos cordões de solda

4.3.1 Parábola

O cordão de solda pode ser modelado por uma parábola aplicando-se certas restrições de forma que os parâmetros da equação de segunda ordem sejam dados em função da largura (W) e altura (H) do reforço, conforme a Figura 4.15.

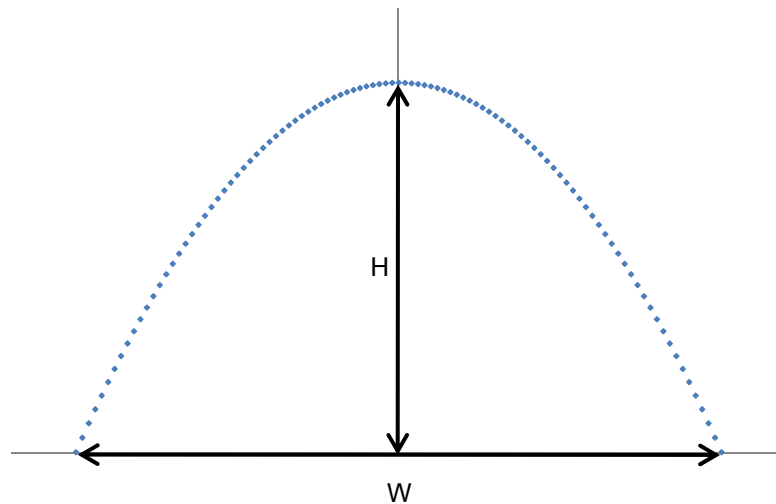


Figura 4.15 – Representação do cordão de solda por uma parábola.

Considerando a equação da parábola como:

$$F(x) = P_1 x^2 + P_2 x + P_3 \quad (38)$$

E aplicando as seguintes restrições:

1. A função $F(x)$ avaliada no ponto zero corresponde à altura do cordão de solda:

$$F(0) = 0 + 0 + P_3 = H \quad \therefore \quad P_3 = H \quad (39)$$

2. A derivada da função $F(x)$ avaliada no ponto zero é igual a zero:

$$\frac{dF(x)}{dx} = 2P_1x + P_2 \quad \therefore \quad \frac{dF(0)}{dx} = P_2 = 0 \quad (40)$$

3. As raízes da função $F(x)$ são $W/2$ e $-W/2$:

$$F(x) = P_1x^2 + H$$

$$F\left(\frac{W}{2}\right) = \frac{P_1W^2}{4} + H = 0$$

$$H = -\frac{P_1W^2}{4} \quad \therefore \quad P_1 = -\frac{4H}{W^2} \quad (41)$$

É possível chegar a uma equação que modela o cordão de solda por uma parábola centrada na origem:

$$F(x) = \left(-\frac{4H}{W^2}\right)x^2 + H \quad (42)$$

Observa-se que essa equação é função somente dos parâmetros largura (W) e altura (H) do cordão de solda.

4.3.2 Equação de 4º grau

Assim como a parábola, a modelagem do cordão de solda por uma equação de 4º grau é feita aplicando-se as devidas restrições de forma que os parâmetros da equação sejam dados em função dos parâmetros geométricos do cordão de solda, como na Figura 4.16.

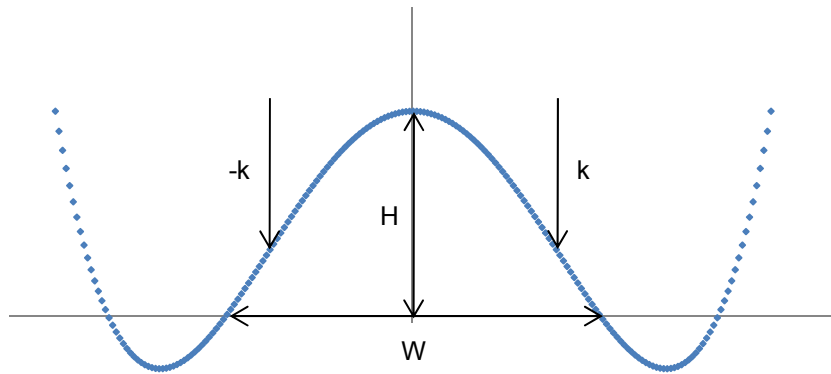


Figura 4.16 – Representação do cordão de solda por uma curva de 4º grau.

Seja a equação de 4º grau:

$$F(x) = P_1x^4 + P_2x^3 + P_3x^2 + P_4x + P_5 \quad (43)$$

1. A função $F(x)$ avaliada no ponto zero corresponde à altura do cordão de solda.

$$F(0) = P_5 = H \quad (44)$$

2. A derivada da função $F(x)$ avaliada no ponto zero é igual a zero:

$$\frac{dF(x)}{dx} = 4P_1x^3 + 3P_2x^2 + 2P_3x + P_4 \quad \therefore \quad \frac{dF(0)}{dx} = P_4 = 0 \quad (45)$$

3. As raízes da segunda derivada função $F(x)$ correspondem aos pontos de inflexão da curva, e tomando-se a curva simétrica, as raízes precisam ser iguais e de sinais contrários:

$$\frac{d^2F(x)}{dx^2} = 12P_1x^2 + 6P_2x + 2P_3$$

$$\text{As raízes dessa equação são do tipo } x = \frac{-6P_2 \pm \sqrt{\Delta}}{24P_1}.$$

Para que as raízes sejam iguais e de sinais opostos, $P_2 = 0$.

Assim $\frac{d^2F(x)}{dx^2} = 12P_1x^2 + 2P_3$ e sendo k um ponto de inflexão da curva,

$$\frac{d^2F(k)}{dx^2} = 12P_1k^2 + 2P_3 = 0 \quad \therefore \quad P_3 = -6P_1k^2 \quad (46)$$

4. As raízes da função $F(x)$ são $W/2$ e $-W/2$:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= P_1 x^4 + (-6P_1 k^2) x^2 + H \\
 F\left(\frac{W}{2}\right) &= P_1 \left(\frac{W}{2}\right)^4 + (-6P_1 k^2) \left(\frac{W}{2}\right)^2 + H = 0 \\
 P_1 \left[\left(\frac{W}{2}\right)^4 - 6k^2 \left(\frac{W}{2}\right)^2 \right] &= -H \\
 P_1 &= \frac{-H}{\left[\left(\frac{W}{2}\right)^4 - 6k^2 \left(\frac{W}{2}\right)^2 \right]} \tag{47}
 \end{aligned}$$

Assim, a equação que modela o cordão de solda por uma curva de 4º grau simétrica e centrada na origem é:

$$F(x) = \frac{-H}{\left[\left(\frac{W}{2}\right)^4 - 6k^2 \left(\frac{W}{2}\right)^2 \right]} (x^4 - 6k^2 x^2) + H \tag{48}$$

Diferentemente da equação (42) baseada na parábola, a equação de quarta ordem (48) não pode ser descrita apenas pelos parâmetros de largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda. Nesse caso é necessário definir um terceiro parâmetro baseado em k .

Esse parâmetro está relacionado com a distância entre os pontos de inflexão da curva ($2k$), que representa a extensão da seção do cordão que apresenta concavidade para baixo.

4.4 Aplicação das Técnicas de Modelagem

Os modelos serão aplicados considerando como parâmetros de entrada: tensão (V), velocidade de alimentação do arame (v_{alim}) e velocidade de soldagem (v_{sol}) e como parâmetros de saída os parâmetros de qualidade que definem a geometria do cordão de solda: largura (W), altura (H) do reforço e um novo parâmetro que será introduzido: a não-molhabilidade (NM) do cordão de solda.

A não-molhabilidade (NM) do cordão de solda, representada pela porcentagem da largura que não molha, foi definida tomando-se o sinal da segunda derivada da curva ajustada à seção do

cordão de solda. O tamanho entre os pontos de inflexão, dividido pela largura total do cordão corresponde à proporção do cordão que não molha. Assim, quando a curva não apresenta pontos de inflexão, é determinado que o cordão não molha, ou seja, $NM = 100\%$.

4.4.1 Modelo de Regressão Quadrática

O modelo de Regressão Quadrática consiste de um vetor de entrada P, constituído pelos parâmetros de soldagem: V, v_{alim} e v_{sol} , e seus respectivos quadrados e/ou combinações desses parâmetros e o vetor de saída Q composto pelos parâmetros de qualidade do cordão de solda obtidos experimentalmente: NM, W, H. O modelo de regressão quadrática é então aplicado na forma:

$$P = [V \quad V^2 \quad v_{alim} \quad v_{alim}^2 \quad v_{sol} \quad v_{sol}^2 \quad 1] \quad (49)$$

e

$$Q = [NM \quad W \quad H] \quad (50)$$

e obtêm-se então

$$[NM \quad W \quad H] = A [V \quad V^2 \quad v_{alim} \quad v_{alim}^2 \quad v_{sol} \quad v_{sol}^2 \quad 1] \quad (51)$$

O modelo foi testado com valores dos parâmetros de soldagem utilizados na fabricação de 120 cordões de solda sobre chapa feitos no laboratório. Os valores referentes aos outros 5 cordões de solda foram separados para testar a capacidade de generalização do modelo. Foram feitos diversos vetores P com combinações diferentes dos parâmetros de soldagem e, para cada vetor P calculou-se o erro médio referente aos valores simulados e experimentais da não-molhabilidade (NM) e da largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda. Foram testados parâmetros que continham algum significado físico, como $V \times v_{alim}$ e $\left(\frac{V \times v_{alim}}{v_{sol}}\right)$, que são proporcionais à potência de soldagem e ao aporte térmico, respectivamente. Porém, os melhores resultados foram obtidos com outros parâmetros, conforme mostrado na Tabela 4.1, onde se encontram apenas algumas das combinações testadas:

Tabela 4.1 - Erro médio obtido através do Modelo de Regressão Quadrática para a não-molhabilidade (NM), largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda associados a diferentes combinações de parâmetros de soldagem.

P	Parâmetros de Soldagem								Erro médio		
									NM (%)	W (mm)	H (mm)
P ₁	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} ²	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	$\left(\frac{V \times v_{alim}}{v_{sol}}\right)$	10,81	0,53	0,14
P ₂	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} x v _{sol}	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	$\left(\frac{V \times v_{alim}}{v_{sol}}\right)$	11,14	0,53	0,14
P ₃	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} x v _{sol}	v _{sol}	v _{sol} ²	V/v _{sol}	v _{alim} /v _{sol}	11,03	0,51	0,14
P ₄	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} ²	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	V x v _{sol}	10,12	0,50	0,14

De forma similar ao utilizado em Lima II *et al.*, 2005, o termo v_{alim}^2 , que é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem, foi substituído por $v_{alim} \times v_{sol}$ a fim diminuir o erro médio. Nessa situação, ao contrário do obtido por Lima II *et al.*, o erro médio teve um pequeno aumento, assim como obtido em Pinto *et al.*, 2010. Neste Trabalho, o vetor P cuja combinação de parâmetros de soldagem apresentou melhor resultado foi:

$$P = \left[V \quad V^2 \quad v_{alim} \quad v_{alim}^2 \quad v_{sol} \quad v_{sol}^2 \quad V \times v_{alim} \quad V \times v_{sol} \quad v_{alim} \times v_{sol} \quad \frac{V}{v_{sol}} \quad \frac{v_{alim}}{v_{sol}} \quad 1 \right] \quad (52)$$

Os valores dos erros médios foram 9,85% NM, 0,48 mm para W e 0,13 mm para H.

Para avaliar a dispersão dos dados, os valores reais *versus* os dados obtidos através do modelo de regressão quadrática que forneceu os melhores resultados para a não-molhabilidade, largura e altura do reforço do cordão de solda foram plotados. A reta que melhor se ajusta foi calculada usando regressão linear, como mostrado na Figura 3.16. O coeficiente de correlação foi 0,45 para a molhabilidade e tanto para largura quanto para altura do reforço foi 0,86.

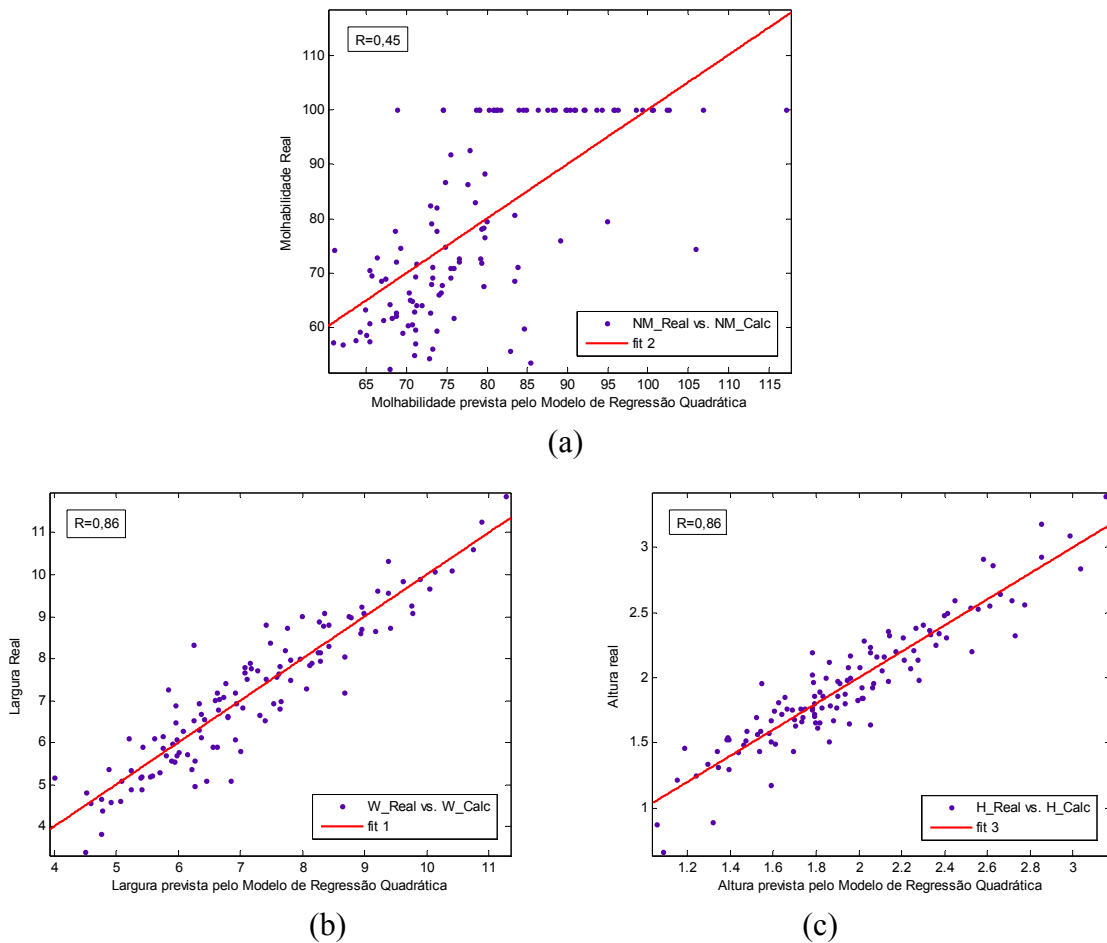


Figura 4.17. Retas que melhor se ajustam aos dados reais versus previstos pelo Modelo Quadrático para (a) Não-Molhabilidade, (b) Largura e (c) Altura do reforço do cordão de solda.

A variação do erro médio de acordo com a escolha dos parâmetros de soldagem comprova o caráter empírico do Método de Regressão Quadrática. Porém, apesar de pouco precisa, a equação obtida expressa um parâmetro geométrico do cordão em função das variáveis de soldagem. Assim, é possível inferir a sensibilidade da não-molhabilidade, largura e altura do reforço do cordão de solda derivando a equação em relação a cada uma das variáveis consideradas, como em Henriques *et al.*, 2006.

A fim de testar a capacidade de generalização do Modelo Quadrático, novos dados referentes aos 5 cordões de solda que não foram utilizados para a construção da matriz A dos coeficientes do modelo foram simulados. Os novos dados foram aplicados aos mesmos vetores P da Tabela 3.2. Os resultados da simulação encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Erro médio obtido através de uma simulação utilizando o Modelo Quadrático para a não-molhabilidade (NM), largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda.

P	Parâmetros de Soldagem								Erro médio		
									NM (%)	W (mm)	H (mm)
P ₁	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} ²	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	$\left(\frac{V \times v_{alim}}{v_{sol}}\right)$	11,75	0,66	0,14
P ₂	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} x v _{sol}	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	$\left(\frac{V \times v_{alim}}{v_{sol}}\right)$	978,24	55,86	13,54
P ₃	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} x v _{sol}	v _{sol}	v _{sol} ²	V/v _{sol}	v _{alim} /v _{sol}	12,20	0,45	0,14
P ₄	V	V ²	v _{alim}	v _{alim} ²	v _{sol}	v _{sol} ²	V x v _{alim}	V x v _{sol}	12,97	0,55	0,13

Os erros referentes aos valores simulados para o vetor P da equação (52) foram 12,98% de não-molhabilidade, 0,54 mm para largura e 0,14 mm para altura do reforço do cordão de solda.

Em geral, o erro médio para não-molhabilidade, largura e altura do reforço referente aos cordões de solda simulados pelo Modelo de Regressão Quadrática foram próximos aos erros obtidos para os dados usados para a criação do modelo. Isso sugere que o modelo é capaz de generalizar e prever a geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem para aplicações onde a precisão não seja muito relevante.

Um fato interessante surgiu da substituição do termo v_{alim}² por v_{alim} x v_{sol}. Os valores para o erro médio para a simulação atingiram valores muito maiores do que os obtidos para os dados usados na criação do modelo, o que mais uma vez mostra a limitação do método de Regressão Quadrática devido à escolha empírica dos parâmetros do modelo.

4.4.2 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais foram implementadas em Matlab©. Cada rede foi usada para prever somente um parâmetro de qualidade do cordão de solda. Todos os 125 dados de entrada e saída foram normalizados na faixa de [0,1] e o treinamento da rede, que

anteriormente utilizava todos os 125 dados experimentais (Pinto *et al.*, 2010) foi modificado a fim de aumentar a capacidade de generalização da rede. Assim, foram usados 120 dados para treinamento e 5 dados para testar a capacidade de generalização da rede.

Diversas redes foram criadas e testadas variando-se o número de neurônios da única camada intermediária de 1 a 30 e mantendo-se constante a função de transfêrencia como 'logsig', a função de treinamento 'trainlm', a função de aprendizado 'learngd' e a função de performance 'mse'. O método de treinamento com parada antecipada foi usado para identificar o início do excesso de treinamento. Utilizando a função 'dividerand', dos 120 dados foram escolhidos aleatoriamente 90% para treinamento e 10% para validação. Foram utilizados 100 testes de validação.

Observou-se que o erro médio de treinamento tende a diminuir com o aumento do número de neurônios, porém a rede perde sua capacidade de generalização e o erro médio simulado tende a aumentar. A rede com 5 neurônios na camada intermediária apresentou menor diferença entre os valores dos erros de treinamento e os valores dos erros simulados utilizando os 5 dados separados. Isso representa uma boa capacidade de generalização.

Para avaliar a dispersão dos dados, os valores reais *versus* os valores previstos pelas redes neurais com 5 neurônios foram plotados em um gráfico. A reta que melhor se ajusta aos dados previstos e reais foi calculada usando regressão linear e é mostrada na Figura 4.18. Os coeficientes de correlação para não-molhabilidade foi 0,61 e para largura e altura do reforço foram 0,87 e 0,90, respectivamente.

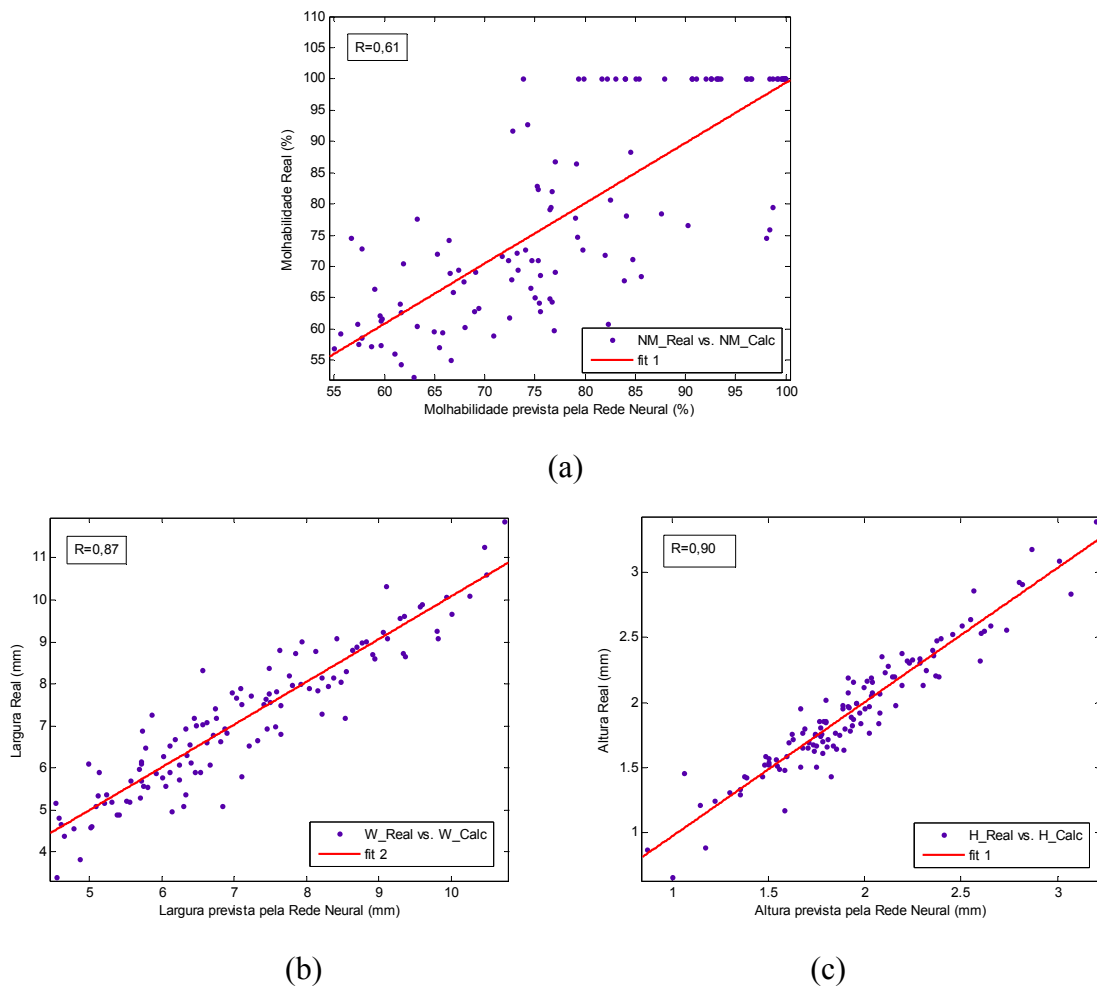


Figura 4.18. Reta que melhor se ajusta aos dados reais *versus* previstos pelas Redes Neurais para (a) Não-Molhabilidade, (b) Largura e (c) Altura do reforço cordão de solda.

4.5 Construção do Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda

Com base nos dados experimentais e considerando a complexidade das relações que governam os parâmetros envolvidos em um processo de soldagem, a técnica da rede neural foi escolhida para construção do modelo de predição dos parâmetros geométricos do cordão de solda a partir das variáveis de soldagem – Tensão, Velocidade de alimentação e Velocidade de soldagem.

Como em Manikya Kanti e Srinivasa Rao (2007), o modelo de predição desenvolvido será baseado em uma única rede neural para prever os 3 parâmetros geométricos do cordão de solda, pois devido à forte inter-relação entre os parâmetros de soldagem e a geometria do

cordão de solda, acredita-se que a solução do modelo deve sempre ser considerada como um todo.

O fluxograma mostrado na Figura 4.19 representa a estrutura do modelo de predição proposto.

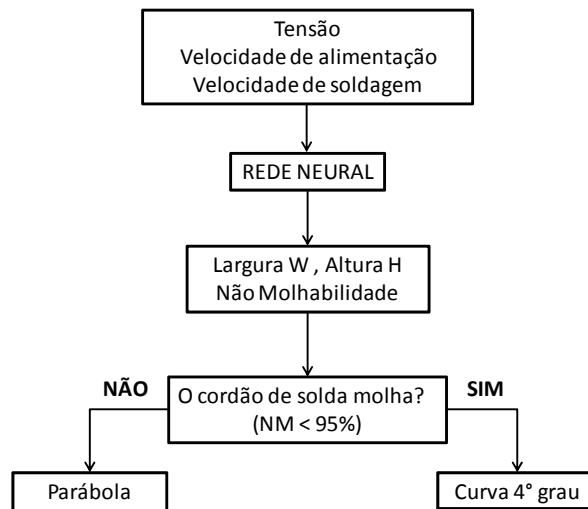


Figura 4.19 – Estrutura do modelo de predição da geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem.

Com os dados referentes aos ensaios obtidos em laboratório devidamente normalizados, criou-se uma única rede neural que utiliza como parâmetros de entrada a tensão (V), velocidade de alimentação do arame (v_{alim}) e velocidade de soldagem (v_{sol}) e possui como parâmetros de saída a não-molhabilidade (NM), a largura (W) e a altura (H) do reforço do cordão de solda, como mostra a Figura 4.20.

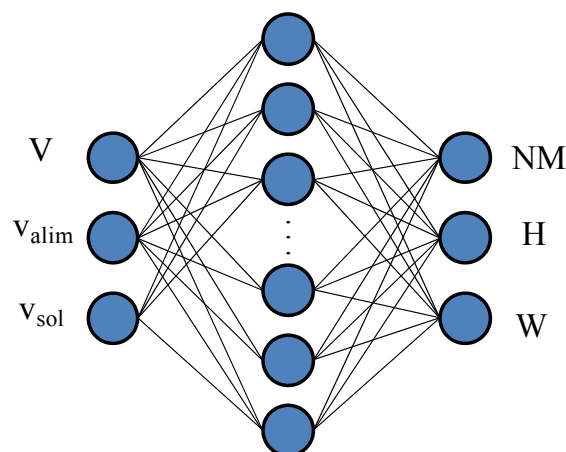


Figura 4.20 – Desenho esquemático da rede neural utilizada no Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda.

Os pesos sinápticos iniciais normalmente são inicializados aleatoriamente e tem grande influência na performance da rede (Braga *et. al*, 2003). Logo, redes com apenas uma camada intermediária, com o número de neurônios variando de 1 a 30 foram sistematicamente treinadas a fim de se obter um conjunto de pesos sinápticos iniciais que forneceria o melhor resultado.

Nota-se que quanto maior o número de neurônios, maior a flexibilidade da rede, pois há um maior número de parâmetros para ser otimizado e assim, menor o erro médio entre o valor real e o valor treinado pela rede. Porém, quanto mais neurônios, maior a probabilidade da rede memorizar os resultados e reduzir a relação entre os parâmetros a uma simples interpolação linear, perdendo assim sua capacidade de generalização. Por isso, o erro médio do treinamento não é um bom parâmetro para a escolha da melhor topologia da rede. A fim de evitar a memorização dos dados pela rede, o método de treinamento com parada antecipada e dados separados para simulação foram utilizados.

Dos 125 dados experimentais, 5 foram separados para testar a capacidade de predição da rede. Dos 120 dados restantes, foram escolhidos, aleatoriamente, 90% para treinamento e 10% para validação. Após treinar a rede utilizando esse método, a rede foi testada com os 5 dados previamente separados para a simulação, que correspondem aos parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros de soldagem correspondentes aos 5 cordões de solda utilizados para a simulação da rede neural.

Cordão	V(V)	Valim (mm/s)	Vsol (mm/s)
1	17,5	113	8
2	19,9	136	10
3	22	181	6
4	24,3	91	12
5	26,5	159	14

Como os valores dos erros de treinamento e de simulação variaram muito em função do número de neurônios, será escolhida uma topologia da rede que tenha fornecido os menores erros de simulação.

Variando-se os parâmetros de treinamento e realizando treinamentos sucessivos, uma rede com 8 neurônios forneceu valores para a os parâmetros geométricos do cordão de solda que se aproximaram mais dos valores reais. Aplicada aos 120 dados de treinamento, a rede neural

forneceu um erro médio de 5,50% para a não-molhabilidade, 0,47 mm para a largura e 0,14 mm para a altura.

Os valores reais e simulados referentes aos parâmetros geométricos do cordão de solda encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores reais e simulados pela rede neural do modelo de predição dos parâmetros geométricos para os 5 cordões de solda.

N° de neurônios	Valores dos Parâmetros Geométricos					
	Não-Molhab. (NM) (%)		Largura (H) (mm)		Altura (W) (mm)	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
8	100,00	99,61	5,90	5,90	2,20	2,22
	61,26	61,83	6,75	6,75	1,92	1,87
	100,00	95,17	9,05	9,05	2,58	2,69
	70,57	72,96	6,18	6,18	1,42	1,24
	76,57	84,74	5,95	5,95	1,84	1,70

Para os 5 cordões utilizados na simulação, o erro médio foi de 3,27% para a molhabilidade, 0,42 mm para a largura e 0,10 mm para a altura. Aplicada a todos os 125 dados, a rede neural forneceu um erro médio de 5,41% para a não-molhabilidade, 0,47 mm para a largura e 0,14 mm para a altura.

Definida a rede, foram simulados a título de exemplo valores da altura do reforço para valores intermediários aos parâmetros de entrada experimentais, de modo a produzir uma maior massa de dados. Os dados foram então plotados em um gráfico 3D (Figura 4.21) para facilitar a visualização de uma tendência que permitisse estabelecer uma relação entre os parâmetros de soldagem e a altura do reforço do cordão de solda e, assim, concluir se a rede estava fornecendo resultados condizentes com o conhecimento empírico da soldagem. Os gráficos foram plotados para valores constantes de tensão.

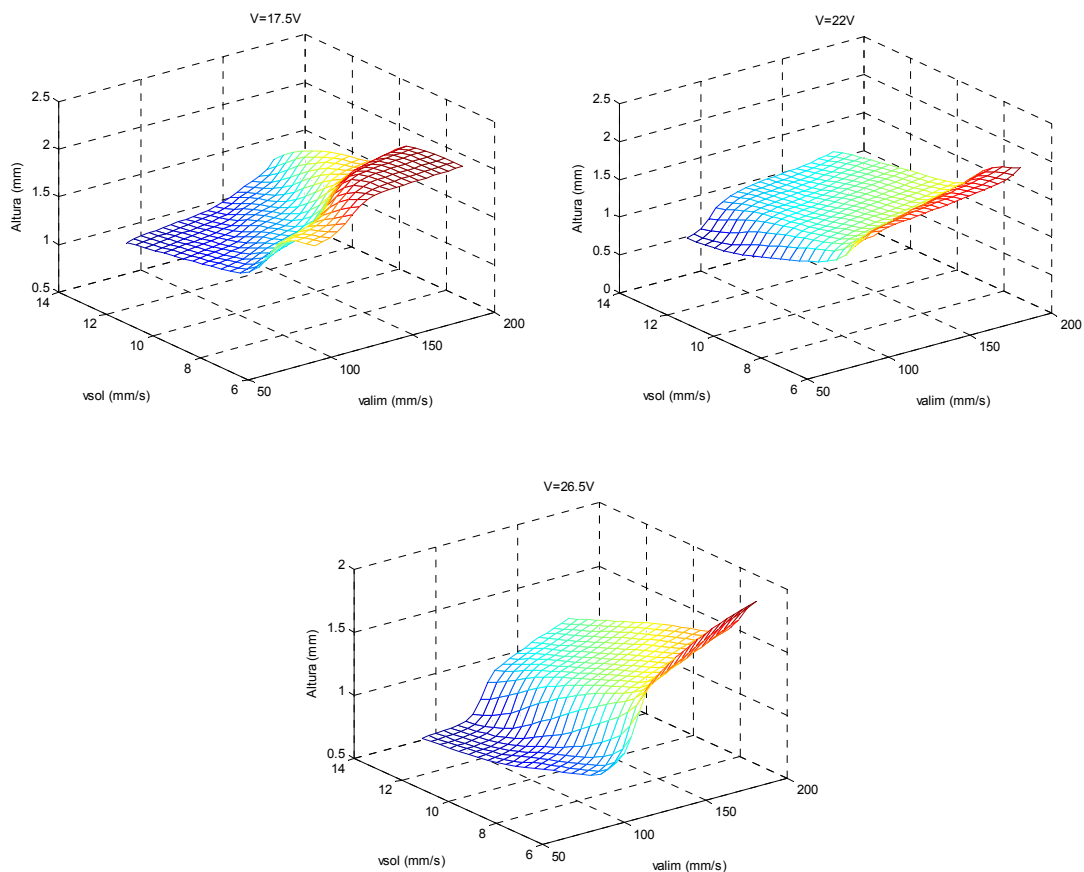


Figura 4.21 – Variação da altura do reforço do cordão em função dos parâmetros de soldagem obtida pela rede neural.

Com os valores simulados para não-molhabilidade será possível definir qual a curva que melhor caracteriza o cordão: parábola, quando o cordão não-molha, ou seja, quando não tem ponto de inflexão, ou uma curva de quarto grau. Uma vez definido o tipo de curva, os valores simulados para largura e altura do reforço do cordão de solda permitirão definir os parâmetros da curva característica que será implementada em um software de simulação gráfica.

4.6 Implementação do Modelo de Predição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda

O modelo de predição do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem foi implementado no *software* MATLAB®. O modelo foi desenvolvido incorporando a rede neural de 8 neurônios que forneceu os melhores resultados de simulação ao método de parametrização da geometria do cordão de solda por uma parábola ou equação de quarto grau.

Considerando os parâmetros de entrada do modelo, a rede neural simula para valores definidos de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, os valores de não molhabilidade, largura e altura do reforço do cordão de solda.

Se a não molhabilidade simulada pela rede neural for maior que 95%, o cordão de solda é modelado por uma parábola, com largura e altura simuladas pela rede. Caso contrário, o cordão de solda é modelado por uma equação de quarto grau.

Para se comparar graficamente os resultados obtidos através do modelo, a borda do cordão de solda real é plotada juntamente com a curva simulada. A Figura 4.22 apresenta o resultado obtido para um cordão real (azul) e simulado (vermelho) para 22,0 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 91 mm/s e velocidade de soldagem de 14 mm/s. O cordão de solda foi modelado por uma parábola.

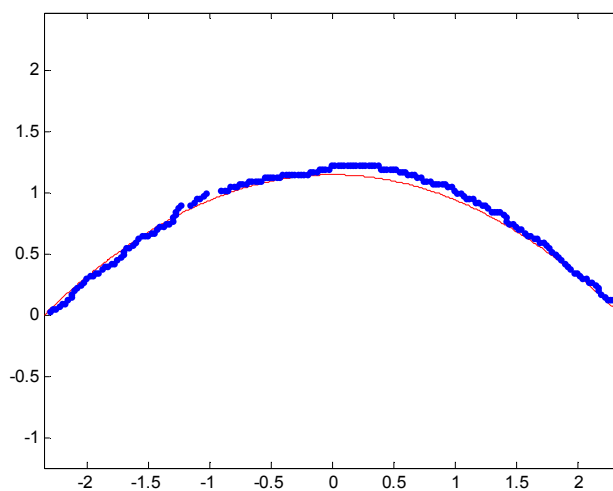


Figura 4.22 – Cordão de solda real (azul) e simulado (vermelho) obtido com 22,0 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 91 mm/s e velocidade de soldagem de 14 mm/s.

A Figura 4.23 apresenta o resultado obtido para um cordão real (azul) e simulado (vermelho) para 19,9 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 136 mm/s e velocidade de soldagem de 12 mm/s. O cordão de solda foi modelado por uma equação de quarto grau.

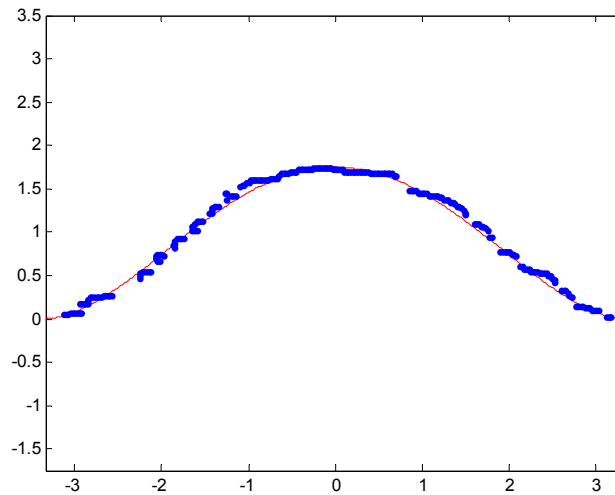


Figura 4.23 – Cordão de solda real (azul) e simulado (vermelho) obtido com 19,9 V de Tensão, velocidade de alimentação do arame de 136 mm/s e velocidade de soldagem de 12 mm/s.

4.6.1 Interface Gráfica – Simulação no Matlab

Utilizando o ambiente de criação de interfaces gráficas do MATLAB®, foi possível criar um programa que facilita a interação do usuário com o modelo de previsão da geometria de cordões de solda.

Ao entrar com as variáveis de soldagem, Tensão, Velocidade de Alimentação do Arame (v_{alim}) e Velocidade de Soldagem (v_{sol}), o programa plota a curva e fornece os valores para a não-molhabilidade (NM), largura (W) e altura (H) do reforço do cordão de solda, como pode ser visto nos exemplos da Figura 4.24.



Figura 4.24 – Diferentes telas obtidas através da Simulação da geometria de cordões de solda a partir dos parâmetros de soldagem. Tela da Interface gráfica criada no MATLAB®.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de predição da geometria de cordões de solda a partir dos parâmetros de soldagem. Para isso, foi necessário definir uma técnica de modelagem e parametrização dos cordões de solda.

Um estudo das metodologias de modelagem de cordões de solda já utilizadas foi feito e as técnicas de regressão quadrática, redes neurais artificiais e lógica Fuzzy foram analisadas.

A escolha da técnica de predição dos parâmetros geométricos do cordão de solda foi fundamentada na precisão dos resultados obtidos e foi observado que, dentre os modelos estudados, Regressão Quadrática, Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy, quanto maior a precisão fornecida pelo modelo, menos informações podem ser obtidas acerca das relações entre as variáveis do processo de soldagem e sua influência na geometria final do cordão de solda.

A lógica Fuzzy, que é capaz de fornecer informações que podem ser traduzidas em uma linguagem mais facilmente entendida pelos soldadores, apresentou menor precisão. O modelo de regressão quadrática, apesar de fornecer uma equação que relaciona os parâmetros geométricos do cordão de solda aos parâmetros de soldagem também não foi capaz de fornecer uma boa precisão. Assim, considerando a complexidade das relações que governam o processo de soldagem, a capacidade de generalização das redes e a maior precisão de seus resultados, a técnica de redes neurais artificiais foi utilizada no desenvolvimento do modelo.

Um estudo acerca da geometria da seção do cordão de solda também foi feito e, assim como outros trabalhos que modelam o formato do cordão de solda, foi visto que os ajustes da seção do cordão de solda se aproximam razoavelmente do formato do cordão, mas nenhum corresponde ao seu formato real.

Considerando as diferentes formas que um cordão de solda pode adquirir dependendo dos parâmetros de soldagem utilizados, para o desenvolvimento do modelo de predição foram aplicados dois tipos de ajustes, fazendo-se necessário definir um parâmetro até então nunca utilizado na modelagem da geometria de cordão de solda: a sua não-molhabilidade. Assim, o formato geométrico da seção do cordão de solda foi definido em função da sua não-molhabilidade, como uma parábola ou como uma curva de quarto grau.

O modelo então consiste da união da rede neural artificial ao modelo de parametrização do cordão de solda. Os parâmetros de soldagem - tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem - foram utilizados como parâmetros de entrada. Os parâmetros de saída do modelo – não-molhabilidade, largura e altura do reforço - definem a geometria final do cordão de solda.

O modelo desenvolvido para a predição da geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem apresentou resultados satisfatórios. O nível de precisão obtido com o uso da técnica de redes neurais artificiais, com um erro médio de 5,41% para a não-molhabilidade, 0,47 mm para a largura e 0,14 mm para a altura é aceitável para as aplicações industriais mais comuns, visto a precisão das medições e a natureza aleatória da deposição de material em um processo de soldagem.

A discrepância entre os erros médios associados à largura e à altura do reforço do cordão de solda pode ser associada às dificuldades de se obter a medida exata da largura, visto que respingos, mordeduras e outros artefatos podem comprometer o processo de medição.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do modelo de predição da geometria de cordões de solda a partir dos parâmetros de soldagem permite concluir que a técnica de Redes Neurais Artificiais, aliada à modelagem do cordão de solda em função da sua não-molhabilidade, como uma parábola ou como uma curva de quarto grau, constitui uma poderosa ferramenta de simulação do processo de soldagem.

O processo de medição dos parâmetros reais da geometria do cordão de solda e a escolha de uma rede neural adequada são de fundamental importância na construção de um modelo preciso.

A escolha da topologia da rede, assim como os pesos sinápticos iniciais têm influência direta na obtenção de um bom modelo. Cuidados com o treinamento da rede, a fim de evitar a memorização dos dados e manter uma boa capacidade de generalização devem ser tomados.

A modelagem do cordão de solda por uma parábola quando o cordão não molha e a modelagem por uma curva de 4º grau quando o cordão molha oferece uma boa aproximação do cordão de solda das situações reais, enquanto a técnica de redes neurais artificiais foi capaz de simular os parâmetros geométricos de forma bastante precisa.

O modelo de predição desenvolvido é capaz de ser aplicado a fim de reduzir o desperdício de material e o tempo gasto com testes e ensaios destrutivos e não-destrutivos, pois permite a verificação das características do cordão de solda antes da realização do procedimento através da simulação do processo de soldagem.

7. TRABALHOS FUTUROS

O modelo de predição da geometria de cordões de solda a partir dos parâmetros de soldagem desenvolvido nesse trabalho utilizando 125 cordões pode ser aprimorado utilizando-se mais dados experimentais, em uma faixa maior de parâmetros de soldagem.

Outros tipos de parâmetros de soldagem podem ser escolhidos como parâmetros de entrada do modelo, variando-se, por exemplo, o *stickout*, fluxo de gás, espessura de chapa etc. de modo a analisar sua influência na geometria final dos cordões de solda.

A geometria do cordão de solda pode ser implementada em um software de simulação 3D, tornando o modelo de simulação mais realista.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida e Evsukoff (2003) – Almeida, P. E. M. e Evsukoff, A. G.; Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações. Cáp.7

Almeida *et al.*, 2007 - Almeida, P. V. ; Oliveira, C. M. ; Lima II, E. J. ; Bracarense, A. Q. . Development of a weld bead geometry library for 3D CAD software based on welding parameters. In: 3er. Encuentro y Congreso Internacional en Tecnología de la Soldadura Industrial, 2007, Saltillo, Coahuila, México. 3er. Encuentro y Congreso Internacional en Tecnología de la Soldadura Industrial, 2007.

Bracarense *et al.*, 2002 - Livro: Bracarense, A. Q.; Felizardo, I.; Lima II, E. J. Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. Cap. 10. 2002

Braga *et al.*, 2000 - Braga, A. P., Ludemir, T. B., Carvalho, A. C., Redes Neurais Artificiais - Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2000.

Braga *et al.*, 2003 - Braga, A. P., Carvalho, A. C., Ludemir, T. B. - Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações – Cáp.6 – Redes Neurais Artificiais, 2003.

Canny, 1986. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, USA, v. 8, n. 6, p.679-689, Nov. 1986.

Chan *et al.*, 1999 - Chan, B.; Pacey, J.; Bibby, M. Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 38, n. 1, p. 43-51, 1999.

Coelho (2010) - Coelho, F. G. Modelagem da Geometria de Cordões de Solda Utilizando Lógica Fuzzy. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Orientador: Eduardo José Lima II

Coelho *et al.* (2010) – Modelagem da geometria de cordões de solda utilizando Lógica Fuzzy. XXXV CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2010, Recife - PE. Anais do XXXV CONSOLDA, 2010

Haykin, 2001 – Haykin, S. - Redes neurais: princípios e prática; trad. Paulo Martins Engel. - 2ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2001.

Henriques *et. al.*, 2006 - HENRIQUES, R. V. B. ; LIMA II, E. J. ; CASTRO, C. A. ; BRACARENSE, A. Q. Análise da sensibilidade da variação dos valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem na geometria do cordão na soldagem de alumínio. XXXII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2006, Belo Horizonte - MG. Anais do XXXII CONSOLDA, 2006.

Jo *et al.* (2009) - Jo, D., Kim, Y., Yang, U., Lee, G.A., and Choi, J.S. Visualization of virtual weld beads. In Proceedings of VRST. 2009, 269-270.

Kim *et al.*, 2005 - Kim, I. S.; Son, J. S.; Park, I. J.; Kim, I. J.; Kim, H. H. An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. Journal of Materials Processing Technology, v. 159, p. 113-118, 2005.

Kim *et. al.*, 1996 – KIM, I. S.; KWON, W.H.; SIORES, E.. An investigation of a mathematical model for predicting weld bead geometry. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.35, No.4, p.385-392, 1996.

Kim *et. al.*, 2001 – KIM, I. S.; PARK, C. E.; CHA, Y. H.; JEONG, Y. J.; KIM, I. K.; KIM, J. Y.; SON, J. S.. JSME International Journal. Series C, Vol.44, No.2, p.561-566, 2001.

Lima II *et al.*, 2009 - LIMA II, E. J. ; BRACARENSE A. Q.; FONSECA, H. C. Simulação em Computador de Cordões de Solda Feitos por Robô Utilizando Redes Neurais Artificiais. Corte e Conformação de Metais 2009, São Paulo, SP. Anais do Corte e Conformação de Metais 2009. São Paulo, SP: Aranda Editora, p. 1-11.

Lima II *et. al.*, 2005 - Lima II, E. J. ; Castro, C. A.; Bracarense, A. Q.; Campos, M. F. M.. Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade. Soldagem & Inspeção, v. 10, n. 4, p. 182-189, 2005.

Lima II *et. al.*, 2008 - Lima II, E. J. ; Oliveira, C. M. ; Dutra, G. G. ; Bracarense, A. Q. Weld metal simulation in a robotic simulation software. Proceedings of the 8th International Trends in Welding Research, 2008, Pine Mountain, Georgia, USA.

Luenberger e Ye, 2008 - Luenberger and Ye, 2008 – Luenberger D.G., Ye Y. Linear and nonlinear programming 3ed., Springer, 2008.

- Manikya Kanti e Srinivasa Rao, 2007 - Manikya Kanti, K. and Srinivasa Rao, P.. Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. Journal of Materials Processing Technology, v. 200, p. 300 – 305, 2008.
- Manikya Kanti *et al.*, 2008 – Manikya Kanti, K. and Srinivasa Rao, P. Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. Journal of Materials Processing Technology, v. 200, p. 300 – 305, 2008.
- Marques *et. al.*, 2007 - Livro: Marques, P. V.; Modenesi, P. J.; Bracarense, A. Q.. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. Ed. UFMG, 2ª Ed, 2007.
- Marya e Marya, 1998 – MARYA, M. e MARYA, S. K.. A Theoretical and Experimental Analysis of Variances in Weld Bead Morphologies. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 7, No. 4, p.515-523, 1998.
- Matsunawa e Ohji, 1982 – MATSUNAWA, A. e OHJI, T.. Role of Surface Tension in Fusion Welding (Parte 1). Transactions of JWRI. Vol. 11, No. 2, p.145-154, 1982. Osaka University.
- McCulloch e Pitts (1943) – McCulloch, W. S. e W. Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, vol.5, p.115-133. (1943)
- Modenesi e Marques, 2006. - Apostila: Modenesi, P. J. e Marques, P. V.. Soldagem I – Introdução aos Processos de Soldagem. 2006.
- Modenesi, 2001 – Modenesi, P. J. Introdução à Física do Arco Elétrico. 2001
- Montgomery e Runger, 2009 – MONTGOMERY, D. C. e RUNGER, G. C.. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4ed. p.235-305. LTC, 2009.
- Pinto *et al.*. Estudo de Metodologias de Modelagem da Geometria de Cordões de Solda. XXXV CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2010, Recife - PE. Anais do XXXV CONSOLDA, 2010.
- Rosenthal, 1941 - Rosenthal, D., 1941. Mathematical Theory of Heat Distribution during welding and cutting. The Welding Journal, Vol.20 (No. 5), 1941, p.220s-234s
- Soares, 2006 - Soares, H. C. G.. Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Thomas Weise (2009) - Thomas Weise, 2006 – Global Optimization Algorithms – Theory and Application. Thomas Weise. Disponível em: www.it-weise.de