

MARINA SPYER LAS CASAS

**MODELAGEM UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA
PREDIÇÃO DA PERCENTAGEM DE FERRITA E PARÂMETROS
GEOMÉTRICOS DE CORDÕES DE SOLDA DE AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS**

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: Prof. Dr. Eduardo José Lima II

Coorientador: Prof. PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação e ao professor Paulo J. Modenesi, por contribuir com seus conhecimentos e pela imensa disposição e boa vontade em ajudar.

Agradeço também à minha família. Principalmente ao meu esposo pelo apoio e se privar de muitas coisas para realizar esse meu sonho e aos meus pais que me ensinaram a importância do estudo com seus exemplos.

SUMÁRIO

1	Introdução	18
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Processo GMAW	23
2.1.1	Variáveis da Soldagem a Arco Elétrico	24
2.1.1.1	Corrente de soldagem	24
2.1.1.2	Polaridade	25
2.1.1.3	Tensão do arco (Comprimento do arco elétrico)	25
2.1.1.4	Velocidade de soldagem	26
2.1.1.5	Extensão do Eletrodo ou Distância do Bico de Contato à Peça	26
2.1.1.6	Orientação do Eletrodo	27
2.1.1.7	Posição de Soldagem	28
2.1.1.8	Diâmetro do arame de adição	28
2.1.1.9	Gás de proteção: tipo e vazão	28
2.1.2	Robotização do Processo GMAW	30
2.2	Metalurgia da Soldagem	31
2.2.1	Transferência de Calor na Soldagem	31

2.2.1.1	Eficiência do Arco.....	31
2.2.1.2	Aporte Térmico	32
2.2.1.3	Ciclos Térmicos na Soldagem.....	33
2.2.2	Macroestrutura da Zona de Fusão	40
2.3	Aços Inoxidáveis	41
2.3.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos	43
2.3.1.1	Microestrutura da Zona Fundida	46
2.3.1.2	Influência da Ferrita nas Características da Solda	49
2.3.1.3	Medição de Ferrita	51
2.3.1.4	Diagramas Constitucionais.....	52
2.4	Redes Neurais artificiais.....	56
2.4.1	Treinamento e Aprendizagem	59
2.4.2	Backpropagation.....	59
2.4.3	Generalização	60
2.5	Redes Neurais na Soldagem	62
2.5.1	Redes Neurais para a predição de FN.....	63
2.5.2	Redes Neurais para a predição das dimensões do cordão de solda	72

3	Metodologia.....	81
3.1	Escolha das variáveis do processo.....	81
3.1.1	Corrente de soldagem	81
3.1.2	Polaridade	81
3.1.3	Tensão do arco (Comprimento do arco elétrico).....	81
3.1.4	Velocidade de soldagem.....	81
3.1.5	Extensão do Eletrodo ou Distância do Bico de Contato à Peça	82
3.1.6	Orientação do Eletrodo	82
3.1.7	Posição da solda	82
3.1.8	Diâmetro e material do arame de adição	82
3.1.9	Gás de proteção: tipo e vazão	84
3.1.10	Metal de Base	85
3.2	Parâmetros de Saída.....	85
3.3	Aplicação das técnicas de modelagem: Redes Neurais Artificiais.....	88
4	Resultados.....	91
4.1	Comparação dos Resultados.....	102
4.1.1	Quantidade de Ferrita	102

4.1.2	Dimensões do Cordão de Solda.....	103
5	Conclusões.....	105
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	108
7	Bibliografia.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Soldagem GMAW (esquemática). Fonte: Modenesi, et al. (2011)	23
Figura 2.2– Equipamento para soldagem GMAW. Fonte: Modenesi, et al. (2006).....	24
Figura 2.3 - Corrente de soldagem versus velocidade de alimentação do arame para eletrodos de Aços Inoxidáveis, serie 300, para arames de diferentes espessuras. Fonte: Welding Handbook: Welding Processes (AWS, 1997).....	25
Figura 2.4 - GMAW Terminologias, adaptado de Welding Handbook: Welding Processes (AWS, 1997).	27
Figura 2.5 - Ângulo de deslocamento. Fonte: Modenesi, (2008)	27
Figura 2.6 - Efeito do ângulo de deslocamento no formato do cordão (esquemático). Fonte: Modenesi, (2008).	28
Figura 2.7 – 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.	30
Figura 2.8 - Valores de eficiência do Arco e dos rendimentos térmicos de alguns processos de soldagem. Fonte: Wainer, et al. (1992), pág. 360.	32
Figura 2.9 - Ciclo Térmico de Soldagem (esquemático) Fonte: Marques, et al. (2011), pág. 89	33
Figura 2.10 - Curvas esquemáticas de repartição térmica em soldas realizadas com diferentes energias de soldagem (H1 e H2). Fonte: Marques, et al. (2011), pág. 90	34

Figura 2.11 - Efeito do pré-aquecimento no ciclo térmico de juntas soldadas. (a) Pré-aquecimento e soldagem sem alterar Ht e v. (b) Pré-aquecimento e soldagem diminuindo Ht e conservando v. (c) Pré-aquecimento e soldagem conservando Ht e aumentando v. Fonte: Wainer, et al. (1992)	37
Figura 2.12 - Linhas isotérmicas na soldagem de chapas grossas (a) e finas (b). Fonte: Wainer, et al. (1992), págs. 362 e 364	40
Figura 2.13 - Regiões de uma solda por fusão (esquemática). (a) Zona Fundida-ZF (b) Zona termicamente afetada - ZTA (c) Metal de Base - MB. Fonte: Marques, et al (2011)	41
Figura 2.14 - Seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com 18% de cromo, válido para teor de carbono inferior a 0,03% (Castro, et al., 1975)	44
Figura 2.15 - Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%. Fonte: Modenesi, (2001).....	47
Figura 2.16 - Relação entre o tipo de solidificação e o Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni. Fonte: Lippold, et al. (2005).....	48
Figura 2.17 - Exemplos de morfologia da ferrita δ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: Modenesi, (2001).....	48
Figura 2.18 - Suscetibilidade a trinca de solidificação da solda em função da composição baseado em dados Varestraint. Fonte: Lippold, et al., (2005).....	49
Figura 2.19 - Diagrama de Schaeffler. A-austenita, F-ferrita, M-martensita. Fonte: Modenesi, (2001).....	52
Figura 2.20 - Diagrama DeLong (FN) para metal de solda de aço inoxidável. Fonte: ANSI\AWS A5.9 (1993)	53

Figura 2.21 - Diagrama WRC-1992 para metal de solda Aço Inoxidável Austeníticos e Duplex. Fonte: Modenesi, (2001).....	55
Figura 2.22 - Diagrama de Balmforth e Lippold. Fonte: Modenesi, (2001)	56
Figura 2.23 - Componentes básicos de um neurônio biológico. Fonte: http://peonies42.lastjune.web.id/neuronio-criativo.html . Acessado em 12/01/2011.....	57
Figura 2.24 - Modelo básico de um neurônio artificial. Fonte: Adaptado de Braga <i>et al.</i> (2000), p.9.	58
Figura 2.25 – (a) Dados ajustados adequadamente (boa generalização) (b) Dados ajustados em excesso (generalização pobre) Fonte: (Haykin, 2001) p.233.....	61
Figura 2.26 – 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.....	62
Figura 2.27 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o conjunto completo dos dados de treinamento para o modelo FNN-1999 e para o diagrama WRC-1992. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	65
Figura 2.28 - Distribuição do Erro para o conjunto completo dos dados de treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	65
Figura 2.29 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	67
Figura 2.30 - Distribuição do Erro para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	67
Figura 2.31 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o modelo ORFN. Fonte: Vitek, et al (2003).....	70

Figura 2.32 - Parâmetros geométricos do cordão de solda. Fonte: Chan <i>et al.</i> (1999), p.44.	75
Figura 2.33 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais da Largura (a), Altura (b), Penetração (c) e Comprimento "Bay" (d) do cordão. Fonte:Chan, et al. (1999)	76
Figura 2.34 – Parâmetros geométricos do cordão de solda. Fonte: Adaptado de Kim <i>et al.</i> (2005), p.114.	78
Figura 2.35 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais do Índice de Convexidade para os dados para treinamento da rede (a) e para os dados para teste (b). Fonte: Manikya Kanti, et al (2008).	80
Figura 2.36 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais da Profundidade de penetração para os dados para treinamento da rede (a) e para os dados para teste (b). Fonte: Manikya Kanti, et al (2008).	80
Figura 3.1 - Programação do robô com os parâmetros de soldagem: Orientação do eletrodo e distância do bico de contato a peça.....	82
Figura 3.2 - Fluxômetro (bibímetro).....	84
Figura 3.3 - Foto de um cordões com escala milimétrica.....	86
Figura 3.4 - Feritscope: equipamento usado para medição do" Ferrite Number".	86
Figura 4.1 - Estrutura das Redes criadas	91
Figura 4.2 - Gráficos retirados do Matlab que mostram o treinamento na rede.....	92
Figura 4.3 - Gráficos que mostram o desempenho da rede para as parâmetros de saída: (a) FN, (b) Largura, (c) Reforço e (d) Penetração do cordão.	94

Figura 4.4 - Simulink: representação por diagramas da primeira rede neural	95
Figura 4.5 - Gráfico mostrando o desvio entre o objetivo e a saída da rede para os cordões separados para testes adicionais.	96
Figura 4.6 - Gráfico do MATLAB que mostra o treinamento da rede.	97
Figura 4.7 - Gráficos que mostram o desempenho da rede para as parâmetros de saída: (a) VWeld, (b) AWeld, (c) Cr Equivalente e (d) Ni Equivalente.	99
Figura 4.8 - Simulink: representação por diagramas da segunda rede neural.	100
Figura 4.9 - Gráfico mostrando o desvio entre o objetivo e a saída da rede para os cordões separados para testes adicionais.	101
Figura 5.1 - Fluxograma que define o processo de soldagem robotizada convencional.	106
Figura 5.2 - Fluxograma que define o processo de soldagem robotizada com a utilização da rede neural artificial criada nesse trabalho.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: Welding Handbook: metals and their weldability, (1998)	45
Tabela 2.2 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN < 18$) para o conjunto completo dos dados para treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	66
Tabela 2.3 - Comparação através do RMS do erro de métodos para predição de FN para o conjunto completo dos dados para treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	66
Tabela 2.4 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN < 18$) para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000).....	66
Tabela 2.5 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000)	68
Tabela 2.6 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados criado para esse trabalho "Novo conjunto de dados" e para o "Conjunto completo dos dados para treinamento" usado no trabalho anterior. Fonte: Vitek, et al (2003)	71
Tabela 2.7 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados suplementar usado no artigo anterior (265 pts). Fonte: Vitek, et al (2003).....	71
Tabela 2.8 - Comparação entre o erro RMS para o conjunto completo de dados para treinamento para diferentes formas para predição de FN. Fonte: Vasudevan, et al. (2003)	72

Tabela 2.9 - Resultado do modelo para predição dos parâmetros geométricos de cordões de solda realizados por Pinto (2011).	74
Tabela 2.10 - Resultado dos modelos para predição dos parâmetros geométricos de cordões de solda realizados por Chan, et al. (1999).	76
Tabela 2.11 - Resultado do modelo para predição dos parâmetros de entrada dos cordões de solda quando se sabe as medidas do cordão desejadas, realizados por Chan, et al. (1999).	77
Tabela 3.1 - Composição de arames, conforme AISI/AWS A5.9 (1993).	83
Tabela 3.2 - Valores de Cromo e Níquel equivalentes para arames ER308LSi, ER309LSi e ER312.	84
Tabela 3.3 - Composição da chapa de Aço Inoxidável Austenítico tipo 304. Fonte: Relatório fornecido pela Arcelor Mittal.	85
Tabela 3.4 - Valores de Cromo e Níquel equivalente para a chapa 304 de acordo com diferentes autores.	85
Tabela 3.5 - Dados utilizados para treinamento da modelo (67 pontos).	86
Tabela 3.6 - Dados utilizados para teste adicional (3 pontos).	88
Tabela 3.7 - Erro Médio Quadrado dos testes adicionais para diferentes quantidades de neurônios da camada escondida.	89
Tabela 4.1 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede.	95
Tabela 4.2 - Valores encontrados pela rede neural 1 para os cordões adicionais.	95

Tabela 4.3 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede para os cordões sobressalentes.....	96
Tabela 4.4 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede.....	100
Tabela 4.5 - Valores encontrados pela rede neural 2 para os cordões adicionais.....	100
Tabela 4.6 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede para os cordões sobressalentes.....	101
Tabela 4.7 - Comparação de vários trabalhos pelo RMS dos pontos utilizados para treinamento da rede.	102
Tabela 4.8 - Comparação de vários trabalhos pelo RMS dos pontos utilizados para teste adicional, ou seja, pontos que até então não foram utilizados durante a elaboração do modelo de rede neural.....	102
Tabela 4.9 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN < 18$) e pra o trabalho atual ($2 < FN < 8$) para o conjunto completo dos dados para treinamento.	103
Tabela 4.10 - Erro Absoluto para o modelo baseado em redes neurais aqui desenvolvido.....	103
Tabela 4.11 - Comparação do trabalho atual com o trabalho de Pinto (2011) para o conjunto de dados para treinamento, conjunto de dados para teste adicional e a soma dos dois conjuntos anteriores.	104
Tabela 4.12 - Comparação entre o trabalho atual com o trabalho de Chan et al. (1999) para o conjunto de dados para treinamento	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
GMAW	Gas Metal Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
AWS	Associação Americana de Soldagem
DCEP	Direct Current Electrode Positive
DCEN	Direct Current Electrode Negative
CCPD	Corrente Continua com Polaridade Direta
CCPR	Corrente Continua com Polaridade Reversa
ZF	Zona Fundida
FN	Ferrite Number
WRC	Welding Research Council
MSE	Mean Squared Error
RMS	Root Mean Square
R	Regression

RESUMO

Esse trabalho investiga um modelo matemático que não exige grande recurso computacional e que define com boa precisão alguns parâmetros de saída mais importantes de uma solda de aços inoxidáveis austeníticos realizada com o processo de soldagem GMA. Os parâmetros de saída considerados mais importantes são a quantidade de ferrita e as medidas de largura, penetração e reforço do cordão de solda. Apesar de uma grande quantidade de fatores influenciarem os parâmetros de saída que se desejam encontrar, foram selecionados três fatores com maior influência para variar. São eles: a tensão, corrente e material do arame. Ou seja, esse modelo pretende avaliar o comportamento para soldas realizadas com diferentes metais de base e de adição. O modelo matemático apresentado se baseia em redes neurais artificiais e duas redes serão apresentadas. A primeira usa como dados de entrada os valores de tensão, corrente e material de adição e como dados de saída a quantidade de ferrita, largura, penetração e reforço do cordão, enquanto a segunda usa a quantidade de ferrita, largura, penetração e reforço do cordão como dado de entrada e tensão, corrente e material de adição como dados de saída. Essa segunda rede poderá ser utilizada pelo operador para programar o robô de acordo com os requisitos desejados para a solda.

Palavras chaves: Soldagem, Aços Inoxidáveis Austeníticos, Ferrita, Simulação Computacional, Redes Neurais.

ABSTRACT

A model was developed based on experimental data obtained under laboratory conditions. To acquire these data we used an industrial robot that made welds with GMAW (Gas Metal Arc Welding) process. Welds were made with different values of voltage, current and filler material while all others parameters were kept constant. The following austenitic stainless steel wires were used: ER 308LSi ER, ER 309LSi and ER 312. All weld beads were performed on AISI 304 plates. The input parameters of the network are Vweld (input parameter that determines the robot welding voltage), Aweld (input parameter that determines the robot welding current) and values of Nickel and Chromium equivalent of wires calculated using the Schaeffler formula.

The quantity of ferrite was analyzed by magnetic methods calibrated according to the AWS standard procedure and therefore will be adopted the term "Ferrite Number" (FN) in place of percent ferrite to identify this variable. In addition to FN, the model predicts the width, reinforcement and penetration of the weld beads.

Keywords: Welding, Austenitic Stainless Steel, Ferrite Content, Neural Network Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante processo de união de metais, sendo utilizada tanto para atividades mais simples, como fabricação de portões e artesanatos, como para atividades de alto grau de responsabilidade, como na indústria microeletrônica e estruturas de milhares de toneladas na construção civil, naval e aeroespacial (Marques, et al., 2011).

A geometria do cordão de solda é um importante fator na engenharia de projetos e de manufatura em uma indústria de fabricação, pois afeta o projeto e determina os custos de estruturas de aço e dispositivos mecânicos. Além da geometria, as propriedades mecânicas da solda também são de extrema importância, principalmente quando se trata de estruturas pesadas ou de alta responsabilidade em que uma falha da solda pode colocar em perigo a vida de seres humanos ou prejuízos ambientais. O conhecimento da microestrutura do cordão de solda permite se conhecer também algumas de suas propriedades. A microestrutura da solda dos aços inoxidáveis austeníticos, utilizados nesse trabalho, se diferem da microestrutura do metal de base por reter quantidades variáveis de ferrita δ . A presença da ferrita δ influencia as propriedades da solda, podendo ser desejável ou não de acordo com a aplicação (Modenesi, 2001).

Os aços inoxidáveis são amplamente difundidos devido à sua grande resistência à corrosão, resistência mecânica elevada, facilidade de limpeza, material inerte, facilidade de conformação e união, baixo custo de manutenção entre outras vantagens. Os aços inoxidáveis austeníticos representam cerca de 65 a 70% do total de aço inoxidável produzido (Modenesi, 2001).

A soldagem a arco elétrico realizada de forma manual é totalmente controlada pela habilidade do soldador. Durante a soldagem, o operador pode monitorar a transferência metálica para a poça de fusão e fazer ajustes imediatos nos parâmetros de soldagem para obter uma boa solda. Esse tipo de soldagem requer soldadores experientes, que sejam capazes de selecionar apropriadamente os parâmetros a fim de se obter uma solda de qualidade.

Para garantir uma solda de qualidade são exigidos testes de qualificação de acordo com a aplicação específica e ensaios destrutivos e não destrutivos são empregados a fim de identificar a microestrutura, quantidade de respingos, 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, o que ajuda a evitar acidentes, com grandes perdas materiais, humanas e danos ambientais.

O uso de sistemas de controle na soldagem a arco elétrico estão cada vez mais sendo utilizados a fim de melhorar a qualidade da solda, minimizar o processo de tentativa e erro, evitar a exigência de um profissional altamente qualificado para realização da solda (o que está cada vez mais escasso no mercado) e garantir uma repetibilidade no processo de soldagem entre outras vantagens (Bracarense, et al., 2002). A soldagem robotizada 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”.

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

O estudo da relação entre os parâmetros de entrada e saída do processo é necessário para que a soldagem seja cada vez mais eficiente e econômica. Modelos que descrevam de forma rápida e eficiente a relação dos diversos parâmetros de soldagem reduzem o tempo gasto com testes e com ensaios destrutivos e não-destrutivos. Esses modelos permitem a verificação das características do cordão de solda somente após a realização do processo, além da necessidade de profissionais com grande experiência.

O modelo pode ser analítico, baseado em equações de conservação que descrevem os fenômenos físicos envolvidos no processo, ou matemático (Kou, 2003). Pode-se citar os seguintes modelos matemáticos: os que utilizam técnicas de regressão, redes neurais artificiais, lógica Fuzzy ou outros algoritmos de aproximação de funções.

Os modelos desenvolvidos devem conseguir prever com certa precisão, a partir de determinadas variáveis do processo de soldagem alguns parâmetros de saída. Ou a partir de alguns parâmetros de saída, os melhores parâmetros de soldagem.

Os modelos analíticos desenvolvidos baseiam-se na teoria de fluxo de calor, principalmente nas equações de 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.

Os modelos analíticos são fundamentais para o entendimento do processo, já que consideram todos os fatores que o influenciam e seu grau de influência. Apesar disso eles não são utilizados na prática para determinação do processo de soldagem, já que a grande quantidade de variáveis desse processo torna as equações extremamente complexas com grande custo computacional e o tempo de processamento da solução, inviabilizando seu uso.

Sendo assim, muitos modelos matemáticos estão sendo desenvolvidos utilizando métodos 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. 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 e dos parâmetros de saída encontrados experimentalmente são utilizadas técnicas que buscam, a partir de relações matemáticas, desenvolver um modelo capaz de simular um processo de soldagem real. As redes neurais artificiais (RNA) são um exemplo desse tipo de modelo.

Os modelos criados podem ser implementados em softwares de simulação robótica para determinar os parâmetros de saída do cordão de solda durante uma simulação de soldagem (Pinto, 2011), permitindo uma escolha mais assertiva dos parâmetros de entrada. Ou, no futuro, no software do robô permitindo sua configuração com os parâmetros desejados de saída do cordão; largura, reforço e penetração do cordão de solda e características microestruturais. Permitir que o robô seja configurado com as características finais do cordão evita grande quantidade de testes e um profissional com menor experiência.

O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de um modelo matemático utilizando redes neurais artificiais que relacione parâmetros de entrada do processo (tensão, corrente e material de alimentação) com parâmetros de saída da solda (largura, reforço, penetração e quantidade de ferrita), sem que sejam necessários grandes recursos computacionais, possibilitando sua implementação em softwares de simulação robótica, software do robô ou utilização como um programa isolado que pode ser para utilização antes da realização da solda robotizada.

Esse trabalho pretende simplificar a soldagem robotizada. O processo de soldagem robotizada passa pelos seguintes passos: As variáveis do processo são definidas (tensão, corrente, velocidade de soldagem, etc.), a máquina é calibrada, as variáveis do robô que correspondem as variáveis escolhidas são encontradas, o robô é programado, verificado se a solda atende as necessidades. Se a solda atender as necessidades o processo é validado, caso não atenda o processo se repete até encontrar uma solda que atenda.

Com a utilização do modelo apresentado antes da realização da solda o processo de soldagem passa a ser: as variáveis do robô são encontradas através do modelo, o robô é programado e o processo é validado.

O modelo desenvolvido foi baseado em dados experimentais realizados em laboratórios. Para aquisição desses dados foi utilizado um robô industrial com 6 graus de liberdade que realiza soldas a partir do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

Os resultados desse trabalho foram comparados a rede neural FNN-1999 que prevê a quantidade de ferrita através da composição química da solda e ORFN que também prevê a quantidade de ferrita através da composição química e taxa de resfriamento. Ambas foram desenvolvida por Vitek, et al. em 2000 e 2003 respectivamente. A parte dos resultados que se referem as medidas do cordão foram comparadas a dissertação apresentada por Pinto (2011) ao programa de pós-graduação em engenharia Mecânica da UFMG.

A seguir são apresentados o Capítulo 2 onde é feita a revisão bibliográfica dos assuntos que motivaram ou influenciaram o desenvolvimento desse trabalho. O Capítulo 3 descreve a metodologia aplicada. O Capítulo 4 apresenta os resultados e os compara com outros trabalhos e Capítulo 5 apresenta as conclusões do autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo GMAW

O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um processo de soldagem a arco elétrico que emprega eletrodo metálico sem revestimento e contínuo sob proteção gasosa inerte ou ativa. O processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando utiliza gás de proteção inerte ou MAG (*Metal Active Gas*) quando utiliza gás de proteção ativo.

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo.

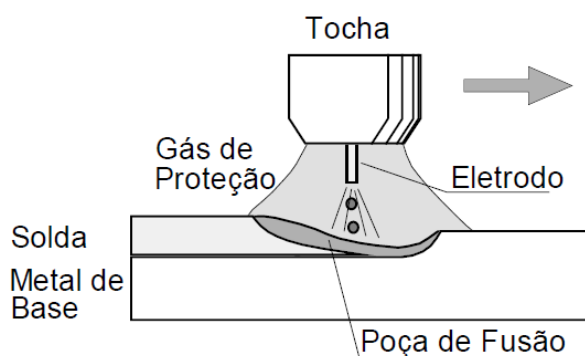


Figura 2.1- Soldagem GMAW (esquemática). Fonte: Modenesi, et al. (2011)

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 2.2.

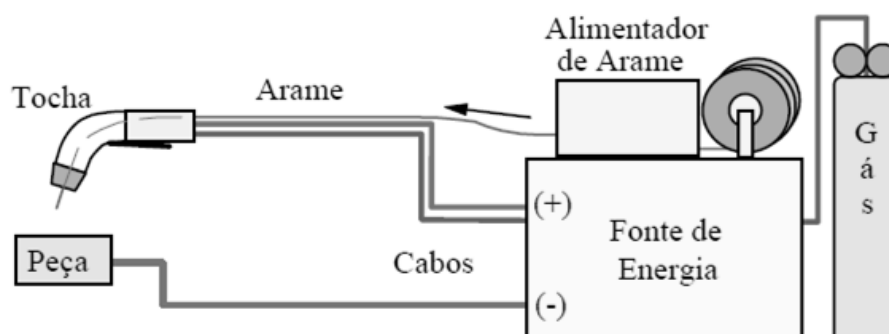


Figura 2.2– Equipamento para soldagem GMAW. Fonte: Modenesi, et al. (2006)

Neste tipo de sistema, a tensão e a velocidade de alimentação do arame permanecem aproximadamente constantes durante a operação de soldagem. 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. Esse é um processo semi-automático bastante versátil, podendo ser facilmente adaptado para a soldagem robotizada. Outras vantagens que fazem que esse processo tenha grande popularidade são: elevada velocidade de soldagem (ou seja, grande produtividade), possibilidade de se soldar em qualquer posição, quase inexistência de escória e fácil abertura do arco.

2.1.1 Variáveis da Soldagem a Arco Elétrico

Existe um grande número de fatores que afetam o formato final do cordão, a microestrutura e as propriedades mecânicas do cordão e outras características do processo. Grande parte dessas variáveis estão entrelaçadas e não é possível modificar uma delas sem ter que modificar outras. Os valores ótimos são afetados pelo tipo de metal de base, composição do eletrodo, posição de soldagem e requisitos de qualidade (AWS, 1997). As principais variáveis da soldagem para o processo GMAW são:

2.1.1.1 *Corrente de soldagem*

A corrente de soldagem varia com a velocidade de alimentação do arame em uma relação não linear. A relação entre velocidade de alimentação e corrente é afetada pela composição química do eletrodo devido às diferentes temperaturas de fusão e

resistividade elétrica do material. A Figura 2.3 mostra essa relação para arames de aço inoxidáveis austeníticos de diferentes diâmetros.

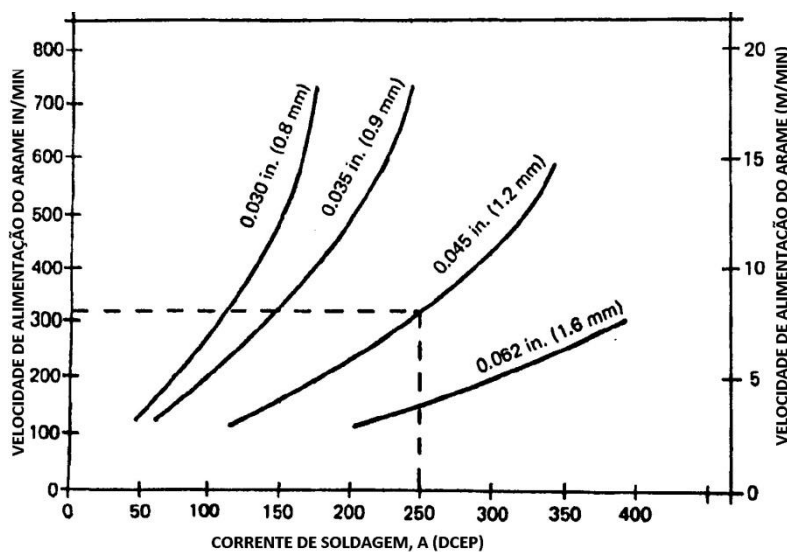


Figura 2.3 - Corrente de soldagem versus velocidade de alimentação do arame para eletrodos de Aço Inoxidáveis, série 300, para arames de diferentes espessuras. Fonte: Welding Handbook: Welding Processes (AWS, 1997)

2.1.1.2 Polaridade

O termo polaridade descreve a conexão elétrica da tocha e peça a ser soldada. Essa variável tem grande influencia no modo de transferência e consequentemente no formato do cordão. Na corrente contínua com polaridade reversa (CCPR ou DCEP) a tocha é conectada ao pólo positivo. Essa é a polaridade mais indicada na soldagem, já que leva a arcos mais estáveis, uma transferência metálica mais suave, boas características do cordão de solda e melhor penetração para uma maior faixa de corrente. Na corrente contínua com polaridade direta (CCPD ou DCEN) a tocha é conectada ao terminal negativo. Nesse caso, existe uma repulsão da gota gerada pelas forças do jato de plasma, que pode fazer com que a gota desvie de sua trajetória normal.

2.1.1.3 Tensão do arco (Comprimento do arco elétrico)

Comprimento do arco é uma variável independente, já a tensão do arco depende de muitas outras variáveis como composição e dimensões do eletrodo e gás de proteção.

Quando todas as outras variáveis são mantidas constantes, a tensão é diretamente relacionada com o comprimento do arco. O comprimento do arco é uma variável crítica e deve ser bem controlada. Arcos muito pequenos para modo de transferência spray e usando argônio como gás de proteção, por exemplo, pode causar curtos circuitos momentâneos, que levam a flutuação da pressão do ar no arco produzindo porosidade ou fragilização devido à absorção de nitrogênio. Quando o arco é muito grande ele tende a desviar-se do caminho, afetando a penetração e superfície do cordão e prejudica a proteção do gás.

O aumento da tensão do arco tende a achatar o cordão e aumentar a largura da zona de fusão. Tensão excessiva causa porosidade, respingos e mordedura. A redução da tensão torna os cordões de solda mais estreitos, com um maior reforço e maior penetração (AWS, 1997).

2.1.1.4 Velocidade de soldagem

Quando todos os outros parâmetros são mantidos constantes a penetração da solda é máxima em uma velocidade de soldagem intermediária. Quando a velocidade de soldagem diminui, o metal de adição depositado por unidade de comprimento aumenta e o arco se encontra mais com a poça de fusão do que com o metal de base reduzindo a penetração e resultando em um cordão de solda mais largo (AWS, 1997).

Quando a velocidade de soldagem aumenta a energia térmica por unidade de comprimento transmitida a solda aumenta no primeiro momento porque o arco age mais diretamente no metal de base. Quando a velocidade soldagem aumenta excessivamente existe a tendência de aparecimento de mordeduras devido ao depósito insuficiente de metal de adição (AWS, 1997).

2.1.1.5 Extensão do Eletrodo ou Distância do Bico de Contato à Peça

A extensão do eletrodo, conforme Figura 2.4, também é uma variável importante durante a soldagem. Entretanto, em um sistema robotizado, seu valor é controlado pelo robô através do ajuste da tensão. Portanto, o parâmetro utilizado para soldas realizadas

por robô é a distância do bico de contato à peça. Essa distância afeta principalmente a proteção gasosa (AWS, 1997).

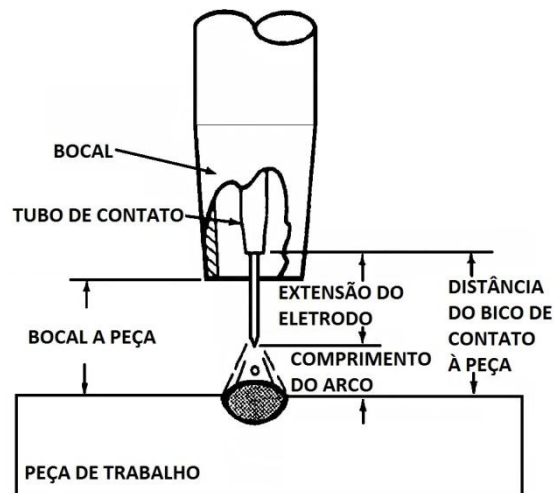


Figura 2.4 - GMAW Terminologias, adaptado de Welding Handbook: Welding Processes (AWS, 1997).

2.1.1.6 Orientação do Eletrodo

A orientação do eletrodo afeta a penetração e formato do cordão mais que a tensão e velocidade de soldagem. A orientação do eletrodo define-se pelo ângulo θ entre a direção de deslocamento e a reta normal à face da solda. De acordo com esse ângulo, o processo será feito “puxando” ($\theta < 0$) ou “empurrando” ($\theta > 0$) a poça de fusão.

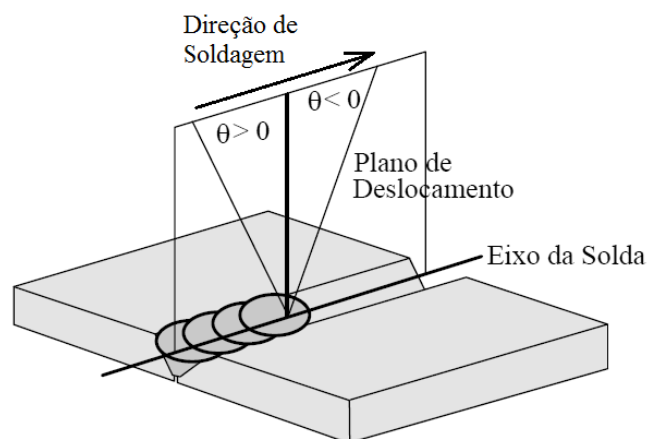


Figura 2.5 - Ângulo de deslocamento. Fonte: Modenesi, (2008)

O cordão realizado com $\theta < 0$, ou seja, puxando a poça, tende a ser mais estreito e a apresentar uma maior penetração. Além disso, essa solda apresenta menos respingo e o arco é mais estável.

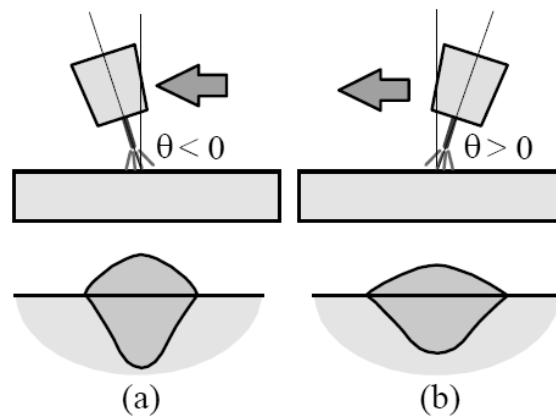


Figura 2.6 - Efeito do ângulo de deslocamento no formato do cordão (esquemático). Fonte: Modenesi, (2008).

Normalmente, utiliza-se um ângulo entre 5 e 15° puxando para melhor controle e proteção da poça de fusão (AWS, 1997).

2.1.1.7 Posição de Soldagem

A soldagem através do processo GMAW pode ser feita em todas as posições (plana, sobrecabeça, vertical ascendente e descendente), desde que adaptados os níveis de energia, tipo de transferência metálica e diâmetro do eletrodo. Arames de pequeno diâmetro (1,1mm ou menor) são ideais para soldas realizadas fora de posição (AWS, 1997).

2.1.1.8 Diâmetro do arame de adição

O diâmetro do arame influencia a configuração do cordão de solda. Arames de maior diâmetro precisam de maiores correntes quando comparado com arames menores de mesmo material e para o mesmo tipo de transferência metálica (AWS, 1997).

2.1.1.9 Gás de proteção: tipo e vazão.

Para proteção da poça de fusão, o ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera, que levam a redução de ductilidade e tenacidade da solda, fissuração, porosidade e inclusões no metal de solda. Podem ser utilizados três gases principais para a proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2) que podem ser misturados com pequenas quantidades de oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2). Somente o Argônio e o Hélio são gases inertes. A escolha do gás ou combinação de gases deve ser feita para garantir a qualidade da solda (ESAB, 2005).

Para a soldagem GMAW de aço inoxidável é recomendado como gás de proteção o Argônio misturado com pequenas porcentagens de oxigênio ou dióxido de carbono (ESAB, 2005).

O Argônio (Ar) é um gás inerte com baixo potencial de ionização, baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica. A alta densidade do argônio em comparação com os outros gases (1,38 em relação ao ar) promove uma maior eficiência de proteção, porque o argônio facilmente substitui o ar em torno da solda. Por ser um gás inerte a proteção à base de argônio promove retenção de elementos de liga no cordão de solda, deixando o cordão de solda livre de inclusões, melhorando as propriedades mecânicas. Além disso, facilita a abertura do arco, melhora a estabilidade em baixas correntes, e facilita o modo de transferência "spray".

O gás oxigênio (O_2) é oxidante e na mistura com argônio suaviza o perfil do cordão de solda, melhorando a qualidade do cordão, principalmente a molhabilidade da poça de fusão pela diminuição da tensão superficial no contato poça fundida/metal de base e pela estabilização da posição da raiz do arco. A adição de pequenas quantidades O_2 ao argônio (até 5%) tem influência sobre a coluna do arco reduzindo a corrente de transição entre os modos de transferência globular para "spray". Quando o nível de oxigênio aumenta na mistura, aumentam também as perdas de elementos de liga, podendo deteriorar as propriedades mecânicas. O "Welding Handbook: Welding Processes" da AWS (1997) indica o uso de argônio com 1% ou 2% de oxigênio para soldagem de aços inoxidáveis com modo de transferência "spray".

2.1.2 Robotização do Processo GMAW

O processo GMAW, por possuir elevada produtividade e principalmente por permitir alimentação mecanizada do arame é freqüentemente robotizado no meio industrial.

No processo GMAW robotizado é feita a programação do equipamento e todos os passos de fabricação são executados por meios mecânicos e/ou eletrônicos, sem qualquer ajuste feito pelo soldador. As tarefas executadas pelo robô 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 2.7 apresenta uma célula robótica com configuração básica para soldagem.

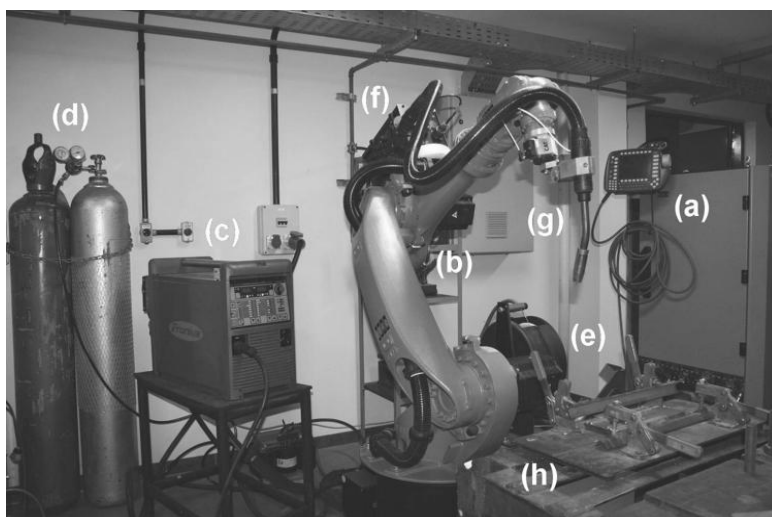


Figura 2.7 – Célula robótica de soldagem. (a) Painel de controle do robô manipulador; (b) Robô manipulador da Soldagem; (c) fonte de soldagem; (d) cilindro de gás; (e) rolo de arame; (f) alimentador de arame; (g) tocha de soldagem e (h) mesa de soldagem com grampos de fixação. Fonte: Acervo do LRSS.

A robotização na soldagem aumenta a produtividade e garante uma repetibilidade do processo, além de melhorar a qualidade e a confiabilidade da junta soldada. O uso de *softwares* de simulação capazes de simular o processo de soldagem torna a aplicação de robôs na indústria cada vez mais viável, principalmente na etapa de implantação do processo onde é reduzido o custo e o tempo gasto em testes e ensaios na junta soldada.

2.2 Metalurgia da Soldagem

2.2.1 Transferência de Calor na Soldagem

A transferência de calor na soldagem pode ser descrita por duas etapas: fornecimento de calor a junta e dissipação desse calor pela peça.

A soldagem pelo processo GMAW precisa de uma quantidade e intensidade de calor suficiente para suprir a poça de fusão de modo a garantir a execução de uma junta soldada de boa qualidade. Uma quantidade de calor acima ou abaixo do esperado gera problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e fenômenos mecânicos que ocorrem na solda.

Marques et al. (2011) informam que a faixa de temperatura da fonte de calor utilizada na soldagem está entre 2.000 e 20.000°C, sua intensidade atinge cerca de $8 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ para o arco elétrico e altos gradientes térmicos, na faixa de 10^2 a $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$, são gerados.

Alguns autores (Wainer, et al., 1992) citam os seguintes fatores como os mais importantes no estudo da transferência de calor em soldas: eficiência do arco elétrico, aporte térmico, distribuição da temperatura, picos de temperatura, tempo de permanência nessas temperaturas durante a soldagem e velocidade de resfriamento da zona de solda.

Os parâmetros eficiência do arco elétrico e aporte térmico são explicados nos itens a seguir. Já os parâmetros distribuição da temperatura, picos de temperatura, tempo de permanência nessas temperaturas durante a soldagem são explicados no item Ciclos térmicos. Na sequência são discutidas formas de calcular a transferência de calor (equação fundamental e outras).

2.2.1.1 *Eficiência do Arco*

Da energia gerada pelo arco elétrico (energia disponível) uma parte é dissipada para a atmosfera sob a forma de calor irradiante, outra pequena fração perde-se por convecção

dos gases que protegem a poça de fusão, uma terceira parte é usada para a execução da soldagem (Wainer, et al., 1992) e outra parcela é utilizada para fundir o arame. Essa característica trás a importância do seguinte parâmetro: eficiência do arco (e_a). Eficiência do arco é a relação entre a quantidade de energia absorvida na soldagem e a energia total fornecida ao arco (Q_t). A fórmula da energia total é dada por:

$$Q_t = V.I \quad 2.1$$

Sendo V a tensão do arco e I a corrente de soldagem. A equação da energia líquida disponível (Q_l) é:

$$Q_l = e_a.V.I \quad 2.2$$

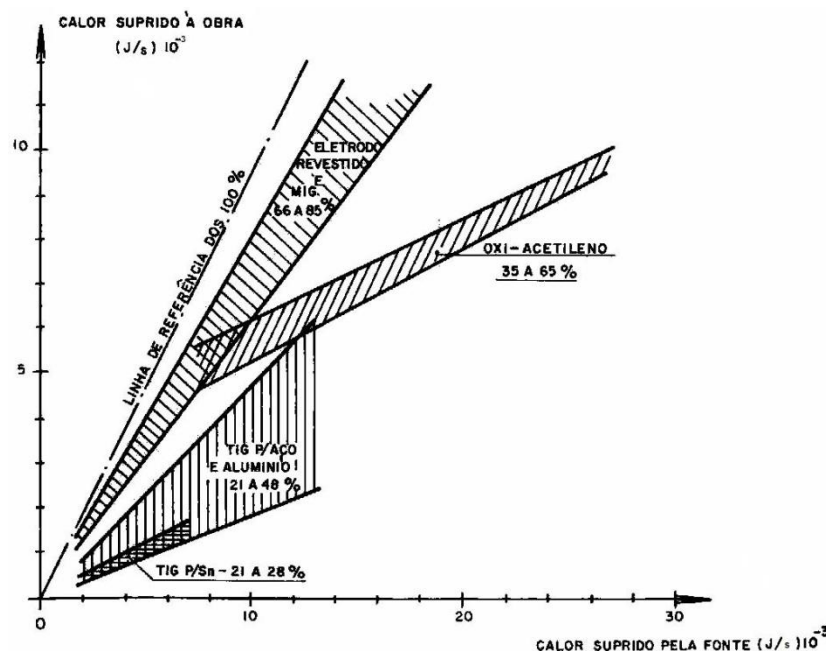


Figura 2.8 - Valores de eficiência do Arco e dos rendimentos térmicos de alguns processos de soldagem. Fonte: Wainer, et al. (1992), pág. 360.

DuPont e Marder (1995) estudaram a eficiência de fusão dos processos de soldagem GMAW, GTAW e SAW e observaram uma forte interação entre a eficiência do arco e a eficiência da fusão. Os autores desenvolveram um relação semi-empírica para a eficiência de fusão sendo está um função da potência líquida do arco e velocidade de soldagem. O metal de base utilizado durante os experimentos foi o aço A36.

2.2.1.2 Aporte Térmico

Aporte térmico ou energia de soldagem é a grandeza que correlaciona a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade de avanço da fonte de calor (v), ou seja, do eletrodo (Wainer, et al., 1992). O aporte térmico pode ser mais facilmente entendido quando descrito como a energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma (Marques, et al., 2011).

Aporte de térmico total:

$$H_t = (V.I)/v \quad 2.3$$

Aporte térmico líquido:

$$H_l = (e_a.V.I)/v \quad 2.4$$

A unidade do aporte térmico (H_t e H_l) na equação acima é J/mm, da tensão (V) é Volts, da corrente (I) é Amperes, e da velocidade de soldagem (v) é mm/s.

2.2.1.3 Ciclos Térmicos na Soldagem

A dissipação do calor ocorre principalmente por condução pela peça da região aquecida para o restante do material (Marques, et al., 2011). A evolução de temperatura em diferentes pontos da peça soldada pode ser estimada teoricamente ou experimentalmente. A curva do ciclo térmico de soldagem mostra a variação de temperatura de um ponto devido à passagem do calor proveniente da fonte de soldagem e pode ser considerado como o tratamento térmico que o ponto sofreu durante a soldagem.

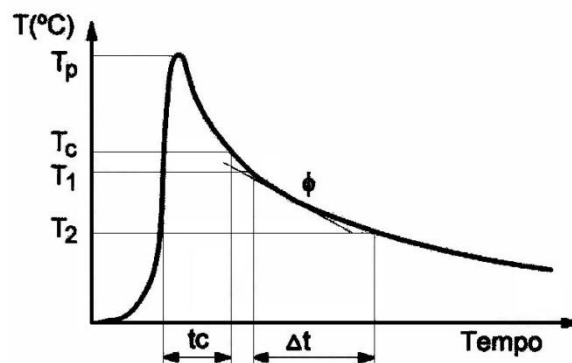


Figura 2.9 - Ciclo Térmico de Soldagem (esquemático) Fonte: Marques, et al. (2011), pág. 89

Existem características importantes do Ciclo Térmico que devem ser observadas, são elas:

- ✓ Temperatura de Pico (Tp): temperatura máxima atingida pelo ponto. Indica a possibilidade de ocorrência de transformações micro estruturais, determinando, assim, a extensão da região termicamente afetada. A Equação 2.5 estima o valor de Tp para soldas de um passe e penetração total (Marques, et al., 2011).

$$\frac{1}{(T_p - T_0)} = 4,133 \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot h}{H} + \frac{1}{T_f + T_0} \quad 2.5$$

Sendo ρ densidade do material, c calor específico do material, h espessura da peça, y distancia do ponto considerado a linha de fusão, T_f temperatura de fusão do material, T_0 temperatura inicial e H é a energia de soldagem. A Figura 2.10 é interessante porque mostra a influência da temperatura de pico na temperatura dos pontos a medida que eles se distanciam do cordão de solda.

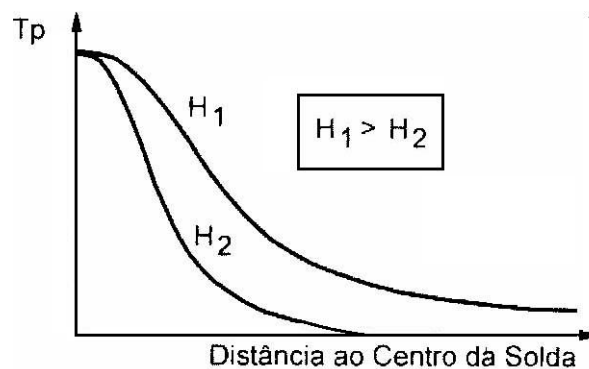


Figura 2.10 - Curvas esquemáticas de repartição térmica em soldas realizadas com diferentes energias de soldagem (H_1 e H_2). Fonte: Marques, et al. (2011), pág. 90

- ✓ Tempo de permanência (t_c): tempo que o ponto fica a uma temperatura acima da temperatura crítica, ou seja, temperatura mínima para ocorrer uma alteração microestrutural ou de propriedades significativas do material (Marques, et al., 2011).
- ✓ Velocidade de resfriamento (ϕ): é a inclinação em uma determinada temperatura (T) da curva de resfriamento. É comum caracterizar a velocidade de resfriamento de uma solda como o tempo necessário para a solda resfriar de uma temperatura (T_1) até outra (T_2). Para a soldagem de aços são consideradas as temperaturas de 800 e 500°C ($\Delta t_{8/5}$) (Marques, et al., 2011).

Os parâmetros que influenciam no ciclo térmico de soldagem são: tipo de metal de base, geometria da junta, espessura da junta, aporte térmico líquido e temperatura inicial da peça (Marques, et al., 2011).

O material de base com elevada condutividade térmica como o cobre e o alumínio, dissipam rapidamente o calor na região da solda o que torna mais difícil a formação da poça de fusão. Por outro lado, materiais com menor condutividade térmica tendem a apresentar gradientes térmicos mais abruptos no aquecimento e menores velocidades de resfriamento, aproveitando melhor a energia térmica para a fusão da área desejada.

Uma junta com maior espessura facilita o escoamento do calor da região da solda até uma espessura limite na qual a velocidade de resfriamento não depende da espessura. O tempo de resfriamento da solda quando esta independe da espessura pode ser calculado pela equação 2.6 (Marques, et al., 2011).

$$\Delta t_{8/5} = \frac{Hl}{2\pi k} \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad 2.6$$

Sendo k a condutividade térmica do material.

Wainer, et al. (1992) explica que a velocidade de resfriamento pode ser obtida pela derivada da equação fundamental da transferência de calor (equações de Rosenthal), equações 2.14 e 2.16 que são apresentadas a seguir. Entretanto, a manipulação dessa equação é muito trabalhosa e outras expressões para casos específicos são apresentadas aqui.

Velocidade de resfriamento da linha de centro de uma união de topo entre duas chapas grossas da mesma espessura, quando se deposita um grande número de passes, usa-se freqüentemente a equação 2.7, que é uma das soluções dadas por Rosenthal.

$$\dot{T} = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{H_t} \quad 2.7$$

Sendo:

- λ condutibilidade térmica do material (J/s.mm.°C)

- T_0 temperatura inicial da chapa ($^{\circ}\text{C}$)
- T_c temperatura a partir da qual se deseja calcular a velocidade de resfriamento ($^{\circ}\text{C}$)
- H_t aporte total de energia (J/mm)

Para chapas finas emprega-se a seguinte expressão, também dada por Rosenthal:

$$\dot{T} = 2\pi\lambda\rho c \left(\frac{h}{H_t}\right)^2 (T_c - T_0)^2 \quad 2.8$$

Sendo:

- ρ densidade do material (g/mm^3)
- c calor específico do material ($\text{J/g}^{\circ}\text{C}$)
- h espessura das chapas (mm)

O aumento do aporte térmico e temperatura inicial da peça diminuem a velocidade de resfriamento influenciando diretamente na microestrutura e propriedade da solda.

A Figura 2.11 mostra como pode ser controlada a velocidade de resfriamento em uma junta soldada de aço estrutural atuando sobre o aporte térmico e o pré-aquecimento. No caso (a), para a junta pré-aquecida e mantendo-se o aporte térmico e velocidade do eletrodo; ocorre uma ligeira diminuição da velocidade de resfriamento a partir da temperatura crítica. No caso (b), a junta foi pré-aquecida e a soldagem executada diminuindo-se o aporte térmico e conservando a velocidade do eletrodo; levando a uma sensível diminuição da velocidade de resfriamento, sendo o controle mais efetivo. O caso (c) mostra uma junta soldada pré-aquecida, executada com o mesmo aporte térmico, mas com uma maior velocidade de soldagem, o que leva a um ciclo térmico de menor duração e, conseqüentemente, o aumento da velocidade de resfriamento, o que pode não ser conveniente para o material em processamento.

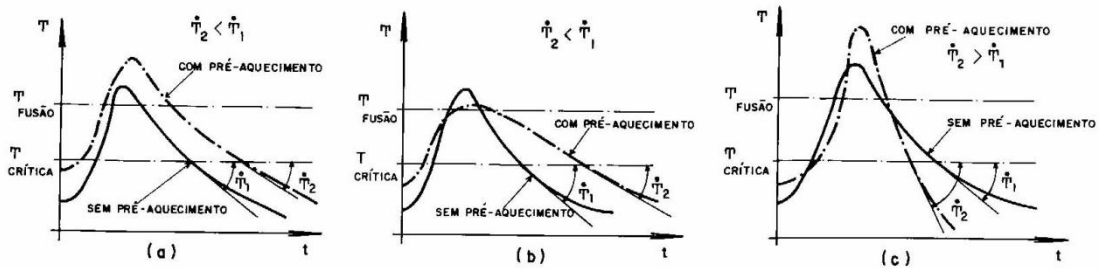


Figura 2.11 - Efeito do pré-aquecimento no ciclo térmico de juntas soldadas. (a) Pré-aquecimento e soldagem sem alterar H_t e v . (b) Pré-aquecimento e soldagem diminuindo H_t e conservando v . (c) Pré-aquecimento e soldagem conservando H_t e aumentando v .

Fonte: Wainer, et al. (1992)

O pré-aquecimento tem o objetivo de diminuir a velocidade de resfriamento de uma junta soldada, como já foi dito, e também de diminuir tensões residuais. O pré-aquecimento em metais com alta condutibilidade térmica, facilita as operações de soldagem.

Os principais parâmetros para especificar um pré-aquecimento são: a espessura da peça, natureza/composição química e condições metalúrgicas do metal, e o nível de restrição a que a junta está sendo submetida, também o processo de soldagem e seu aporte de energia são variáveis importantes.

Equação Fundamental da Transferência de Calor

A condução de calor através de um sólido transiente e referido a um sistema cartesiano tridimensional (x,y,z) é expresso pela equação 2.9.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_0 = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.9$$

Onde:

- T é a variável representando a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- x,y,z são coordenadas cartesianas (mm)
- t é o tempo (s)
- λ_T é a condutibilidade térmica do material, dependente da temperatura ($\text{J/s.mm.}^{\circ}\text{C}$)
- ρ é a densidade do material (g/mm^3)
- c é o calor específico ($\text{J/g.}^{\circ}\text{C}$)
- q_0 é a fonte de calor (j/s.mm^3)

Na soldagem pode-se considerar que não existem fontes no interior do material e condutibilidade térmica do material é constante ($\lambda_T = \lambda$), então a equação 2.9 se transforma nas equações 2.10 e 2.11.

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.10$$

Ou

$$\Delta^2 T = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2.11$$

A expressão $k = \lambda / \rho \cdot c$ é denominada difusividade térmica do material (mm^2/s). A equação 2.10 é conhecida como equação básica de Fourier.

O problema da condução de calor em chapas grossas pode ser resolvido encontrando a solução da equação de Fourier para o caso tridimensional, com uma fonte se deslocando sobre a chapa no regime “quase-estacionário”, ou seja, a distribuição de temperatura é constante para o observador postado sobre a fonte móvel. A coordenada x será então substituída pela coordenada w descrita na equação 2.12.

$$w = x - vt \quad 2.12$$

A equação 2.10 será descrita agora pela equação 2.13 e 2.14.

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = - \frac{v}{k} \frac{\partial T}{\partial w} \quad 2.13$$

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\alpha w} \left[\frac{e^{-\alpha}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\alpha R n}}{R n} + \frac{e^{-\alpha R' n}}{R' n} \right) \right] \quad 2.14$$

Onde:

- $\alpha = v/2k$
- T_0 = temperatura inicial da chapa ($^{\circ}\text{C}$)
- Q = quantidade total de energia disponível na fonte de calor; no caso de um eletrodo seria a grandeza expressa pela equação 2.1.
- $R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$ (mm)
- $R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh - z)^2}$ (mm)

$$- R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh + z)^2} \quad (\text{mm})$$

Já para a condução de calor em chapa finas Wainer, et al. (1992) considera que não há fluxo de calor na direção da espessura da chapa, ou seja, o fluxo é bidimensional nas direções x e y. Ainda admite-se que o regime é quase-estacionário e o movimento da fonte de calor é linear. A equação 2.10 será descrita da seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{v}{k} \frac{\partial T}{\partial w} \quad 2.15$$

A solução geral dessa equação pode ser expressa por:

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\alpha} K_0^{\alpha r} \quad 2.16$$

Onde:

q = quantidade total de energia disponível na fonte de calor linear (J/s.mm)

$$r = \sqrt{w^2 + y^2} \quad (\text{mm})$$

$K_0^{\alpha r}$ = função modificada de Bessel, de segunda espécie e ordem zero e cujos valores são encontrados em bibliografias de matemática aplicada.

O ciclo térmico pode ser conhecido variando o w das equações 2.14 e 2.16, para soldas realizadas em chapas grossas e finas respectivamente. Através das mesmas equações também é possível encontrar as linhas isotérmicas, conforme apresentado na Figura 2.12.

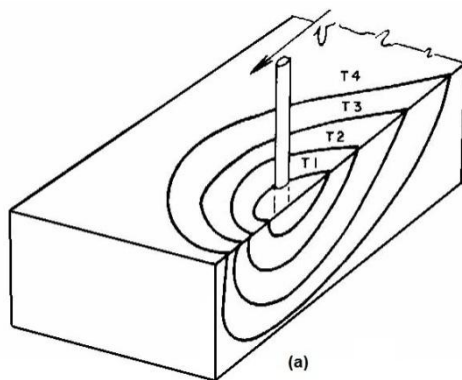


Figura 2.12 - Linhas isotérmicas na soldagem de chapas grossas (a) e finas (b). Fonte: Wainer, et al. (1992), págs. 362 e 364

Nos fenômenos de condução de calor em corpos metálicos, como ocorre na soldagem, é muito importante o conceito de constante de tempo, que permite estimar o tempo necessário para que se atinja o regime quase-estacionário que foi considerado para chegar as equações acima. Esse conceito permite avaliar o tempo entre o início do processo até o instante em que a distribuição de temperatura do corpo passa a ser constante para um observador situado na fonte móvel.

Sendo r a distância até a qual a fonte de calor se propaga no instante t , ou seja, velocidade do eletrodo multiplicado pelo tempo (t), a constante de tempo é expressa por (Wainer, et al., 1992):

$$\frac{r^2}{k \cdot t} = 16 \quad 2.17$$

Ou

$$t = 16 \cdot \frac{k}{v^2} \quad 2.18$$

2.2.2 Macroestrutura da Zona de Fusão

Metalurgicamente, a solda por fusão consiste de três zonas principais: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). Em ligas metálicas existe uma quarta zona ao redor da poça, entre o sólido e o líquido, onde o pico de temperatura cai: é a zona parcialmente fundida. (David, et al., 1989). Entretanto essa zona não será discutida nesse trabalho por ter uma área reduzida e de menor influencia nas características mecânicas da solda. Metal de base é a região mais afastada do cordão de

solda e que não foi afetada pelo processo de soldagem, já que as suas temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.

A Figura 2.13 mostra um desenho esquemático das zonas citadas.

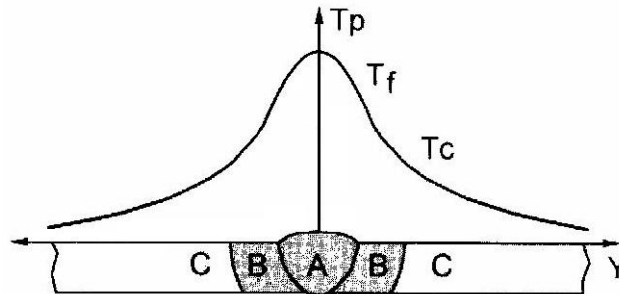


Figura 2.13 - Regiões de uma solda por fusão (esquemática). (a) Zona Fundida-ZF (b) Zona termicamente afetada - ZTA (c) Metal de Base - MB. Fonte: Marques, et al (2011)

2.3 Aços Inoxidáveis

O aço inoxidável foi descoberto por Harry Brearley (1912), na Inglaterra, quando investigava uma liga metálica que apresentasse uma maior resistência ao desgaste para ser utilizada no interior dos canos das armas de fogo. Brearley, ao realizar o ataque químico para revelar a microestrutura desses novos aços, com 13% de Cromo, que estava a pesquisar, notou que o ácido nítrico não surtia efeito.

Brearley não obteve uma liga metálica que resistia ao desgaste, porém obteve uma liga metálica resistente à corrosão. A aplicação imediata foi destinada para a fabricação de talheres, que até então eram fabricados a partir de aço carbono e se corroíam com facilidade devido aos ácidos presentes nos alimentos.

Hoje, o aço inoxidável é amplamente utilizado em diversos setores como: indústria química e alimentícia, na fabricação de bens duráveis, de móveis, instrumentos de precisão e outras. Isso se deve a suas importantes características como: alta resistência a corrosão, resistência mecânica mediana, baixa rugosidade superficial, material inerte, facilidade de conformação e união, criogênico, relação custo/benefício favorável e ser um material reciclável.

O termo “aço inoxidável” é usado para um grupo de ligas ferrosas que têm as seguintes características principais: resistência à corrosão em meio aquoso, incluindo o meio atmosférico, na presença de inúmeros agentes orgânicos e minerais agressivos e resistência à corrosão a altas temperaturas (Modenesi, 2001). Aços inoxidáveis são ligas Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni contendo pelo menos 10 a 12% de Cromo, que é o mínimo necessário para garantir uma resistência a corrosão atmosférica aceitável.

Os aços inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos possuem propriedades que os assemelham aos aços baixa liga, já os Austeníticos possuem uma série de características próprias, até mesmo na sua soldagem.

O Cromo é o principal responsável pela resistência a corrosão desses aços apesar de ser um metal menos nobre que o ferro nas séries eletroquímicas, ou seja, menos resistente a corrosão que o ferro. Isso se deve a capacidade desse metal de formar uma camada de óxido de cromo na superfície dos aços quando em contato com meio oxidante, por exemplo, o meio atmosférico. O Níquel em quantidades suficientemente elevadas altera a estrutura cristalina do metal que passa a ser austenítica (Cúbica de corpo centrado-CCC).

Elementos como carbono, silício, manganês e nitrogênio são geralmente utilizados porque facilitam a fabricação de aços, mas também podem ser utilizados para modificar certas propriedades. Elementos como alumínio, molibdênio, cobre, titânio, tungstênio, nióbio e cobalto melhoram as propriedades dos aços para certas aplicações. Oxigênio e fósforo são impurezas, já o enxofre, apesar de ser considerado como impureza algumas vezes, também pode ser adicionado intencionalmente para melhorar a usinabilidade do aço.

A microestrutura do aço inoxidável dependerá basicamente da capacidade de estabilizar a austenita ou a ferrita na microestrutura do aço à temperatura ambiente. De acordo com a microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro classes principais:

- **Aços Inoxidáveis Martensíticos:** São principalmente ligas Fe-Cr-C com 12 a 18% de cromo e 0,1 a 0,5% de carbono. Essa liga possui elevada

temperabilidade, é facilmente endurecida por tratamento térmico e sua resistência à corrosão tende a ser inferior a dos outros tipos. Chega a apresentar estrutura completamente martensítica.

- **Aços Inoxidáveis Ferríticos:** São ligas Fe-Cr predominantemente ferríticas em qualquer temperatura até a fusão, não podendo ser endurecida por têmpera. Seus grãos podem ser refinados através de uma combinação de trabalho mecânico e recozimento de recristalização. Possui entre 12 a 30% de cromo e um baixo teor de carbono, menos de 0,1%. Possuem baixo coeficiente de expansão térmica e uma boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive a alta temperatura. Sua principal aplicação é em eletrodomésticos e utensílios de cozinha.
- **Aços Inoxidáveis Austeníticos:** Inclui ligas Fe-Cr-Ni e outras onde o Ni pode ser parcialmente ou totalmente substituído por manganês e nitrogênio. Sua estrutura é predominantemente austenítica. Esse é o grupo mais largamente utilizado dos aços inoxidáveis. Contêm entre 6 a 26% de níquel, 16 a 30% de cromo e menos de 0,3% de carbono, com um total de elementos de liga inferior a 26%. São os aços inoxidáveis com maior soldabilidade e resistência geral a corrosão, sendo inúmeras as suas utilizações.
- **Aços Inoxidáveis Duplex:** Contêm 18 a 30% de Cr, 1,5 a 4,5% de Mo, 3,5 a 8% de Ni e 0 a 0,35% de N, sendo que os dois últimos elementos são formadores e estabilizantes da austenita. A maior característica dessa liga é a elevada resistência a corrosão. É utilizada em contato com a água do mar, na indústria química, petroquímica, de papel e celulose etc.

2.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Esses aços representam o maior grupo de aços inoxidáveis produzidos, 65 a 70% do total (Peckner, et al., 1977). A maior parte dos aços inoxidáveis possuem 18% de cromo e 10% de níquel. Na Figura 2.16 é possível ver o Diagrama pseudo-binário Fe-18%Cr-Ni, onde pode ser visto a influência da quantidade de níquel na microestrutura.

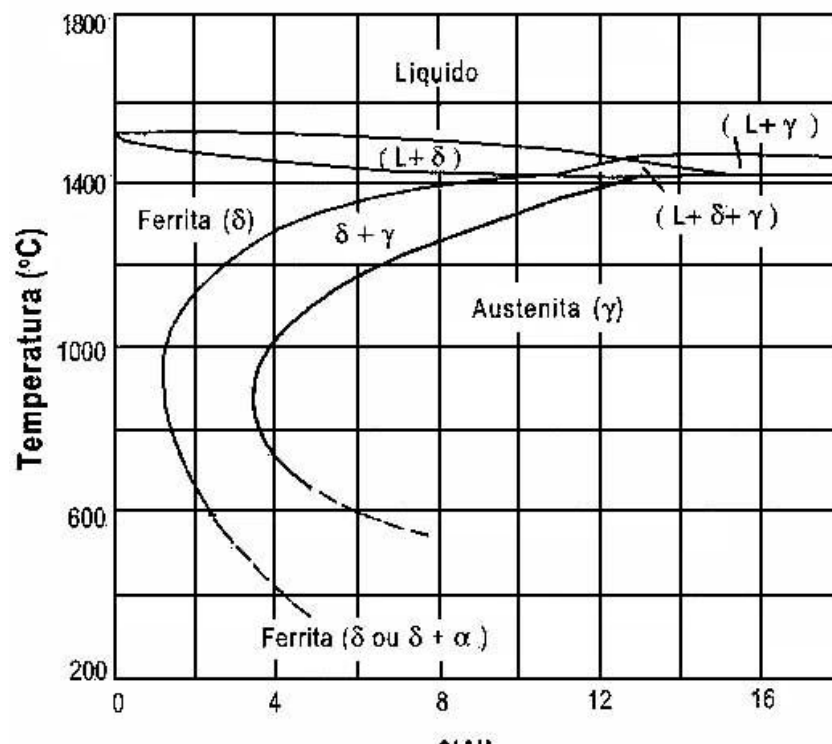


Figura 2.14 - Seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com 18% de cromo, válido para teor de carbono inferior a 0,03% (Castro, et al., 1975)

Como mostra a Figura 2.16 para teores de Ni superiores a 8% a estrutura se mantém austenítica em temperatura ambiente e por isso é considerada um aço inoxidável austenítico.

Um aumento na quantidade de Cromo amplia a faixa de temperatura de existência da ferrita δ e torna necessário um aumento na quantidade de Níquel para obtenção de uma estrutura austenítica à temperatura ambiente. Um maior teor de Cromo reduz a velocidade de transformação da austenita e abaixa a temperatura M_s (temperatura inicial de formação da Martensita) diminuindo a tendência da austenita se transformar quando esta não for a fase estável à temperatura ambiente. Em diversos aços inoxidáveis austeníticos a austenita existe em temperatura ambiente como uma fase metaestável, sendo que a austenita pode se transformar em martensita por deformação plástica à temperatura ambiente ou por tratamento a temperaturas inferiores à ambiente.

O carbono nos aços inoxidáveis austeníticos em temperaturas acima de 900°C amplia a faixa de existência da austenita e reduz a quantidade de ferrita δ . A solubilidade do

carbono na austenita diminui com a redução da temperatura. Para ligas com menos de 0,03% de carbono, o carbono não terá nenhum efeito, já em maiores concentrações ele só permanece em solução (metaestável) se o aço for resfriado rapidamente. O carbono só é completamente solúvel na austenita em temperaturas superiores a 1000°C. Durante um resfriamento lento o carboneto de cromo pode se formar prejudicando certas características do material como resistência a corrosão e ductilidade a baixas temperaturas.

Os aços inoxidáveis austeníticos são geralmente usados após um tratamento térmico de estabilização, onde eles são aquecidos a temperaturas entre 1000 e 1100°C e resfriados rapidamente. Esse tratamento recristaliza a microestrutura encruada e mantém o carbono em solução sólida dando ao material uma estrutura essencialmente austenítica com uma menor quantidade possível de outros constituintes, principalmente carbonetos. A Tabela 2.1 mostra a influência dos elementos de liga no aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 2.1 – Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: Welding Handbook: metals and their weldability, (1998)

Elemento	Tipos de aços	Efeitos
C	Todos	Promove fortemente a formação da austenita. Pode formar carboneto com o cromo e resultar em corrosão intergranular.
Cr	Todos	Promove formação de ferrita. Aumenta resistência à oxidação e à corrosão.
Ni	Todos	Promove a formação da austenita. Aumenta a resistência a alta temperatura à corrosão e ductilidade.
N	XXX N	Promove fortemente a formação da austenita. Aumenta a resistência mecânica.
Nb	347	Reduz sensibilidade a corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta a resistência à fluência.
Mn	2XX	Estabiliza a austenita à temperatura ambiente, mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente pela formação de MnS.
Mo	316; 317	Aumenta a resistência à alta temperatura. Aumenta resistência a corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
P, Se, S	303; 303Se	Melhora a usinabilidade, mas promovem a fissuração de solidificação. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão.
Si	302B	Aumenta a resistência à formação de carepa e promove a formação de ferrita. Sempre adicionado em pequenas quantidades para desoxidação.

Elemento	Tipos de aços	Efeitos
Ti	321	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cu	-	Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à corrosão sob tensão. Causa efeitos endurecedores por envelhecimento.

2.3.1.1 Microestrutura da Zona Fundida

A zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos pode reter quantidades de ferrita δ ao contrário do metal de base que geralmente é inteiramente austenítico. A presença ou não da ferrita no metal de solda se deve principalmente aos elementos presentes no metal de base e metal de adição e a velocidade de resfriamento. Elementos de liga afetam as relações de equilíbrio entre as fase austenita e ferrita. Esses elementos podem ser dividido entre aqueles que promovem, ou estabilizam, a formação da ferrita ou austenita. O efeito relativo na formação de uma fase ou outra é, em geral, expresso em termos de equivalência de cromo e níquel.

Elementos formadores de Ferrita: Cromo, Molibdênio, Silício, Nióbio, Titânio, Alumínio, Vanádio, Tungstênio. Elementos formadores de Austenita: Níquel, Manganês, Carbono, Nitrogênio, Cobre, Cobalto. (Lippold, et al., 2005)

A Figura 2.15 mostra como a relação entre os teores de Cr e Ni influenciam a microestrutura da zona fundida para aços com 70% de ferro.

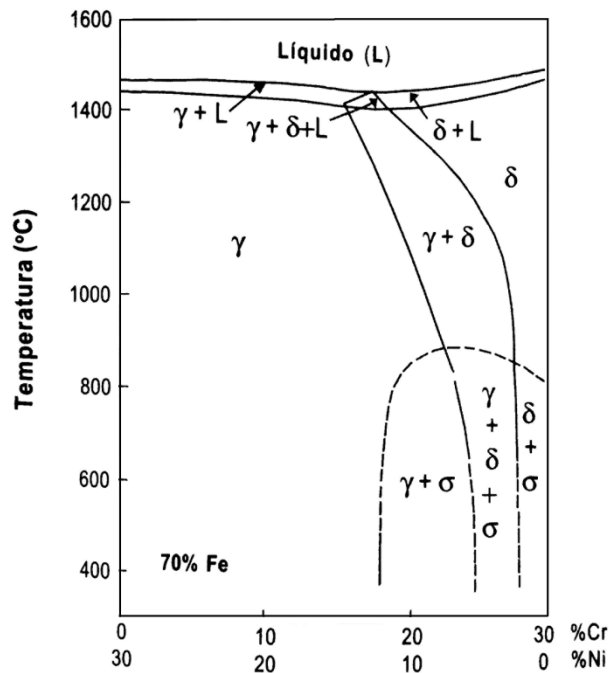


Figura 2.15 - Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%. Fonte: Modenesi, (2001)

Existem quatro formas de solidificação e transformação do estado sólido possíveis para os aços inoxidáveis austeníticos, são eles:

Tipo de solidificação A - solidificação direta para austenita, sem formação de ferrita.

Tipo de solidificação AF - pequena formação de ferrita no final da solidificação da austenita. A ferrita se localiza nos contornos de grãos, dendritas ou células. Microestrutura característica: Austenita com ferrita eutética.

Tipo de solidificação FA- pequena formação de austenita no final da solidificação da ferrita. Para taxa de resfriamento moderada e/ou razão Cr_{eq}/Ni_{eq} baixa, dentro dos limites para o tipo de solidificação FA (ver Figura 2.16), apresenta-se uma microestrutura ferrítica vermicular ou esquelética. Para taxas de resfriamento altas e/ou razão Cr_{eq}/Ni_{eq} alta, dentro dos limites para o tipo de solidificação FA, apresenta-se uma microestrutura ferrítica lamelar.

Tipo de solidificação F - solidificação ocorre com a formação de ferrita e a austenita é formada na matriz de ferrita já solidificada. Microestrutura característica: ferrita com austenita de Widmanstätten.

A Figura 2.16 mostra a relação entre a microestrutura da zona de fusão com a razão de cromo e níquel equivalentes.

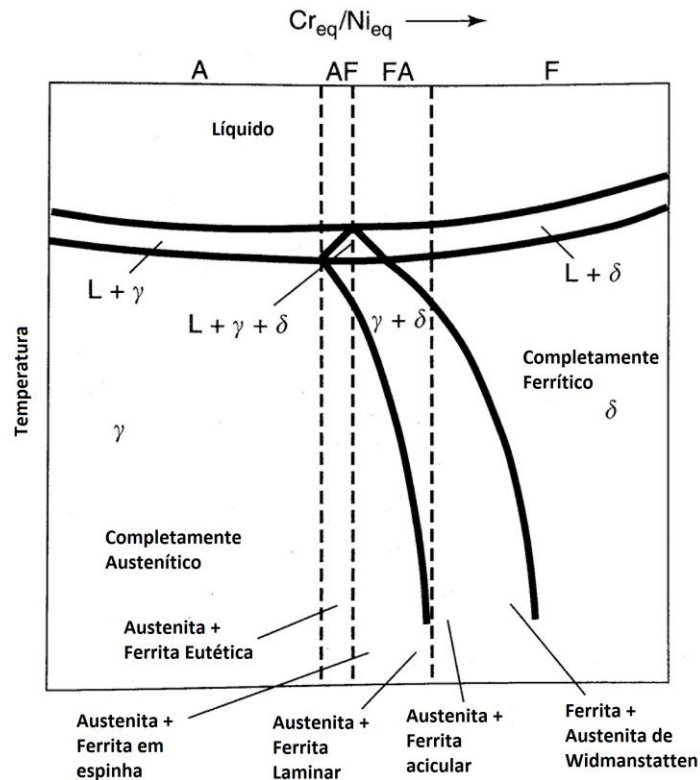


Figura 2.16 - Relação entre o tipo de solidificação e o Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni. Fonte: Lippold, et al. (2005)

A Figura 2.17 mostra as microestruturas encontradas para valores crescentes de Cr/Ni.

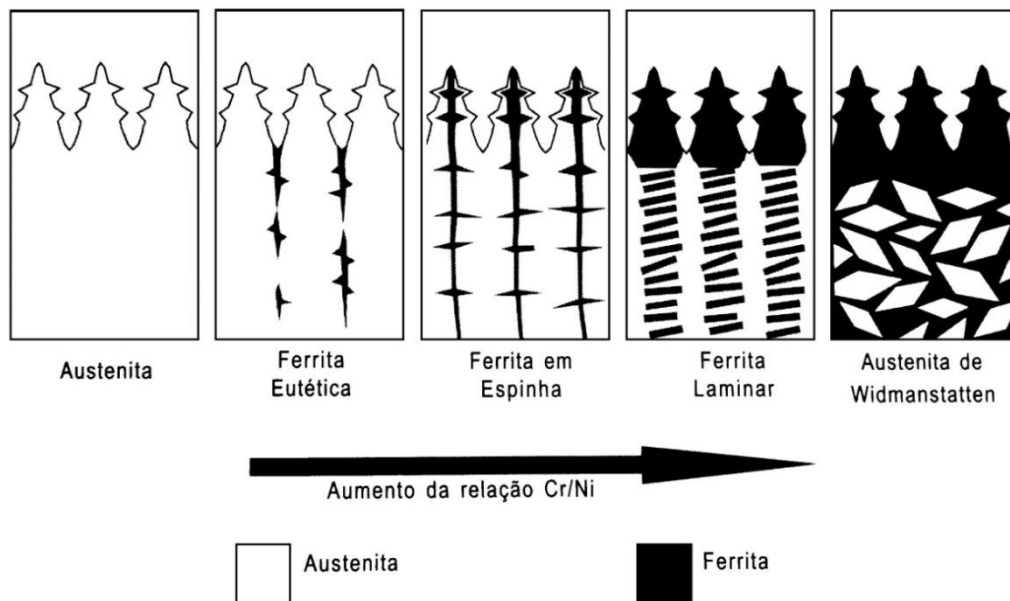


Figura 2.17 - Exemplos de morfologia da ferrita δ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: Modenesi, (2001)

2.3.1.2 Influência da Ferrita nas Características da Solda

Como as soldas de aços inoxidáveis são predominantemente austeníticas, por isso tendem a apresentar uma excelente ductilidade e não é sensível à fissuração pelo hidrogênio.

A ferrita δ , quando presente em teores não muito elevados, é um constituinte benéfico para a zona de fusão, pois reduz a tendência de trinca de solidificação. A quantidade de ferrita δ necessária para garantir imunidade contra fissuração depende do nível de restrição da junta e da quantidade e tipos de elementos de liga e impurezas presentes na zona fundida. O tipo de solidificação, e conseqüentemente, a razão Cr_{eq}/Ni_{eq} tem forte influencia na suscetibilidade a trincas da solda, como mostra a Figura 2.18.

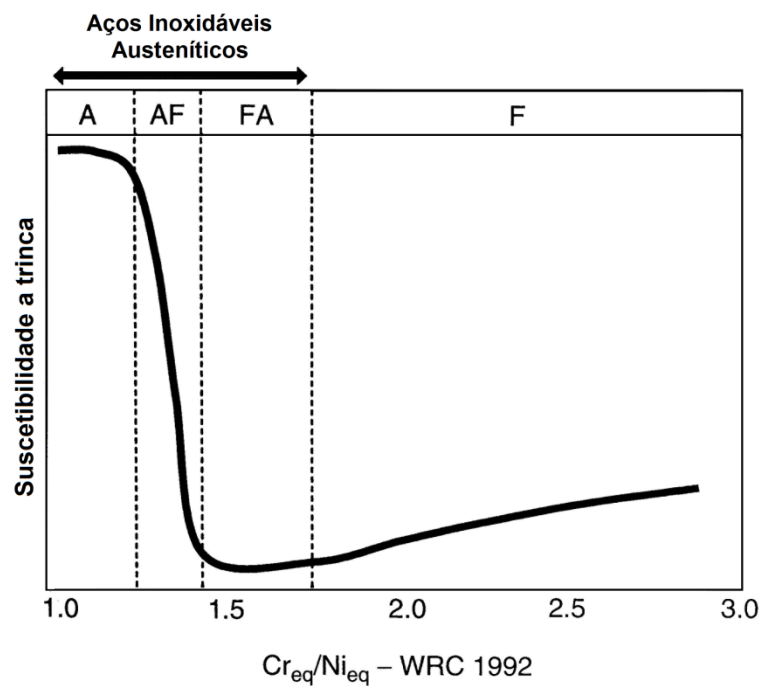


Figura 2.18 - Suscetibilidade a trinca de solidificação da solda em função da composição baseado em dados Varestraint. Fonte: Lippold, et al., (2005)

A quantidade de ferrita na solda em temperatura ambiente pode ser usada como uma aproximação para o tipo de solidificação. Se FN é 0, o tipo de solidificação será A. Entre FN 0 e 3, a solidificação será provavelmente do tipo AF. Entre FN 3 e 20, solidificação será do tipo FA. Existem exceções para a relação entre quantidade de ferrita e tipo de solidificação apresentados (exemplo: metal de adição com 16%Cr, 8%Ni e 2%Mo, 317LM e 209).

Por outro lado a ferrita deve ser controlada em aplicações em que a junta soldada precisa de uma ótima resistência a corrosão, uma ótima tenacidade da solda a baixas temperaturas e quando a peça não puder apresentar qualquer magnetismo residual (a ferrita, sendo uma fase ferromagnética, pode ser magnetizada enquanto que a austenita não). Soldas com estruturas bifásicas de austenita e ferrita, devido a diferença de estrutura e composição química, podem levar a formação de células galvânicas localizadas e conseqüentemente sua corrosão.

A presença de ferrita no metal de solda age como um agente fortalecedor e aumenta sua resistência quando comparado ao metal base e ZTA. Hauser e Van Echo (1982) estudaram o efeito da ferrita no comportamento mecânico do aço inoxidável austenítico tipo 308 em uma faixa de temperatura (25 a 650°C). Para facilitar o estudo, eles dividiram os níveis de ferrita em muito baixo (FN 2), baixo (FN 6), médio (FN 10) e alto (FN 16). Esse estudo mostrou que o aumento da ferrita leva a um aumento de resistência quando em temperatura ambiente e menor resistência a temperaturas elevadas. O mesmo estudo mostrou que níveis de ferrita médio e alto tem uma tensão a ruptura menor. Essa observação é similar a encontrada por Thomas (1978) para materiais de adição do tipo 316. Segundo ele redes contínuas de ferrita (FN 10) resultam em ruptura mais rápido, devido o início antecipado da trinca na interface ferrita-austenita. Para Thomas (1978), a quantidade de ferrita ideal é FN 5 já que ainda não existirá uma rede de ferrita contínua e a quantidade de ferrita garante a resistência da solda para trinca de solidificação.

Aços inoxidáveis austeníticos são excelentes também em temperaturas criogênicas, já que exibem boa resistência e ductilidade nessas temperaturas. A influência da ferrita na propriedade mecânica da solda à temperaturas criogênicas é um importante fator estudo e análise.

Existem alguns estudos interessantes que relacionam a quantidade ferrita ideal para cada aplicação, como o de Lefebvre (1993) que apresenta um guia detalhado sobre o assunto.

2.3.1.3 Medição de Ferrita

Como já foi apresentado, a quantidade de ferrita é um importante indicador do comportamento de solidificação da solda e resistência a trinca, o que torna importante sua medição.

A medida da ferrita pode ser feita através de técnicas metalográficas, entretanto essas técnicas possuem as seguintes desvantagens:

- São destrutivas.
- Requerem muito tempo, já que são imprecisas se não for feita a metalografia de várias seções em diferentes pontos e orientações.
- Conforme experiência, os resultados da determinação da quantidade de ferrita por meios metalográficos são dificilmente reproduzidos, ou seja, não existe repetibilidade dos resultados.

Por esses motivos, técnicas magnéticas são amplamente empregadas e padronizadas. Essas técnicas são possíveis, já que a ferrita é ferromagnética e a austenita não. Uma das técnicas magnéticas mais empregadas envolve a força necessária para empurrar um pequeno ímã da superfície da solda. Vários instrumentos utilizam esse princípio sendo o mais conhecido deles o MagneGage e o Severn Gage. Outra técnica usa corrente magnética para medir a quantidade de ferrita. Instrumentos desse tipo, como o Fischer FeritScope, são largamente empregados por serem portáteis e acessarem pequenos espaços.

Todos os equipamentos são calibrados para medir a quantidade de ferrita através do *Ferrite Number* (FN), que é a escala padronizada pela *Welding Research Council* (WRC). FN não relaciona perfeitamente a porcentagem de ferrita e tem uma faixa de 0 a 140 FN, ou mais, dependendo da composição da ferrita. Para valores até 8, FN é considerado como a quantidade aproximada da porcentagem em volume de ferrita, segundo Lippold, et al. (2005). Já segundo a norma técnica ANSI/AWS A5.9 (1993) FN pode ser considerado igual a porcentagem de ferrita até FN 10.

2.3.1.4 Diagramas Constitucionais

A importância da microestrutura no metal de solda fez com que vários estudiosos trabalhassem para tentar prevêê-la. O primeiro esforço para previsão da microestrutura foi em 1920, por Strauss e Maurer com um diagrama Cr x Ni. Em 1938, Newell e Fleischman estabeleceram uma equação matemática com a intenção de descrever o limite entre a microestrutura austenítica e a mistura entre a microestrutura austenítica e ferrítica. Em 1943, Field, Bloom e Linnert e em 1949 Binder, Brown and Franks elaboraram equações similares para estabelecer o limite entre a austenita e a formação da ferrita δ . Em 1946 Campbell e Thomas deram um grande avanço propondo pela primeira vez o conceito de Cromo equivalente.

Em 1947, Shaeffler publicou seu primeiro diagrama que foi revisado em 1948 e 1949 e chegou ao diagrama de Schaeffler como o conhecemos hoje, ver Figura 2.19. A quantidade de ferrita nesse diagrama foi obtida através de análises metalográficas quantitativas.

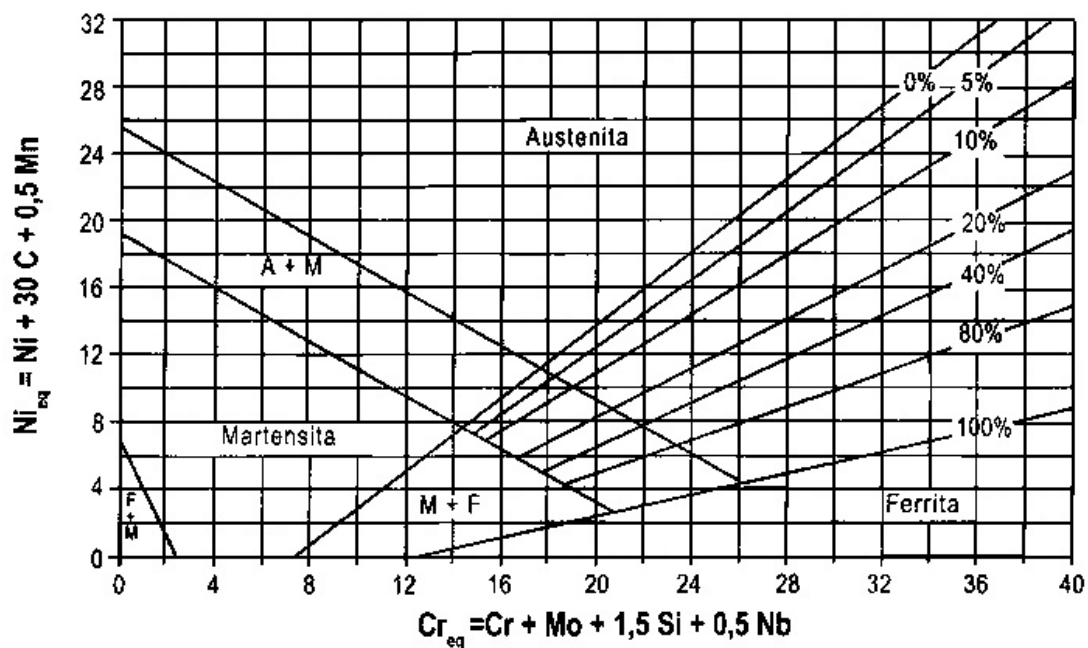


Figura 2.19 - Diagrama de Schaeffler. A-austenita, F-ferrita, M-martensita. Fonte: Modenesi, (2001).

Em 1956, DeLong desenvolveu seu primeiro diagrama que considerou a influência do nitrogênio na redução de ferrita δ devido a entrada desse elemento na poça de fusão. Esse diagrama foi obtido a partir de 600 dados experimentais e foi usado método magnético para a determinação da ferrita. Em 1973, DeLong revisou seu diagrama para incluir duas escalas de ferrita (Linhas Iso-ferríticas de porcentagem volumétrica e "Ferrite Number") e incluir mais alguns dados experimentais.

Pode-se dizer que o diagrama DeLong é um diagrama Schaeffler modificado para prever FN até um máximo de FN 18. As modificações feitas por DeLong no diagrama de Schaeffler proporcionaram uma melhor relação entre a quantidade de ferrita medida e calculada de acordo com a norma ANSI/AWS A5.9 (1993). O Diagrama DeLong está apresentado na Figura 2.20.

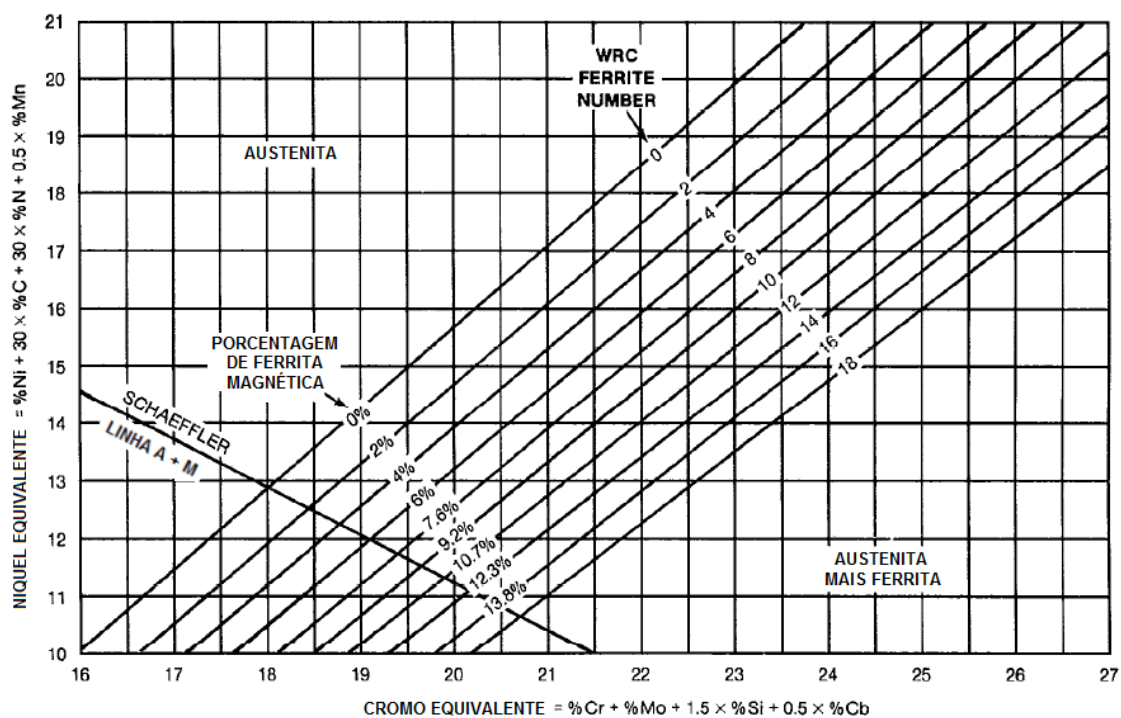


Figura 2.20 - Diagrama DeLong (FN) para metal de solda de aço inoxidável. Fonte: ANSI/AWS A5.9 (1993)

Instruções para utilização do Diagrama DeLong:

Calcule o níquel e cromo equivalentes do metal de solda analisado. Se a análise do nitrogênio no metal de solda não é possível, assumo 0,06% de nitrogênio no metal de solda para os processos GTA e eletrodo revestido, ou 0,08% para o processo GMA. Se a composição química for precisa o diagrama prevê o FN

dentro de mais ou menos 3 em aproximadamente 90% dos testes para as famílias 308, 309, 316 e 317.

Entre 1973 e 1988, pesquisadores como Hull e Kotecki estudaram o efeito de certos elementos na quantidade de ferrita δ e novos coeficientes para alguns elementos do cromo e níquel equivalentes (Bermejo, 2012).

Em 1988, Siewert, McCowan e Olson desenvolveram um novo diagrama utilizando 923 ligas inoxidáveis, que incluem os aços inoxidáveis duplex e outros aços inoxidáveis experimentais, ao contrário do Diagrama de DeLong que foi feito somente com aços inoxidáveis austeníticos AISI-300. Com isso o gráfico foi aumentado para prever até FN 100. Outra modificação importante no diagrama foi a indicação dos modos de solidificação A, AF, FA e F. Esse diagrama ficou conhecido como WRC-1988.

Foi feita uma comparação entre a previsão feita pelo diagrama de WRC-1988 com o diagrama Schaeffler e DeLong e foi constatado que o Diagrama WRC-1988 possui melhores resultados (McCowan, et al., 1989).

Em 1992, Kotecki e Siewert modificaram o diagrama WCR-1988 adicionando o cobre na fórmula para níquel equivalente o que melhorou ainda mais a previsão de FN para aços inoxidáveis duplex contendo aproximadamente 2% de Cu. O novo diagrama ficou conhecido como WRC-1992. Esse diagrama ainda é o diagrama considerado válido pela norma ASME III para aços inoxidáveis duplex e austeníticos. Em 1999, Kotecki aumentou a aplicação do diagrama WCR-1992 incluindo os aços inoxidáveis com 1, 4 e 10% de magnésio, mas o nome do diagrama permaneceu o mesmo. O diagrama WRC-1992 pode ser visto na Figura 2.21.

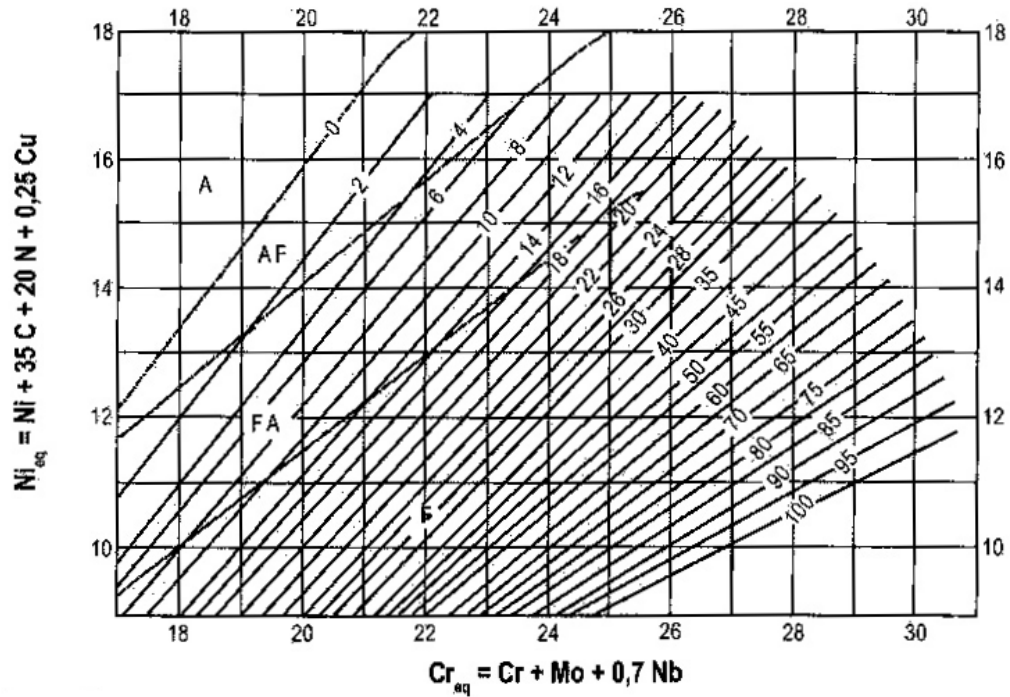


Figura 2.21 - Diagrama WRC-1992 para metal de solda Aço Inoxidável Austeníticos e Duplex. Fonte: Modenesi, (2001)

O último diagrama desenvolvido foi em 2000 por Balmfort e Lippold para representar a microestrutura e a % de ferrita em aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. Nesse caso tanto a martensita quanto a ferrita são ferromagnéticos, sendo necessária a análise metalográfica para distinguir cada fase e por isso as linhas iso-ferríticas estão expressas em %. Esse é conhecido como Diagrama de Balmforth e Lippold e pode ser visto na Figura 2.22.

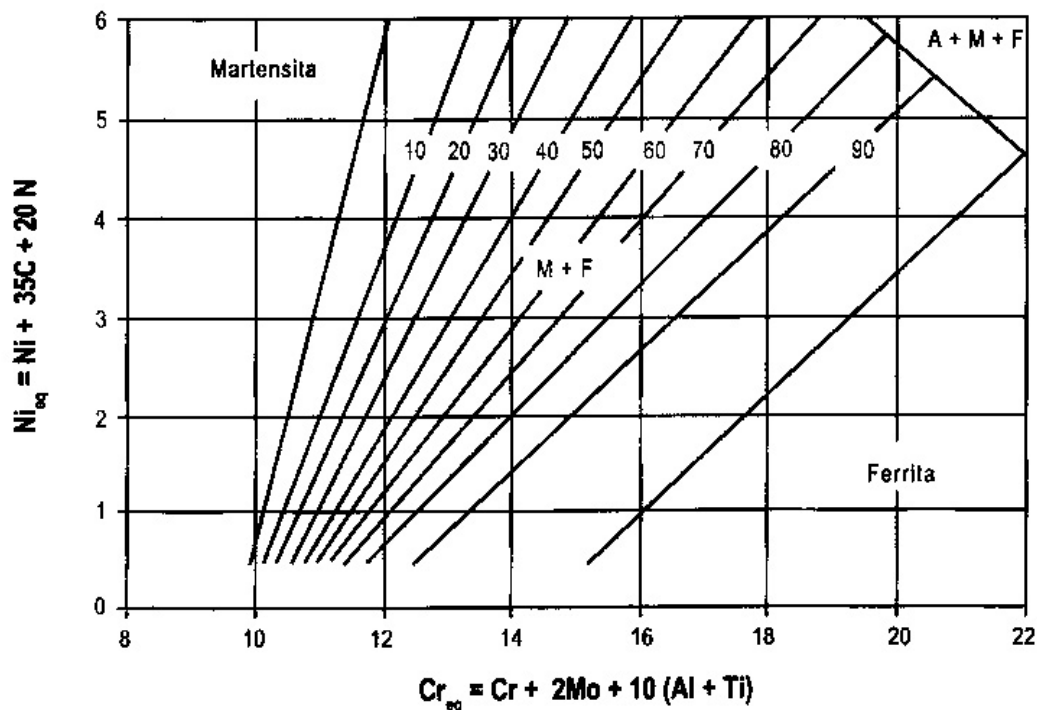


Figura 2.22 - Diagrama de Balmforth e Lippold. Fonte: Modenesi, (2001)

A taxa de resfriamento tem um efeito significativo na quantidade de ferrita, e como os diagramas apresentados não levam esse parâmetro em consideração esse é um dos motivos das diferenças encontradas entre a quantidade de ferrita medida e calculada pelos diagramas. A partir do século 21 avanços importantes na predição de FN surgiram com o desenvolvimento das redes neurais artificiais, esses novos avanços serão descritos na seção Redes Neurais na Soldagem.

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., 2000).

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.

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 2.23 ilustra de forma simplificada os componentes de um neurônio biológico.

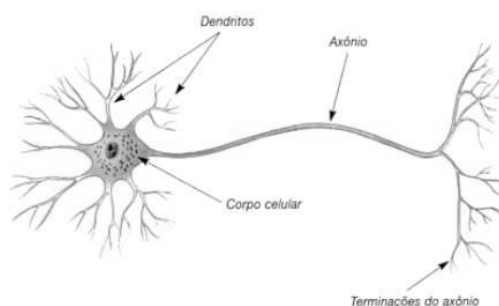


Figura 2.23 - Componentes básicos de um neurônio biológico. Fonte: <http://peonies42.lastjune.web.id/neuronio-criativo.html>. Acessado em 12/01/2011.

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 2.24.

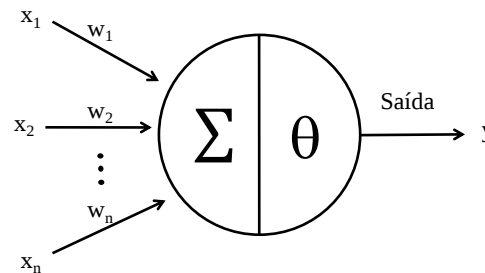


Figura 2.24 - Modelo básico de um neurônio artificial. Fonte: Adaptado de Braga *et al.* (2000), p.9.

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:

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq \theta \quad (2.17)$$

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.

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. 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.

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 conseqüente 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.

Assim, a capacidade de generalização de uma rede neural pode ser atribuída a uma boa interpolação não-linear sobre os dados de entrada, como pode ser visto na Figura 2.25.

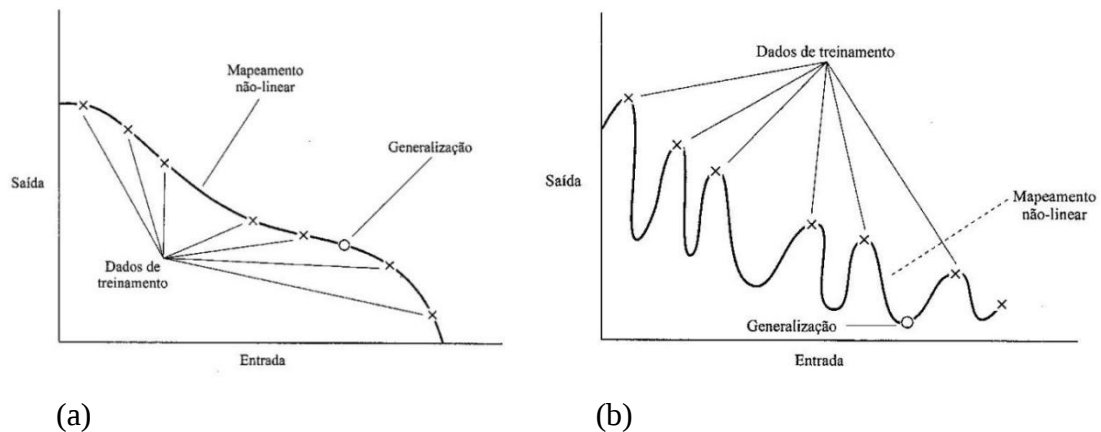


Figura 2.25 – (a) Dados ajustados adequadamente (boa generalização) (b) Dados ajustados em excesso (generalização pobre) Fonte: (Haykin, 2001) p.233.

Como pode ser visto na Figura 2.25, 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 a capacidade de generalização da rede foi garantida com 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 2.26.

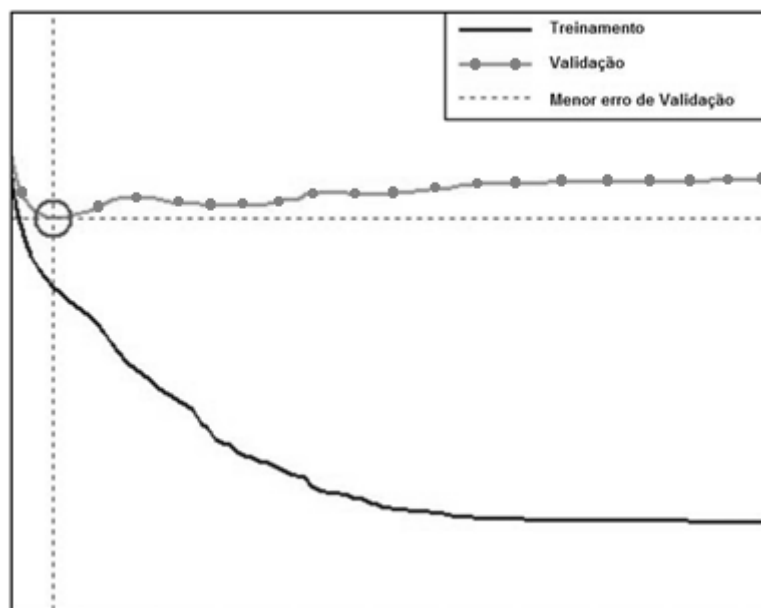


Figura 2.26 – Variação do erro de validação e erro de treinamento em função do número de épocas durante um treinamento. O ponto circulado corresponde ao menor valor do erro de validação.

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.

2.5 Redes Neurais na Soldagem

O desenvolvimento das Redes Neurais Artificiais a partir do século 21 mudou como vinha sendo feito a busca por melhores métodos de predição de microestrutura. A grande complexidade das relações entre os parâmetros de entrada e saída de uma solda,

além da grande quantidade de parâmetros fazem com que os modelos físicos sejam extremamente complexos com grande custo computacional e tempo de processamento, o que inviabiliza seu uso. Sendo assim, o uso das Redes Neurais Artificiais torna uma excelente opção para prever determinados parâmetros da solda em situações reais. Bhadeshia (1999), por exemplo, escreveu sobre a aplicabilidade das redes neurais para modelagem de problemas complicados da Ciência dos Materiais. Para ele, na soldagem é onde o método de redes neurais encontra maiores aplicações. Em 2009, o mesmo autor (Bhadeshia, et al.) voltou a escrever sobre o assunto, descrevendo os novos avanços nessa área.

2.5.1 Redes Neurais para a predição de FN

Serão descritos aqui em maiores detalhes os trabalho para predição de redes neurais de maior relevância e com informações suficientes para serem comparados com os dados gerados nessa dissertação.

Os trabalhos citados usam o valor de RMS (*Root Mean Square*), ou seja, raiz da média ao quadrado, que é usado para comparar os erros como mostra a equação 2.18.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{1}^n (FN_{Experimental} - FN_{Encontrado})^2} \quad 2.18$$

PREDIÇÃO MELHORADA DO NÚMERO FERRÍTICO EM SOLDAS A ARCO DE AÇOS INOXIDÁVEIS USANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS - AUTORES: J. M. VITEK, Y. S. ISKANDER E E. M. OBLow (2000)

Vitek, Iskander e Oblow (2000) desenvolveram uma rede neural para predição de FN baseada na composição química de aços inoxidáveis austeníticos e duplex usando como dados de entrada as dados usados para a elaboração do diagrama WRC-1992 e foi nomeada como FNN-1999. Vitek considerou em sua camada de entrada a concentração de 13 elementos dos cordões, foram utilizados 6 nós nas camadas escondidas e a camada de saída possui apenas um nó, ou seja, o FN (Ferrite Number). Nem todos os 13 elementos estão presentes em todas as soldas. Um outro trabalho já havia sido

realizando considerando apenas os 8 elementos presentes em todas as soldas: C, Cr, Ni, Mo, N, Mn, Fe e Si (Vitek, et al., 1999), entretanto seus resultados foram inferiores ao trabalho que está sendo citado com mais 5 elementos: Cu, Ti, Nb, V e Co. O estudo cobriu uma faixa de FN que vai de 0 a 117.

Foram utilizados 961 pontos e os valores de composição química e FN utilizados para cada um dos pontos é a média entre 3 medidas encontradas. Esse conjunto de pontos foi chamado de "Conjunto completo dos dados para treinamento" e foi dividido nos subgrupos: "Dados para treinamento" e "Dados para teste", sendo que 90% dos dados estão contidos no primeiro subgrupo e 10% no segundo. Essa divisão foi feita aleatoriamente. Um segundo conjunto de dados com 265 pontos foi utilizado para testar a rede neural assim como já havia sido utilizado para testar o diagrama constitucional WRC-1988 e foi denominado "Conjunto de dados suplementar".

A rede foi testada com 1 a 20 nós nas camadas escondidas e o melhor resultado encontrado foi com 6 nós. O aprendizado da rede foi medido pelo RMS do subgrupo de treinamento. Os dados foram obtidos através de várias técnicas de soldagem a arco e o efeito da taxa de resfriamento, que é influenciada pelo aporte térmico, na quantidade de ferrita foi considerado em outro trabalho. O uso de vários métodos de soldagem fez com que soldas de composição química idêntica apresentasse diferentes valores de FN e como a rede neural não consegue absorver/identificar essa variável e isso se apresenta como erro.

A Figura 2.27 e Figura 2.28 mostram que o modelo FNN-1999 não tem tendência a grandes erros, como acontece no diagrama WRC-1992.

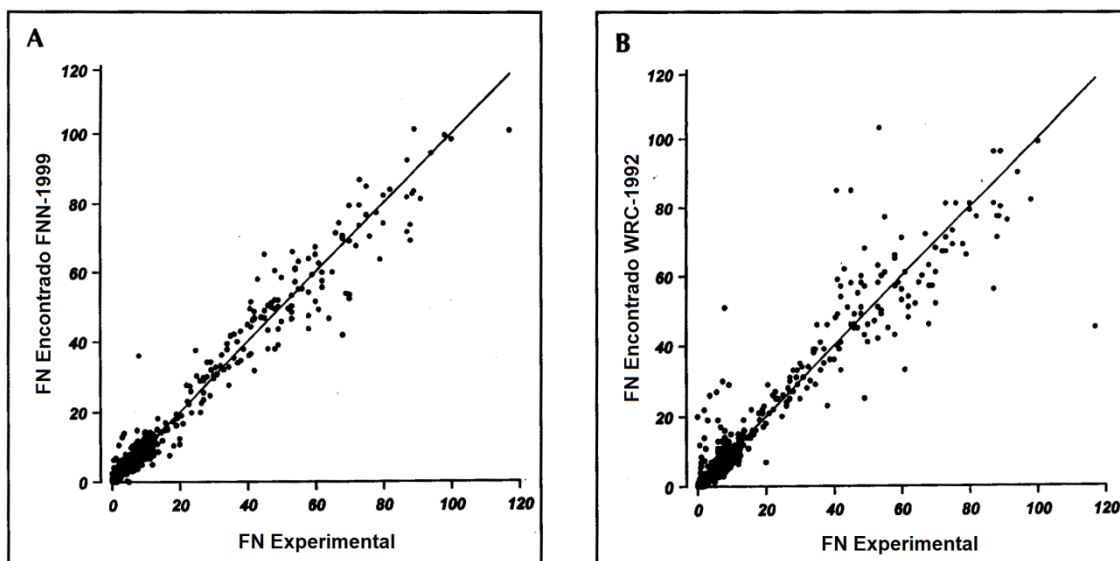


Figura 2.27 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o conjunto completo dos dados de treinamento para o modelo FNN-1999 e para o diagrama WRC-1992. Fonte: Vitek, et al. (2000)

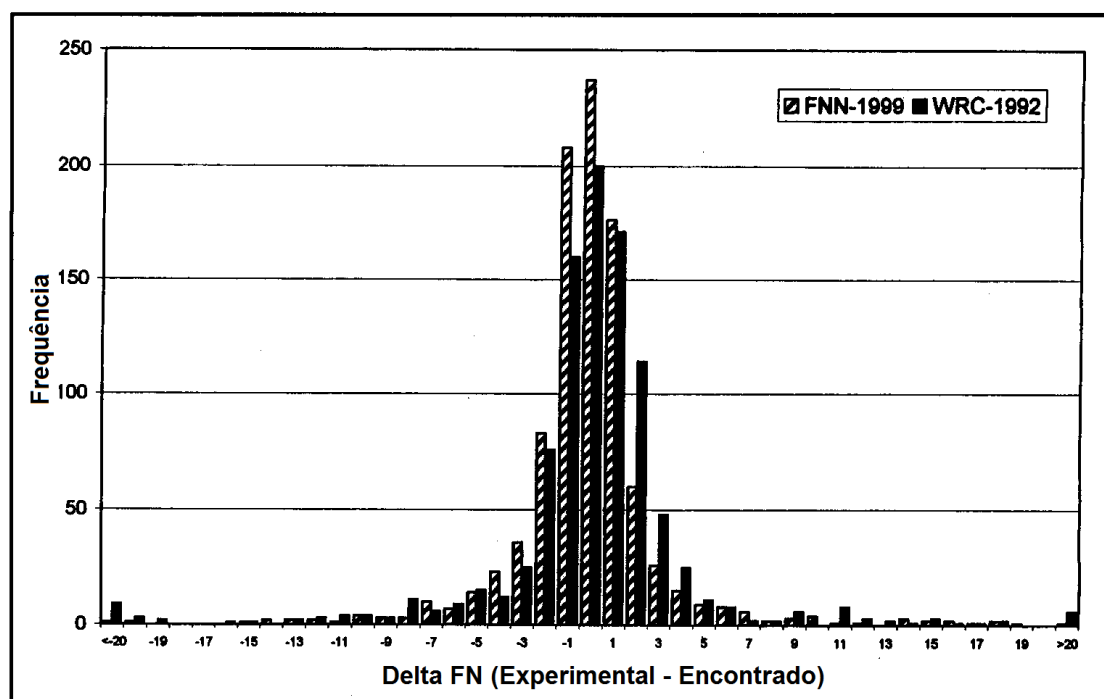


Figura 2.28 - Distribuição do Erro para o conjunto completo dos dados de treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000)

O estudo cobre uma faixa muito ampla de FN que vai de 0 a 117, mas essa faixa foi reduzida para melhor análise para $FN \leq 18$ como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN \leq 18$) para o conjunto completo dos dados para treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000)

Erro Absoluto	Modelo FNN-1999		Diagrama WRC-1992	
	Número de pontos	% do Total	Número de pontos	% do Total
≤ 1.5	590	74.0	509	63.9
≤ 2.5	722	90.6	679	85.2
≤ 3.5	763	95.7	741	93.0
≥ 9.5	3	0.4	13	1.6

A Tabela 2.3 mostra o desempenho do modelo desenvolvido comparado com os resultados obtidos pelo diagrama WRC-1992 para o conjunto completo dos dados para treinamento.

Tabela 2.3 - Comparação através do RMS do erro de métodos para predição de FN para o conjunto completo dos dados para treinamento. Fonte: Vitek, et al. (2000)

MÉTODO DE PREDIÇÃO	RMS
Modelo FNN-1999	3.5
Diagrama WRC-1992	5.8

A segunda forma de avaliar o desempenho da rede foi utilizando um conjunto de dados totalmente novo, o "Conjunto de dados suplementar". O resultado pode ser visto na Tabela 2.4, na Tabela 2.5, na Figura 2.29 e Figura 2.30.

Quando se compara a Tabela 2.2 para o conjunto completo dos dados para treinamento com a Tabela 2.4 para o conjunto de dados suplementar observa-se que a porcentagem de dados com $\Delta FN \leq 1.5$ e 2.5 é menor para o conjunto completo dos dados para treinamento; entretanto, nesse conjunto também é observada a ocorrência de erros grandes ($\Delta FN \geq 9.5$) o que não acontece com o conjunto de dados suplementar.

Tabela 2.4 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN \leq 18$) para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000)

Erro Absoluto	Modelo FNN-1999		Diagrama WRC-1992	
	Número de pontos	% do Total	Número de pontos	% do Total
≤ 1.5	133	52.4	108	42.5
≤ 2.5	194	76.4	185	72.8
≤ 3.5	225	88.6	227	89.4
≥ 9.5	0	0	0	0

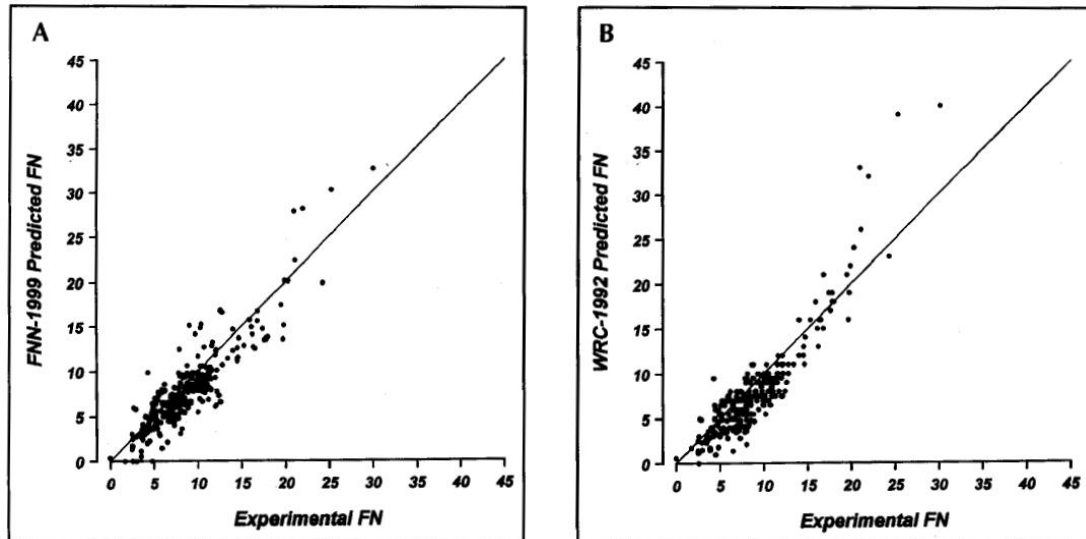


Figura 2.29 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000)

A Figura 2.30 mostra claramente que tanto o modelo baseado em rede neural quanto o diagrama tendem a superestimar a quantidade de FN já que o gráfico está assimetricamente distribuído e centralizado em $\Delta FN = 1$.

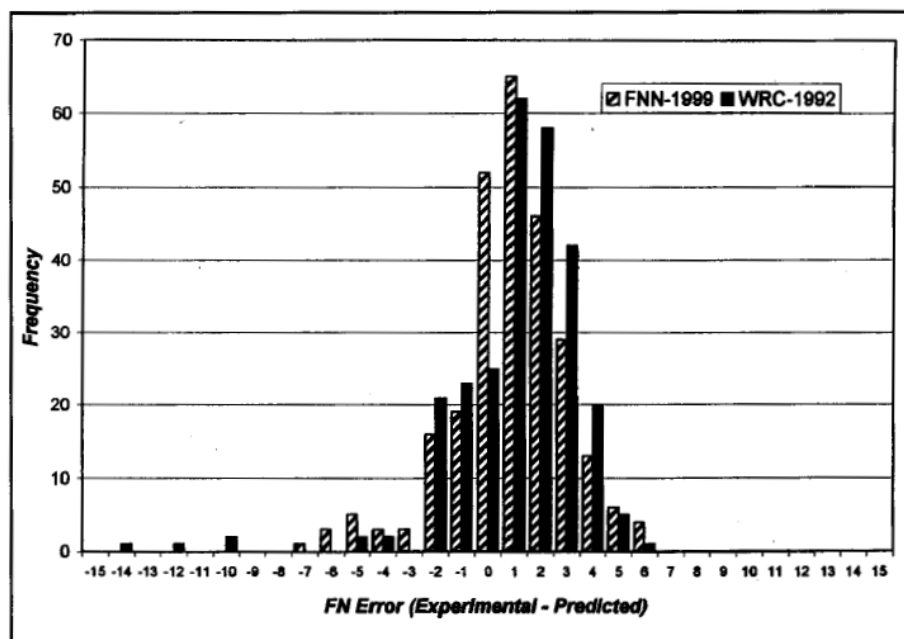


Figura 2.30 - Distribuição do Erro para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000)

Quando se compara a Tabela 2.3 com a Tabela 2.5, observa-se que o conjunto de dados suplementar apresentou menores erros. O autor sugeriu que isso aconteceu porque o conjunto de dados suplementar cobre uma faixa de FN menor e os grandes erros

ocorrem para valores grandes de FN. Dos 265 pontos do conjunto de dados suplementar 254 correspondem a $FN \leq 18$.

Tabela 2.5 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados suplementar. Fonte: Vitek, et al. (2000)

MÉTODO DE PREDIÇÃO	RSM
Modelo FNN-1999	2.3
Diagrama WRC-1992	2.6

Segundo Vitek, et al (2000) os diagramas constitucionais possuem uma grande limitação que é considerar que a influência de um elemento na formação de FN independe da concentração de um outro elemento, ou seja, independe da composição de toda a solda. Para provar essa observação, foram escolhidas duas composições químicas de metal de base diferente, a primeira composição escolhida foi de um aço inoxidável austenítico típico e a segunda de um aço inoxidável duplex típico. Para cada uma delas a porcentagem em peso de um dos elementos químicos (Ni, Cr, C, N, Mn, Si, Mo, Ti, V, Co, Nb e Cu) foram variados enquanto os demais se mantiveram constante, com exceção do Fe que variou para compensar a variação de outro elemento. Dessa forma foi possível analisar a influência de cada elemento na formação da ferrita. Foi possível observar também que a influência de um determinado elemento na quantidade de ferrita não foi a mesma. V passou de um fraco estabilizador austenítico para um forte estabilizador ferrítico, por exemplo. E o oposto aconteceu com Cu que na primeira composição ele se mostrou um fraco estabilizador ferrítico e na segunda um estabilizador da austenita. O uso de redes neurais acaba com essa limitação já que considera a influência de uma entradas nas outras.

MODELO PARA PREDIÇÃO MELHORADA DO NÚMERO FERRÍTICO

CONSIDERANDO O EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO - AUTORES: J. M.

VITEK, S. A. DAVID E C. R. HINMAN (2003)

Um novo modelo baseado em redes neurais foi desenvolvido por Vitek, et al. (2003) para prever a quantidade de ferrita considerando a composição da liga e taxa de resfriamento. Ao novo modelo foi dado o nome de ORFN (*Oak Ridge Ferrite Number*). O modelo é válido para aços inoxidáveis austeníticos e para aços inoxidáveis duplex,

assim como para soldagem a arco convencional e soldagem a arco com alta energia e conseqüentemente alta taxas de resfriamento como soldagem a laser e soldagem a arco de alta velocidade.

O modelo ORFN utilizou as mesmas 13 entradas utilizadas no modelo anterior mais a taxa de resfriamento. A taxa de resfriamento foi calculada em °C/s e foi utilizado seu logaritmo como dado de entrada. Foram utilizados 6 camadas escondidas, assim como o modelo anterior. Foi utilizada uma rede feed-forward e algoritmo de otimização back-programation.

O conjunto de dados para treinamento da rede inclui os dados utilizados para o desenvolvimento do diagrama WRC-1992, parte dos dados gerados por David, et al (1987) em seu trabalho e novos dados gerados exclusivamente para esse estudo, o qual será nomeado por "Novo Conjunto de Dados". Soldas autógenas foram realizadas para diferentes processos de soldagem, níveis de potência e velocidade de soldagem. A consolidação desses 3 conjunto de dados mostrou problemas em relação consistência dos dados em respeito ao conteúdo de ferrita e taxa de resfriamento. O conjunto de dados utilizados para treinamento dessa rede neural possui 1196 pontos.

Em alguns casos a determinação de FN é impossível através de métodos magnéticos. Cordões realizados a laser, por exemplo, são muito pequenos tornando inapropriado e impreciso a medição de FN através de métodos magnéticos. Esse mesmo problema acontece para velocidades de soldagem muito grandes que levam a diminuição do tamanho do cordão. Nesses casos, a % volumétrica de Ferrita foi medida metalograficamente e através de uma equação já desenvolvida em outro trabalho que relaciona FN e % vol. ferrita foi encontrado o valor de FN. Na geração de novos dados algumas soldas foram feitas em zigue-zague para produzir soldas mais largas e permitir medição direta de FN.

Não foi possível encontrar a composição química dos 13 elementos para todos os materiais, por tanto, uma aproximação teve que ser feita para alguns deles.

Para determinar a taxa de resfriamento foram utilizadas fórmulas já conhecidas da literatura. Entretanto, essas fórmulas são diferentes para soldas realizadas em placas grossas ou finas, ou melhor, quando deve ser considerada uma distribuição da temperatura em 3 direções ou quando apenas 2 direções é o suficiente para se obter bons resultados. O autor criou sua própria forma de identificar qual solda se encaixa em cada categoria. Já para o conjunto de dados WRC foi considerada uma taxa de resfriamento padrão de 10°C/s já que o autor não possui informação sobre as condições de soldagem. Foram realizadas 400 redes e a rede com menor RSM encontrado foi 4.70.

Em resumo, esse foi o primeiro modelo que prevê FN como uma função da composição e condições do processo (velocidade de soldagem, potência da soldagem e espessura do material), o que permite ao modelo prever diferentes valores de FN para ligas com mesma composição. A rede cobre uma taxa de resfriamento que vão de 10 a 3×10^6 $^{\circ}\text{C/s}$ e FN que vai de 0 a 131.

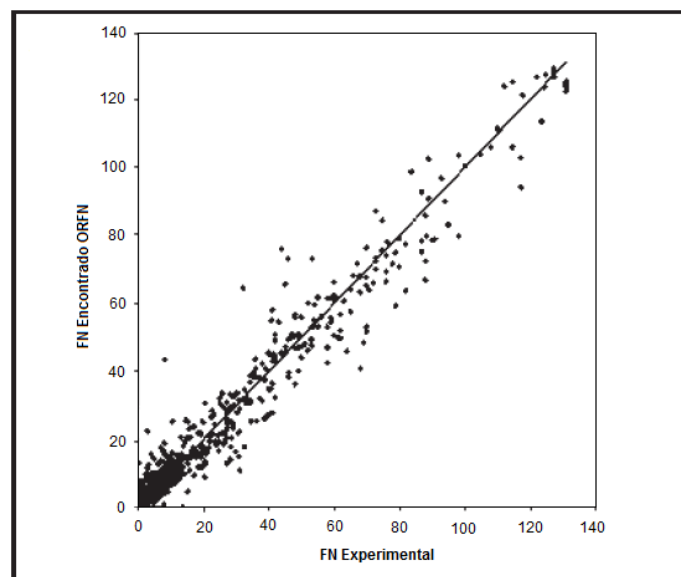


Figura 2.31 - Medida Experimental de FN X Valor Encontrado de FN para o modelo ORFN. Fonte: Vitek, et al (2003)

A Tabela 2.6 mostra uma grande melhora na rede quando considerado o conjunto de dados criado para esse trabalho, mas o mesmo não acontece para o conjunto completo de dados para treinamento do modelo FNN-1999. O efeito da inclusão da taxa de

resfriamento é essencialmente importante para aços inoxidáveis duplex, já que sua microestrutura é muito sensível a taxa de resfriamento.

Tabela 2.6 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados criado para esse trabalho "Novo conjunto de dados" e para o "Conjunto completo dos dados para treinamento" usado no trabalho anterior. Fonte: Vitek, et al (2003)

MÉTODO DE PREDIÇÃO	RSM	RSM
	usando o novo conjunto de dados (1196 pts)	usando o conjunto completo de dados para treinamento (961 pts)
Modelo ORFN	4.70	3.88
Modelo FNN-1999	11.00	3.52
Diagrama WRC-1992	9.92	5.84

A Tabela 2.7 utiliza o conjunto de dados suplementar para comparar o resultado dos diferentes métodos. O resultado para esse conjunto de dados abrange uma menor faixa de composição e soldagem a arco em condições convencionais (baixa taxa de resfriamento).

Tabela 2.7 - Comparação através da média da raiz quadrada do erro de métodos para predição de FN para o conjunto de dados suplementar usado no artigo anterior (265 pts). Fonte: Vitek, et al (2003)

MÉTODO DE PREDIÇÃO	RSM
Modelo ORFN	1.84
Modelo FNN-1999	2.24
Diagrama WRC-1992	2.59

PREDIÇÃO DE FERRITA DELTA EM AÇOS INOXIDÁVEIS USANDO ANÁLISE DE REDES NEURAI E COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS PREDITIVOS -
AUTORES: M. VASUDEVAN, A. K. BHADURI, BALDEV RAJ, K. PRASAD RAO
(2003)

Esse estudo desenvolve um modelo de redes neurais Bayesianas (BNN) para predição de ferrita delta em soldas de aços inoxidáveis. Redes Bayesianas são estruturas que representam a dependência entre variáveis, uma informação importante que não pode ser identificada pelos métodos anteriores. Nesse artigo foi verificado o efeito da concentração de cada elemento de liga nos aços inoxidáveis austeníticos tipo 309 e aços inoxidáveis duplex liga 2205. O trabalho de M. Vasudevan; M. Murugananth e A. K. Bhaduri (2002) e de M. Vasudevan; A. K. Bhaduri; B. Raj; K. Prasad Rao (2002)

verificaram a influência dos elementos de liga para os materiais 308, 308L, 316 e 316LN.

O modelo para encontrar o valor de FN possui 13 entradas, que são as porcentagens volumétricas dos elementos de liga. Para a elaboração da rede foi utilizado um banco de dados com 924 pontos com os valores da composição e o conteúdo de ferrita delta para soldas realizadas através do processo de soldagem SMA (*Shielded Metal Arc*). O banco de dados representa toda a série 300 dos aços inoxidáveis e dos aços inoxidáveis duplex e foi o mesmo banco de dados utilizado para gerar o diagrama WRC-1992.

Oitenta redes foram criadas, com o número de camadas escondidas que variam de 0 a 16. Metade dos dados foram usados para treinamento da rede (462 pontos), enquanto o restante foi usado para teste da rede e verificação de como a rede generaliza.

A raiz quadrada média do erro entre o modelo BNN, FNN-1999 e diagrama WRC-1992 foi comparada na Tabela 2.8, onde vemos que a precisão do modelo BNN é superior aos demais.

Tabela 2.8 - Comparação entre o erro RMS para o conjunto completo de dados para treinamento para diferentes formas para predição de FN. Fonte: Vasudevan, et al. (2003)

MÉTODO DE PREDIÇÃO	RSM
Modelo BNN	1.99
Modelo FNN-1999	3.52
Diagrama WRC-1992	5.84

Não será descrito como a composição de cada elemento de liga influencia a porcentagem de ferrita, porque sai do escopo desse estudo, mas vale ressaltar que a influência de um determinado elemento na formação da ferrita varia para cada material.

M. Vasudevan, M. Muruganath; A. K. Bhaduri, B. Raj, K. Prasad Rao (2004) desenvolveram posteriormente com 1020 pontos, sendo 948 os mesmos usados para gerar o diagrama WRC-1992 e os demais gerados em laboratório pelos autores do artigo. O resultado desse trabalho se aproxima muito do trabalho citado anteriormente, portanto não será descrito em maiores detalhes.

2.5.2 Redes Neurais para a predição das dimensões do cordão de solda

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. Nenhum trabalho foi encontrado utilizando aço inoxidável para predição das dimensões do cordão de solda.

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA DA UFMG: MODELAGEM DA FORMA GEOMÉTRICA
DE CORDÕES DE SOLDA UTILIZANDO AJUSTE DE CURVAS PARA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL - AUTORA: DÉBORA PEREIRA PINTO (2011)**

Como exemplo de modelagem baseada em redes neurais para predição da geometria de cordões de solda bem sucedida será descrito o trabalho de Pinto (2011). Este trabalho propôs um estudo crítico e comparativo dos modelos de predição da geometria de cordões de solda até então desenvolvidos e propôs 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. A autora realizou 125 cordões de solda pelo processo GMAW utilizando um robô industrial SK-6, da Motoman.

Foram considerados 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. O parâmetro NM foi adicionado porque, para ajustar as bordas do cordão de solda a uma fórmula matemática conhecida, as soldas com pouca molhabilidade se ajustam melhor a parábolas, enquanto as soldas com boa molhabilidade se ajustam melhor a equações de 4º grau.

Para construção da rede neural, 120 dados foram utilizados, sendo que foram escolhidos aleatoriamente 90% para treinamento e 10% para validação. Uma rede com 8 neurônios forneceu valores para 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. Para os 5 cordões utilizados no teste adicional, 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. Esses dados serão reescritos na Tabela 2.9 para facilitar a análise dos resultados.

Tabela 2.9 - Resultado do modelo para predição dos parâmetros geométricos de cordões de solda realizados por Pinto (2011).

PARÂMETRO DE SAÍDA	ERRO MÉDIO usando o conjunto de dados para treinamento (120 pts)	ERRO MÉDIO usando o conjunto de dados pra teste adicional (5 pts)	ERRO MÉDIO usando o conjunto de dados completo (125 pts)
Largura (W)	0.47 mm	0.42 mm	0.47 mm
Altura (H)	0.14 mm	0.10 mm	0.14 mm
Não-Molhabilidade (NM)	5.50%	3.27%	5.41%

**MODELAGEM GEOMÉTRICA DE SOLDAS GMA USANDO TECNOLOGIA DA
REDE NEURAL ARTIFICIAL - AUTORES: B. CHAN, J. PACEY E M. BIBBY
(1999)**

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” (l^0), conforme mostrado no esquema Figura 2.32. O comprimento “bay” é o comprimento como mostra a figura para um ângulo de 22,5°.

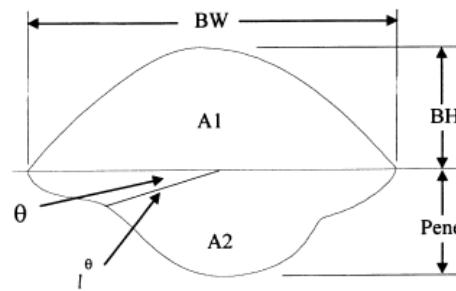


Figura 2.32 - Parâmetros geométricos do cordão de solda. Fonte: Chan *et al.* (1999), p.44.

A técnica de backpropagation (BPN) foi usada a fim de predizer 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.

Na parte experimental foram preparados 96 cordões sobre chapa, soldados através do processo GMAW, com gás de proteção contendo 25% de dióxido de carbono e 75% de argônio. A extensão (19 mm), diâmetro (0.9 mm), polaridade (DCEP) e tipo (ER70S-6) do eletrodo foram mantidos constantes durante todo o experimento. Os parâmetros variados foram tensão, corrente, velocidade de soldagem e espessura da chapa.

Fixar os parâmetros do processo (V , I , S) para determinar os parâmetros da geometria do cordão (BW , BH , $Pene$, 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 (A1) e a área fundida (A2).

A Figura 2.33 mostra o resultado do modelo para predição dos parâmetros geométricos do cordão.

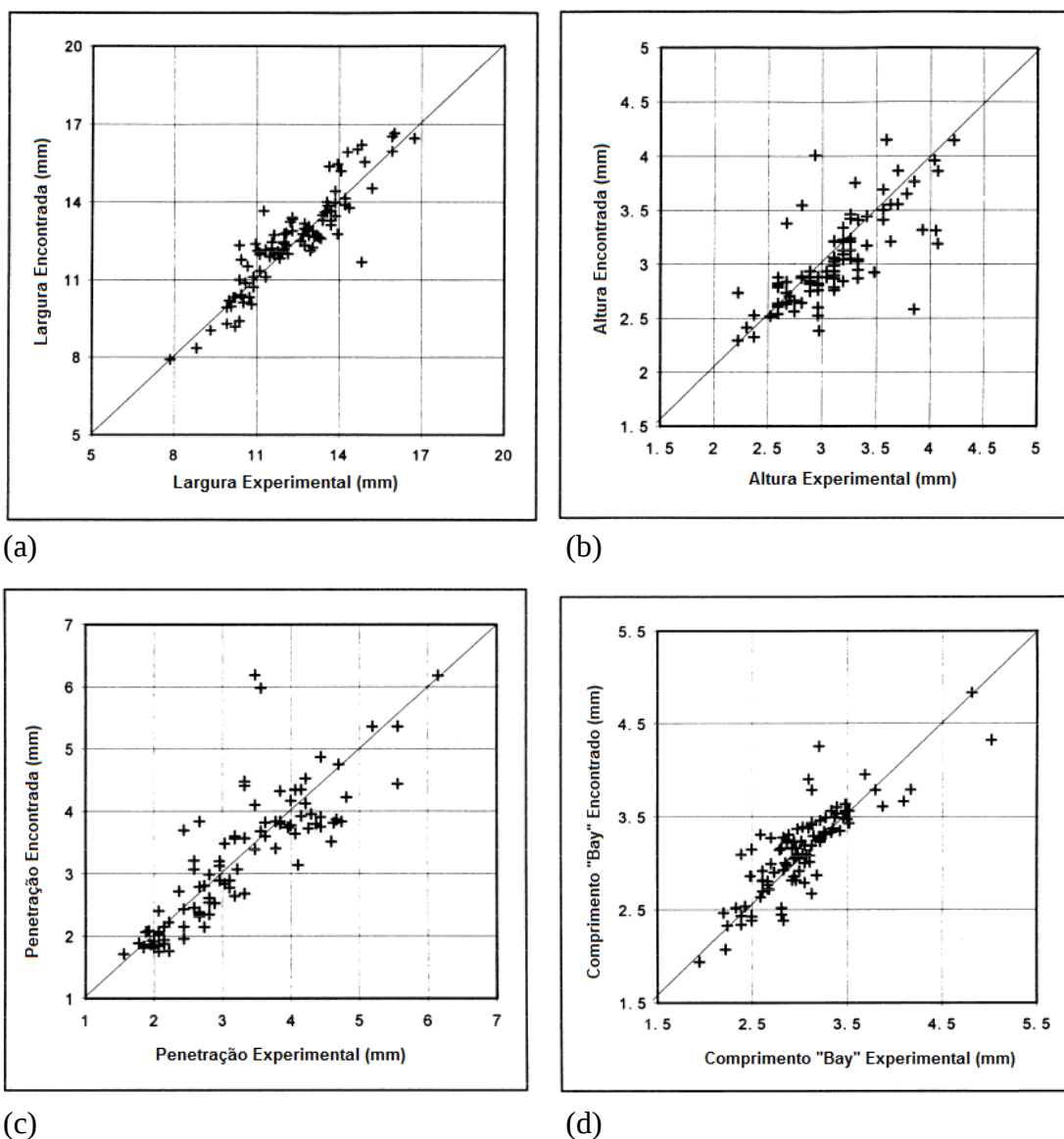


Figura 2.33 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais da Largura (a), Altura (b), Penetração (c) e Comprimento "Bay" (d) do cordão. Fonte: Chan, et al. (1999)

Tabela 2.10 - Resultado dos modelos para predição dos parâmetros geométricos de cordões de solda realizados por Chan, et al. (1999).

Dimensões da Solda	Diferença Absoluta	
	%	Desvio Padrão (mm/mm ²)
Largura	5	0.55
Altura	7	0.23
Penetração	12	0.44
Comprimento "Bay"	7	0.20
A1	12	3.23
A2	12	7.08

O resultado para o problema inverso, ou seja, encontrar os valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem está descrito na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Resultado do modelo para predição dos parâmetros de entrada dos cordões de solda quando se sabe as medidas do cordão desejadas, realizados por Chan, et al. (1999).

Dimensões da Solda	Diferença Absoluta	
	%	Desvio Padrão (A, V e mm/s)
Corrente	9	20.31
Tensão	7	1.97
Velocidade de soldagem	12	0.68

Para representar a forma do 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.

UMA INVESTIGAÇÃO EM UM SISTEMA INTELIGENTE PARA PREDIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORDÃO EM PROCESSO DE SOLDAGEM GMA - AUTORES: I. S. KIM, J. S. SON, I. J. PARK, I. J. KIM, H. H. KIM (2005)

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, enquanto 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 2.34.

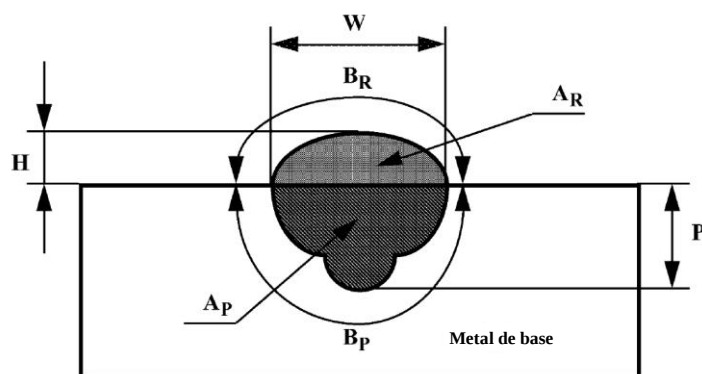


Figura 2.34 – Parâmetros geométricos do cordão de solda. Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2005), p.114.

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 curvilínea 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.

**PREDIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORDÃO EM SOLDAGEM GMA PULSADA
USANDO REDE NEURAL BACK PROGRAMATION - AUTORES: K. MANIKYA
KANTI E P. SRINIVASA RAO (2008)**

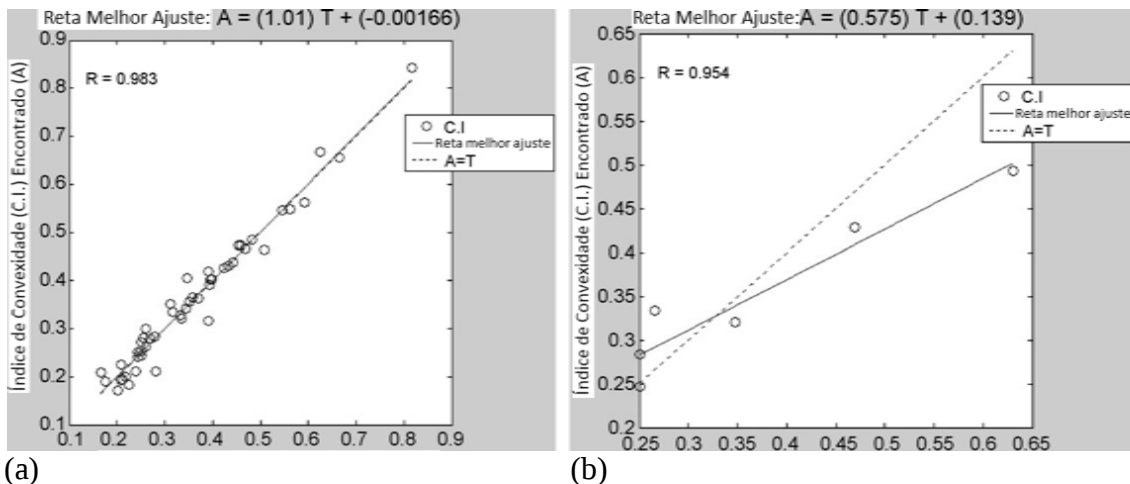
Outro modelo baseado em redes neurais foi desenvolvido por Manikya Kanti et al. (2008), porém com diferentes parâmetros de entrada e saída.

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 (C.I.).

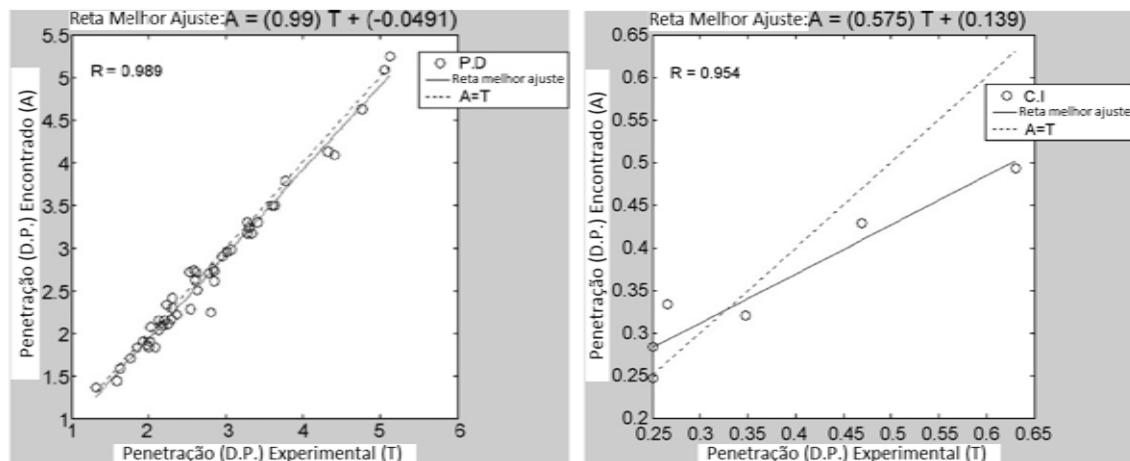
Foram soldadas 54 amostras através do processo GMAW para diferentes combinações dos parâmetros de entrada. Assim, diferentes valores de penetração e índice de convexidade foram encontrados. Dessas 54 amostras, 48 foram usadas para treinamento da rede neural, enquanto 6 amostras foram usadas para testes.

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 sigmoide.

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. Os valores medidos experimentalmente e os obtidos através da rede neural foram também plotados, como mostra a Figura 2.35 e a Figura 2.36.



(a) (b)
 Figura 2.35 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais do Índice de Convexidade para os dados para treinamento da rede (a) e para os dados para teste (b). Fonte: Manikya Kanti, et al (2008).



(a) (b)
 Figura 2.36 - Comparação entre os valores previstos pela rede neural e valores experimentais da Profundidade de penetração para os dados para treinamento da rede (a) e para os dados para teste (b). Fonte: Manikya Kanti, et al (2008).

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.

3 METODOLOGIA

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 inoxidável austenítico AISI 304 de 6 mm de espessura.

3.1 Escolha das variáveis do processo

3.1.1 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem varia com a velocidade de alimentação do arame em uma relação não linear, conforme já foi dito na Revisão Bibliográfica. O parâmetro do robô que permite a variação do valor da velocidade de alimentação e conseqüentemente da corrente é o Aweld. O robô permite a variação desse valor em uma escala de 0 a 14. O Aweld foi variado entre os seguintes valores: 3 a 7 (100 a 200 Amperes).

3.1.2 Polaridade

As soldas foram realizadas com corrente contínua com polaridade reversa (CCPR ou DCEP) já que essa é a polaridade mais indicada na soldagem, e o padrão do robô.

3.1.3 Tensão do arco (Comprimento do arco elétrico)

Tensão e comprimento do arco são variáveis que estão relacionadas. A tensão é variada no robô através Vweld. O Vweld pode ser escolhido através de uma escala de 0 a 14. O comprimento do arco é ajustado automaticamente pelo robô para chegar ao valor de tensão escolhido. Os valores de Vweld foram variados entre 5,4 e 7,8 9 (15,5 a 22,5 Volts).

3.1.4 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem foi mantida constante para todos os cordões de solda em 50 cm/min.

3.1.5 Extensão do Eletrodo ou Distância do Bico de Contato à Peça

Como já foi dito o valor da extensão do eletrodo em um sistema robotizado é controlado pelo robô através do ajuste da tensão. A distância do bico de Contato à peça foi 18mm, conforme mostrado na Figura 3.1

3.1.6 Orientação do Eletrodo

O cordão foi realizado puxando a poça, já que dessa forma o cordão apresenta uma maior penetração, menos respingo e o arco é mais estável. . O ângulo entre orientação do eletrodo e a reta normal à face da solda utilizado em todas as soldas foi 15°.



Figura 3.1 - Programação do robô com os parâmetros de soldagem: Orientação do eletrodo e distância do bico de contato a peça.

3.1.7 Posição da solda

Todas as soldas foram realizadas na posição plana.

3.1.8 Diâmetro e material do arame de adição

Todos os arames utilizados possuem 1,2 mm de diâmetro. Foram utilizados 3 tipos de arame. São mostradas a seguir as principais características, composição desses arames e

outras informações que serão utilizadas nesse trabalho, conforme a norma AISI/AWS A5.9 (1993).

Tabela 3.1 - Composição de arames, conforme AISI/AWS A5.9 (1993).
Requisitos de Composição Química

Classificação AWS	Composição, %P*									
	*Valores sozinhos são as porcentagens máximas									
ER308LSi	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
	0,03	19,5-22,0	9,0-11,0	0,75	1,0-2,5	0,65-1,00	0,03	0,03	-	0,75
ER309LSi	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
	0,03	23,0-25,0	12,0-14,0	0,75	1,0-2,5	0,65-1,00	0,03	0,03	-	0,75
ER312	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
	0,15	28,0-32,0	8,0-10,5	0,75	1,0-2,5	0,30-0,65	0,03	0,03	-	0,75

ER 308LSi - Composição Nominal (%P) dessa classificação é 21% de Cr, 10% de Ni. Esse arame é mais freqüentemente utilizado para solda de material parecidos com ele, em particular o tipo 304. "L" indica que o material é baixo carbono ($< 0,03$) o que reduz a possibilidade de formação de carbonetos entre os grãos e conseqüentemente a corrosão intergranular. "Si" indica altas quantidades de silício, o que melhora sua utilização para o processo GMAW. Se o metal de base possui pequena quantidade de ferrita ou somente austenita, o silício faz com que a sensibilidade a trinca da solda seja um pouco maior.

ER 309LSi - Composição Nominal (%P) dessa classificação é 24% de Cr, 13% de Ni. Esse arame é mais freqüentemente utilizado para solda de material parecidos com ele, na forma de forjados e fundidos. Ocasionalmente é usado para soldar metal de base do tipo 304 ou similar quando em condições severas de corrosão. "L" indica que o material é baixo carbono ($< 0,03$) o que reduz a possibilidade de formação de carbonetos entre os grãos e conseqüentemente a corrosão intergranular, entretanto produz soldas menos resistentes a altas temperaturas. "Si" indica altas quantidades de silício, o que melhora sua utilização para o processo GMAW. Se o metal de base possui pequena quantidade de ferrita ou somente austenita, o silício faz com que a sensibilidade a trinca da solda seja um pouco maior.

ER 312 - Composição Nominal (%P) dessa classificação é 30% de Cr, 9% de Ni. Metais de adição dessa classificação são originalmente projetados para soldar ligas

fundidas ou de composição similar. Também pode ser utilizado para soldar materiais diferentes desde aços carbonos até aços inoxidáveis, particularmente aqueles com grandes quantidades de níquel.

Uma importante característica dos aços inoxidáveis é o valor do Cromo e Níquel equivalente. Cada autor considera uma fórmula diferente para encontrar esses valores, como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores de Cromo e Níquel equivalentes para arames ER308LSi, ER309LSi e ER312.

VALORES DE CROMO E NÍQUEL EQUIVALENTES

		ER308L Si	ER309L Si	ER312
WRC (1992)	$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu$	10,6	13,6	11,7
	$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb$	21,4	24,4	30,4
Schaeffler (1949)	$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn$	11,3	14,3	12,1
	$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$	22,6	25,6	31,1

3.1.9 Gás de proteção: tipo e vazão

O gás utilizado foi o Agamix 12 da Linde Gases, contendo 98% de argônio e 2% de oxigênio e vazão de 15L/min para todos as cordões. A vazão foi medida através do fluxômetro conectado a válvula do cilindro de gás e confirmada através de um fluxômetro como mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Fluxômetro (bibímetro).

3.1.10 Metal de Base

Para todas as soldas o metal de base foi do tipo 304. Seguem nas tabelas abaixo a composição química da chapa utilizada, conforme informação fornecida pelo fabricante (Arcelor Mittal) e outras informações importantes.

Tabela 3.3 - Composição da chapa de Aço Inoxidável Austenítico tipo 304. Fonte: Relatório fornecido pela Arcelor Mittal.

Composição Química									
Composição, %P (Valores sozinhos são as porcentagens máximas)									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
0,24	18,21	8,01	0,096	1,35	0,55	0,034	-	-	0,0778

Tabela 3.4 - Valores de Cromo e Níquel equivalente para a chapa 304 de acordo com diferentes autores.

VALORES DE CROMO E NÍQUEL EQUIVALENTES			CHAPA 304
WRC (1992)	$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu$ $Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb$		16,4
			18,3
Schaeffler (1949)	$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn$ $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$		15,9
			19,1

3.2 **Parâmetros de Saída**

Para obter medidas em milímetros de cada cordão, utilizou-se uma escala milimétrica na direção horizontal da seção, como mostra a Figura 3.3. Assim, foi determinado o correspondente em pixels para cada milímetro real e então foi possível encontrar as dimensões desejadas (largura, reforço e penetração do cordão) em milímetros. As análises de dimensões do cordão foram feitas no programa Quantikov 2009. Cada medida foi feita 3 vezes e depois feita a média entre elas. O valor de diluição também foi obtido pelo Quantikov através da relação entre as áreas.

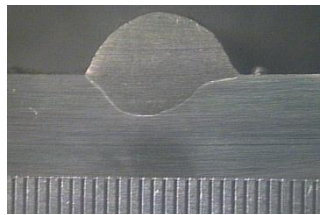


Figura 3.3 - Foto de um cordões com escala milimétrica.

A quantidade de ferrita foi obtida através do 'Ferritscope' mostrado na Figura 3.4. Foram feitas 15 medições ao longo do cordão, excluindo as extremidades do cordão. O resultado utilizado nesse trabalho foi a média dos 15 valores.

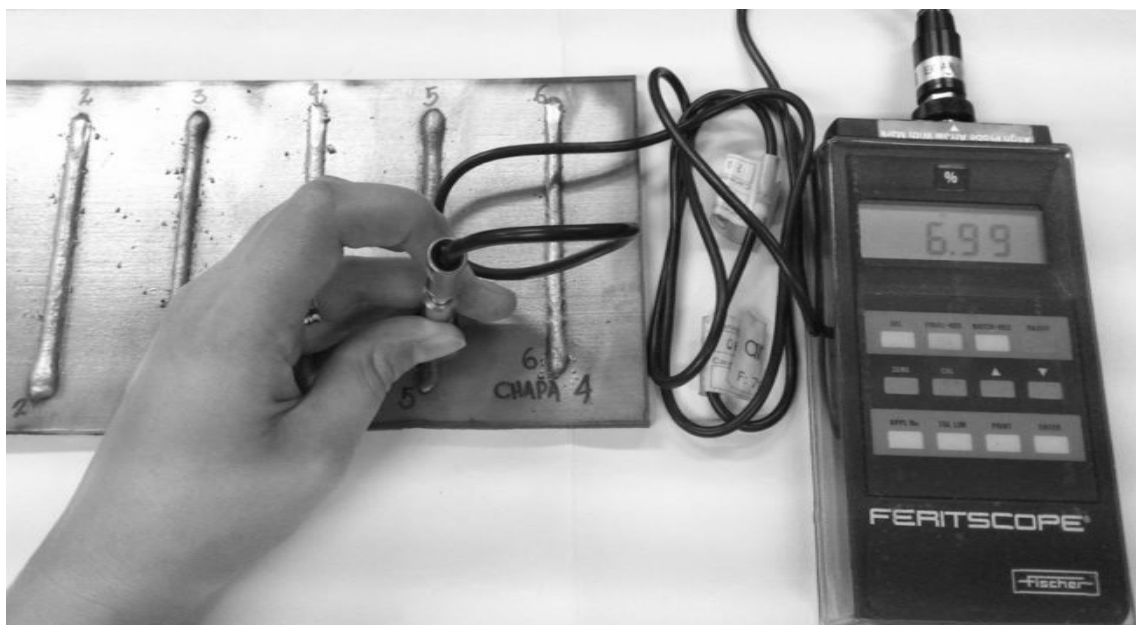


Figura 3.4 - Ferritscope: equipamento usado para medição do " Ferrite Number".

A Tabela 3.5 mostra os valores utilizados para treinamento da Rede Neural e a Tabela 3.6 mostra os dados utilizados para teste adicional.

Tabela 3.5 - Dados utilizados para treinamento do modelo (67 pontos).

Arame	Vweld	Aweld	FN	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição
308	5,4	3	5,27	4,73	2,16	0,82	0,17
308	5,4	4	5,73	5,53	2,47	0,86	0,18
308	5,4	5	6,07	5,96	2,75	1,03	0,18
308	6	3	5,17	5,20	2,02	0,76	0,22
308	6	4	5,45	5,91	2,43	1,08	0,24
308	6	5	5,88	6,48	2,68	1,23	0,22

Arame	Vweld	Aweld	FN	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição
308	6	7	5,56	7,73	2,95	1,38	0,26
308	6,6	3	5,70	6,17	2,02	0,47	0,15
308	6,6	5	5,86	7,75	2,45	1,35	0,24
308	6,6	7	5,52	8,25	2,86	1,85	0,31
308	7,2	3	5,59	7,31	1,39	0,59	0,16
308	7,2	4	5,85	7,24	2,06	0,98	0,24
308	7,2	5	5,87	7,90	2,55	1,47	0,30
308	7,2	7	5,56	8,87	2,72	2,25	0,36
308	7,8	3	5,11	7,51	1,52	0,77	0,29
308	7,8	4	5,15	7,64	2,06	1,42	0,37
308	7,8	5	5,68	7,63	2,18	2,03	0,37
308	7,8	6	5,66	9,11	2,43	2,94	0,40
308	7,8	7	5,95	9,70	2,70	3,42	0,38
309	5,4	4	6,50	5,43	2,78	1,03	0,23
309	5,4	5	6,80	5,43	3,04	1,28	0,22
309	5,4	6	6,95	6,69	3,29	1,18	0,17
309	6	3	6,68	4,53	2,22	1,07	0,29
309	6	4	7,07	5,77	2,50	1,20	0,30
309	6	4,5	7,55	6,35	2,73	1,49	0,27
309	6	5	7,20	6,22	2,74	1,12	0,22
309	6	6	6,69	6,77	3,16	1,54	0,25
309	6	7	6,96	7,33	3,24	1,68	0,25
309	6,6	3	6,67	4,87	2,03	0,96	0,25
309	6,6	4	6,47	6,19	2,30	1,44	0,32
309	6,6	5	6,73	6,67	2,65	1,72	0,34
309	6,6	6	6,80	6,60	2,99	1,80	0,32
309	6,6	7	7,05	7,35	2,93	2,17	0,35
309	6,8	3,3	6,92	6,06	2,08	1,31	0,32
309	7,2	3	7,68	6,08	1,79	0,92	0,29
309	7,2	4	7,65	6,17	2,24	1,71	0,37
309	7,2	5	7,38	6,99	2,43	1,85	0,38
309	7,2	6	6,76	7,84	2,69	1,97	0,31
309	7,2	7	7,04	9,07	2,97	2,39	0,38
309	7,5	6,5	7,31	8,55	2,71	2,55	0,40
309	7,8	3	6,88	6,02	1,92	0,74	0,24
309	7,8	5	7,50	7,24	2,39	2,73	0,43
309	7,8	6	7,15	6,99	2,77	1,88	0,35
312	5,4	3	2,20	4,09	2,23	0,88	0,20
312	5,4	4	2,00	4,98	2,85	0,93	0,16
312	5,4	5	2,72	5,28	2,93	1,14	0,21
312	6	3	2,79	4,13	2,26	1,08	0,27
312	6	4	3,57	5,42	2,40	1,30	0,29

Arame	Vweld	Aweld	FN	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição
312	6	5	3,24	5,97	2,52	1,43	0,28
312	6	7	3,60	6,86	3,26	1,86	0,29
312	6,2	4,8	3,95	6,79	2,41	1,45	0,30
312	6,6	3	4,03	5,69	1,94	0,76	0,21
312	6,6	4	4,01	6,15	2,16	1,60	0,32
312	6,6	5	3,80	6,67	2,33	1,56	0,29
312	6,6	6	3,94	7,43	2,75	1,77	0,34
312	6,6	7	3,73	8,11	2,95	1,96	0,32
312	7,2	3	4,98	5,53	1,54	0,57	0,23
312	7,2	4	4,14	6,03	2,13	1,64	0,35
312	7,2	5	3,96	7,60	2,54	1,78	0,32
312	7,2	6	3,98	8,13	2,64	2,13	0,36
312	7,2	7	3,73	8,52	2,74	1,88	0,32
312	7,8	3	5,04	5,86	1,78	1,14	0,34
312	7,8	4	4,42	6,80	2,25	1,90	0,39
312	7,8	5	4,03	8,35	2,55	2,22	0,39
312	7,8	6	3,72	8,76	2,42	2,13	0,41
312	7,8	7	3,58	8,82	2,55	2,51	0,40
312	7,8	7,5	3,81	8,99	2,86	2,84	0,40

Tabela 3.6 - Dados utilizados para teste adicional (3 pontos).

Arame	Vweld	Aweld	FN	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição
308	6,6	4	5,77	6,66	2,12	0,98	0,23
309	7,8	4	7,24	7,09	2,41	2,10	0,38
312	6,8	3,3	4,73	6,28	2,17	1,31	0,34

3.3 Aplicação das técnicas de modelagem: Redes Neurais Artificiais

A rede neural foi criada utilizando o Matlab e sua ferramenta Neural Network. Essa ferramenta disponibiliza quatro ferramentas de assistentes de montagem de redes para quatro diferentes tipos de problemas, são eles o '*Fitting Tool*', '*Pattern Recognition Tool*', '*Clustering Tool*' e '*Time Series Tool*'. Foi utilizado o assistente para criação de redes '*Fitting Tool*', que se trata de uma rede multicamadas com aprendizado supervisionado que utiliza função de ativação sigmoideal para todas as camadas de neurônios escondidos e função linear para as camadas de neurônios de saída.

Foram utilizados 68 cordões para treinamento da rede, sendo que 53 pontos foram usados para treinamento, 7 para validação e 7 para teste. A divisão desses exemplos é feita aleatoriamente pelo programa. Sempre que a rede é gerada a divisão desses valores muda, portanto dificilmente duas redes apresentam o mesmo desempenho mesmo que a quantidade de camadas e dados para treinamento sejam os mesmos. Foram separados 03 cordões para teste adicional, realizado quando a rede já está configurada.

Os valores serão avaliados de acordo com o Erro Médio Quadrado ou MSE (Mean Squared Error), como mostra a equação 3.1. Quanto mais próximo esse valor está de zero melhor.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Experimental} - X_{Encontrado})^2 \quad 3.1$$

Outra forma que será utilizada aqui para avaliar o desempenho é o Erro Médio Percentual, que pode ser visto na equação 3.2.

$$ERRO \text{ MÉDIO } \% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_{Experimental} - X_{Encontrado}|}{X_{Experimental}} \right) * 100 \quad 3.2$$

Antes de definir a quantidade de neurônios da camada escondida, a rede foi testada com diferentes números e o erro médio quadrado dos cordões reservados para teste adicional foi anotado, como pode ser visto na Tabela 3.7. Como já foi dito o desempenho da rede também depende de como foi feita a divisão aleatória do programa dos dados para treinamento, validação e teste; portanto a rede foi rodada 5 vezes para cada quantidade de camada escondida e o menor valor entre eles foi anotado para definir a quantidade de camadas que seriam utilizadas.

Tabela 3.7 - Erro Médio Quadrado dos testes adicionais para diferentes quantidades de neurônios da camada escondida.

Quant. Neurônios	MSE	Quant. Neurônios	MSE
1	2.30150e-1	11	1.55977e-1
3	1.65599e-1	12	1.49445e-1
5	1.832006e-1	14	1.22055e-1
7	1.39422e-1	16	2.22093e-1
9	1.3574e-1	18	3.67456e-1
10	1.15380e-1	20	1.22072e-1

Foi escolhida a utilização de 10 camadas escondidas já que está apresentou melhores resultados como mostra a Tabela 3.7.

4 RESULTADOS

Serão apresentadas duas redes com a mesma estrutura, mostra na Figura 4.1, ou seja, 4 parâmetros de entrada, 10 neurônios na camada escondida com função de ativação sigmoideal, 4 neurônios na camada de saída com função de ativação linear e 4 parâmetros de saída.

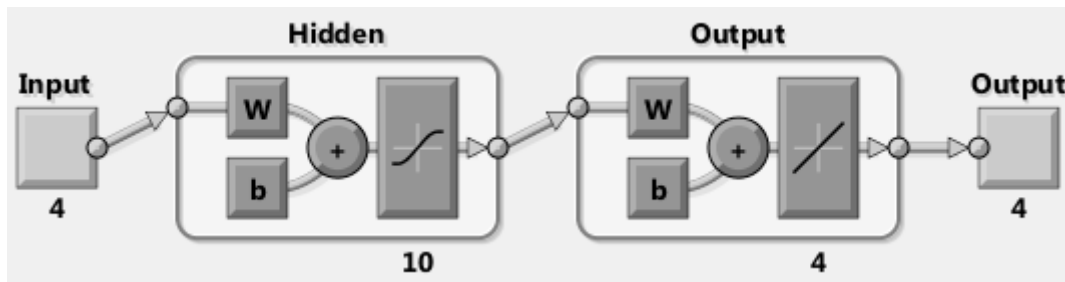


Figura 4.1 - Estrutura das Redes criadas

Primeira Rede

A primeira rede utiliza como valores de entrada Cr e Ni equivalentes conforme a fórmula de Shaeffler, Vweld e Aweld, e como valores de saída FN e as medidas de largura, reforço e penetração do cordão. Foi usada 1 camada escondidos com 10 neurônios e os resultados foram satisfatórios, além da conversão ter sido muito rápida.

A Figura 4.2 apresenta um dos gráficos gerados pelo programa que mostra o treinamento da rede e o método utilizado para evitar treinamento excessivo. O modelo é feito e refeito para ajuste dos pesos por N vezes, enquanto o MSE do conjunto de dados de teste, validação e treinamento é medido. O desempenho do conjunto de dados de validação costuma descer e depois volta a subir. Quando sobe é porque a rede está decorando e não mais aprendendo os valores, logo os pesos que levaram a um menor valor MSE do conjunto de dados de validação é considerado o melhor.

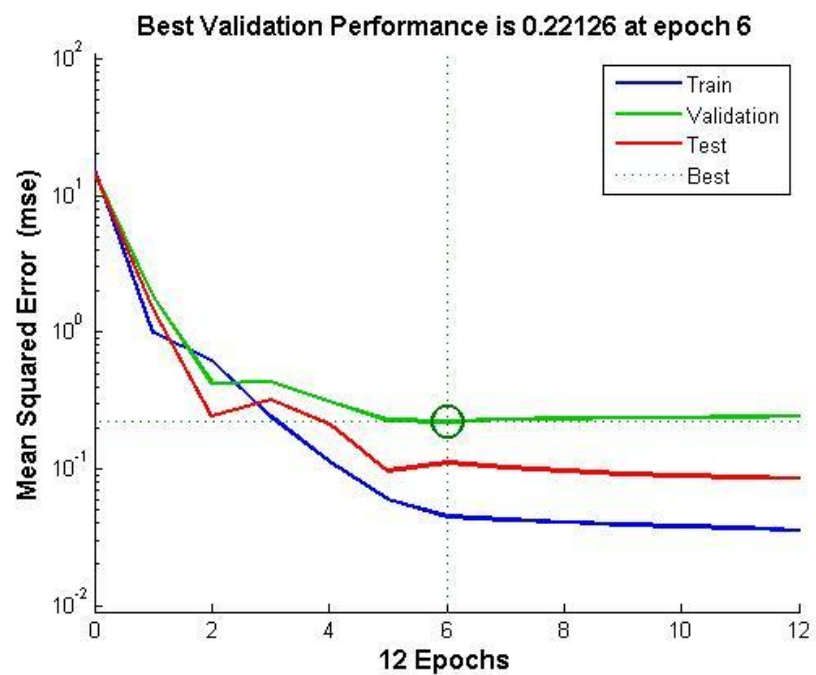
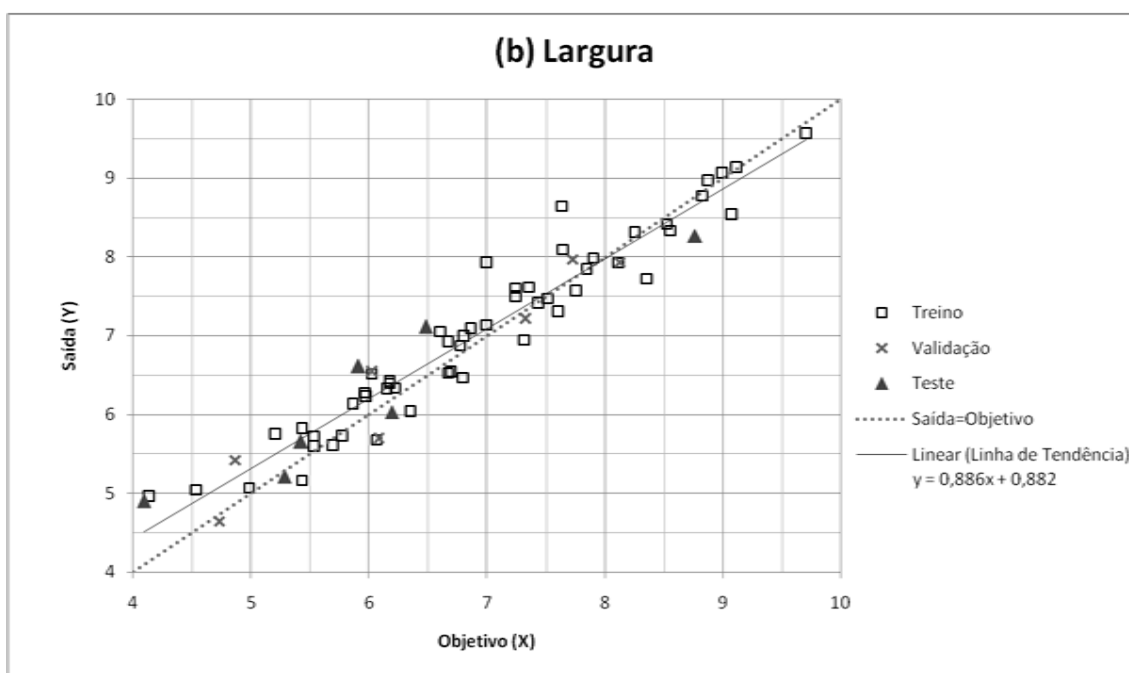
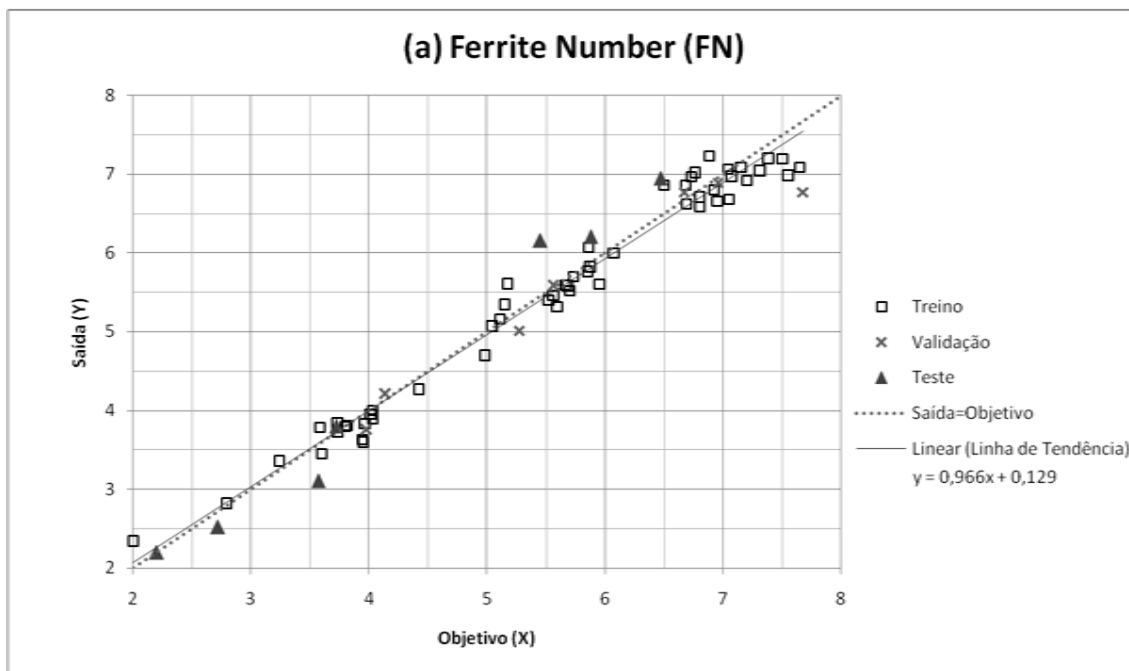


Figura 4.2 - Gráficos retirados do Matlab que mostram o treinamento na rede.

O desempenho da rede para prever cada um dos parâmetros pode ser avaliado pelos gráficos mostrados na Figura 4.3.



(continua na próxima página)

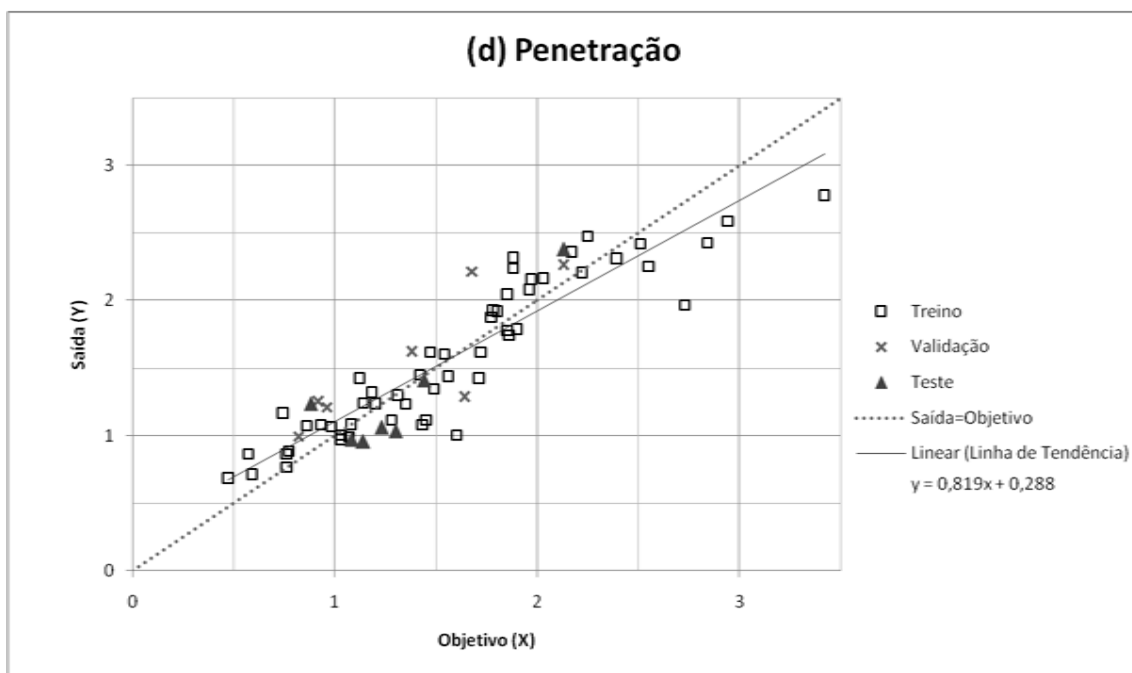
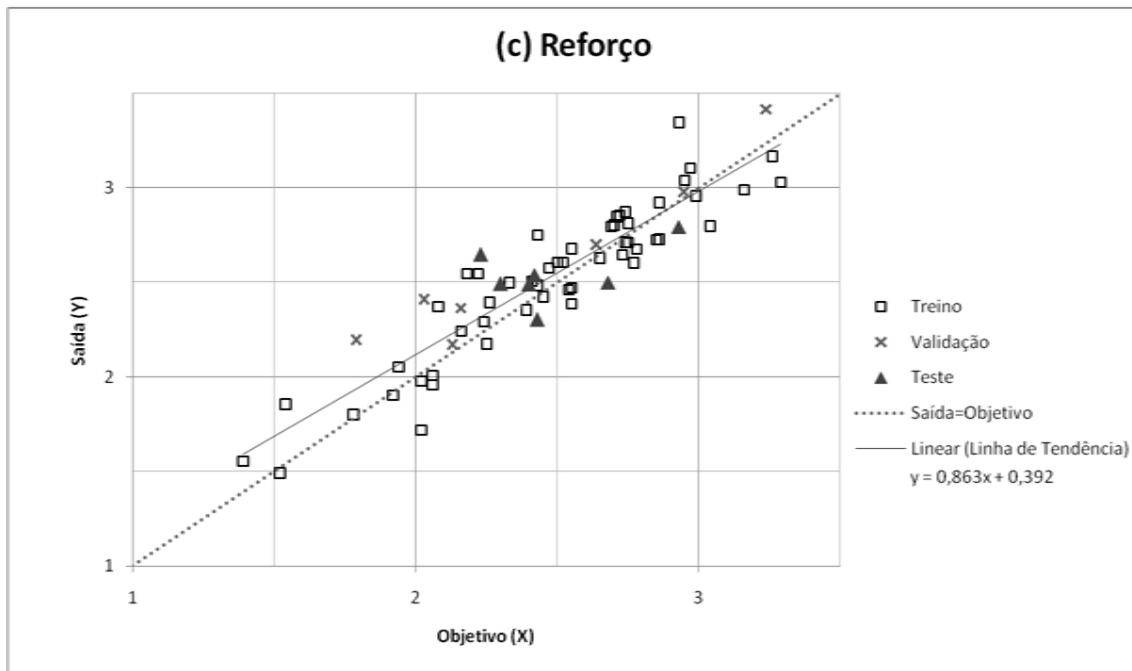


Figura 4.3 - Gráficos que mostram o desempenho da rede para as parâmetros de saída: (a) FN, (b) Largura, (c) Reforço e (d) Penetração do cordão.

Tabela 4.1 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede.

	MSE	Erro Médio (%)	Erro Máximo
FN	0,07	4%	0,91 (17%)
Largura	0,14	5%	1,01 (20%)
Reforço	0,03	6%	0,42 (23%)
Penetração	0,07	15%	0,76 (47%)

Foram separados 03 cordões para a realização de teste adicional depois que a rede já estava configurada. Os valores de saída encontrados para os cordões adicionais estão mostrados na Tabela 4.2 e na Figura 4.4 está a representação por diagramas da rede neural.

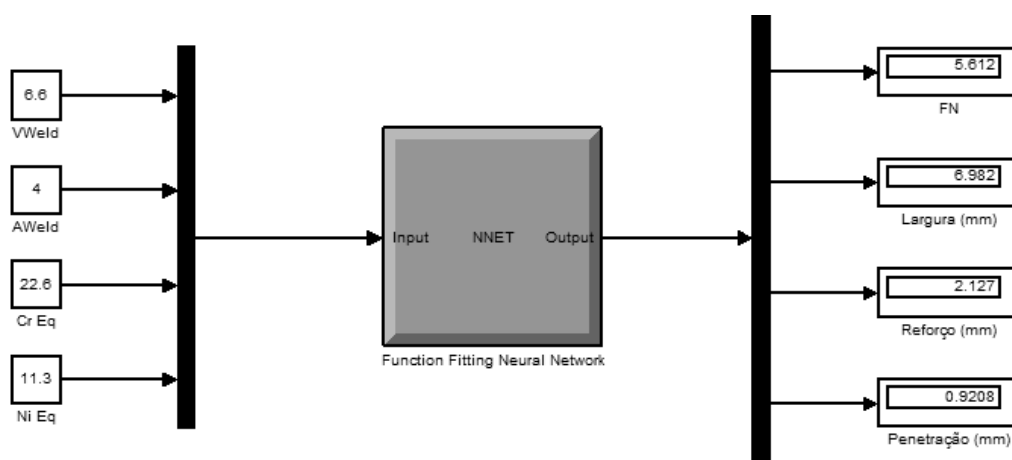


Figura 4.4 - Simulink: representação por diagramas da primeira rede neural .

Tabela 4.2 - Valores encontrados pela rede neural 1 para os cordões adicionais.

DADOS DOS CORDÕES SOBRESSALENTES											
Entrada				Objetivo				Saída			
Vweld	Aweld	Cr	Ni	FN	L	R	P	FN	L	R	P
6,60	4,00	22,60	11,30	5,77	6,66	2,12	0,98	5,61	6,98	2,13	0,92
7,80	4,00	25,60	14,20	7,24	7,09	2,41	2,10	7,11	7,00	2,31	1,98
6,80	3,30	31,10	12,10	4,73	6,28	2,17	1,31	4,18	5,87	1,77	0,89

Tabela 4.3 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede para os cordões sobressalentes.

	MSE	Erro Médio (%)
FN	0,11	5,4%
LARGURA	0,09	4,2%
REFORÇO	0,06	7,6%
PENETRAÇÃO	0,06	14,4%

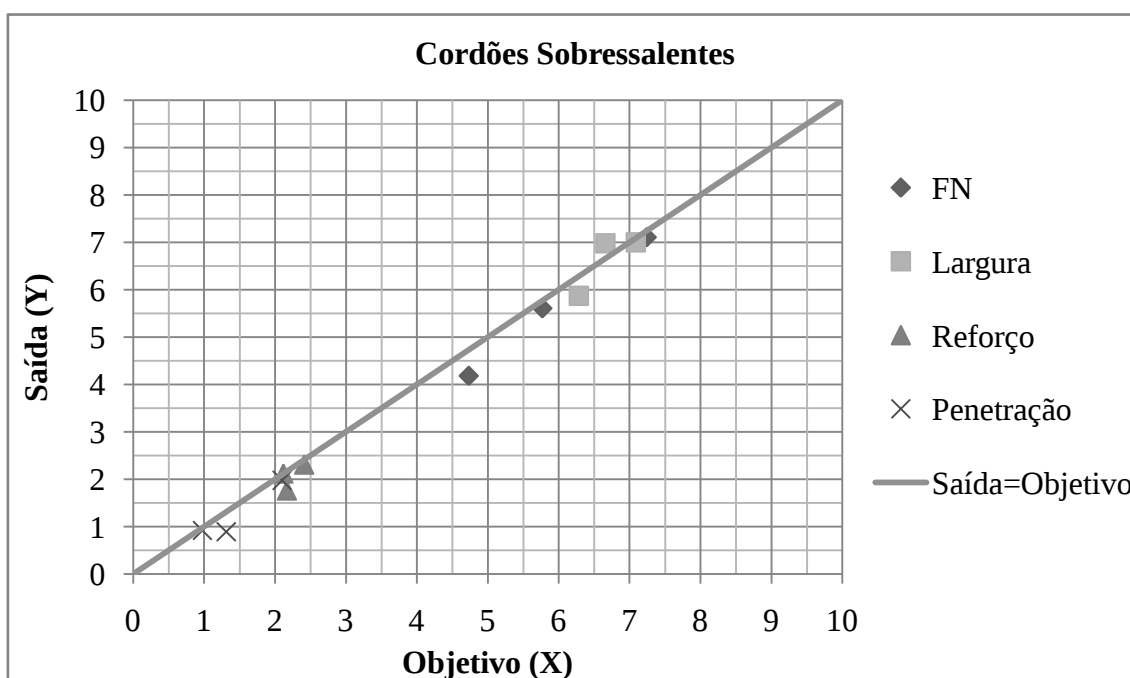


Figura 4.5 - Gráfico mostrando o desvio entre o objetivo e a saída da rede para os cordões separados para testes adicionais.

A predição da largura do cordão se mostrou mais eficiente que o reforço. Essa observação pode ser explicada pela maior influência do reforço as condições ambientais. Essa mesma observação foi feita no trabalho de Chan, et al (1999) assim como a observação que a predição do reforço possui uma eficiência ainda menor. Entretanto, não foi encontrada uma explicação para esse último fato.

Segunda Rede

A segunda rede apresentada nesse trabalho utiliza como parâmetros de entrada os valores de FN e as medidas de largura, reforço e penetração do cordão e como valores de saída Cr e Ni equivalentes conforme a fórmula de Shaeffler, Vweld e Aweld.

O objetivo da apresentação dessa rede é a implantação no futuro de redes neurais desse tipo em robôs que irão permitir que o operador escolha quais as características finais do cordão e os valores de tensão, corrente, velocidade de soldagem, material de adição entre outros que se adéquem a necessidade sejam encontrados sozinhos. Ou seja, não será mais necessário que o operador teste vários parâmetros de entrada até encontrar os parâmetros que satisfaçam sua necessidade.

A Figura 4.6 mostra o treinamento da rede neural.

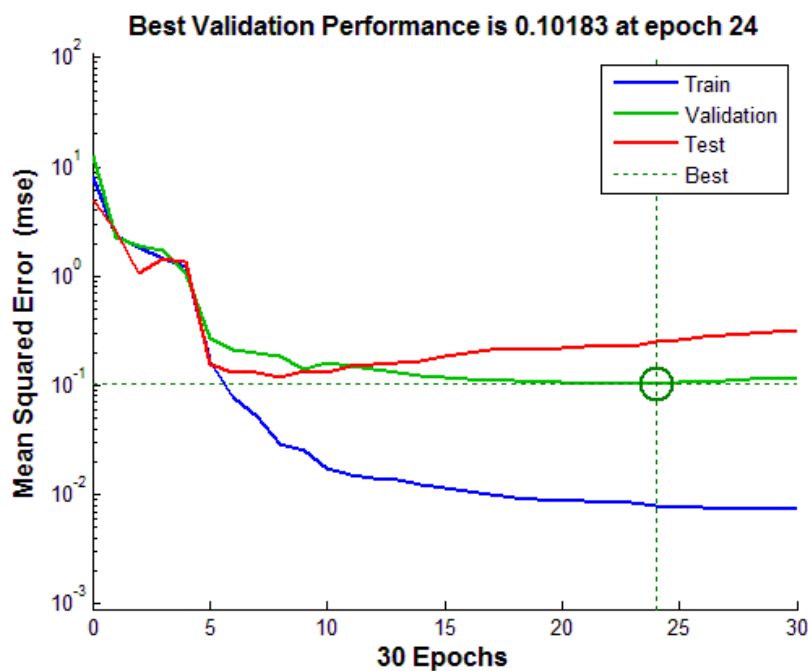
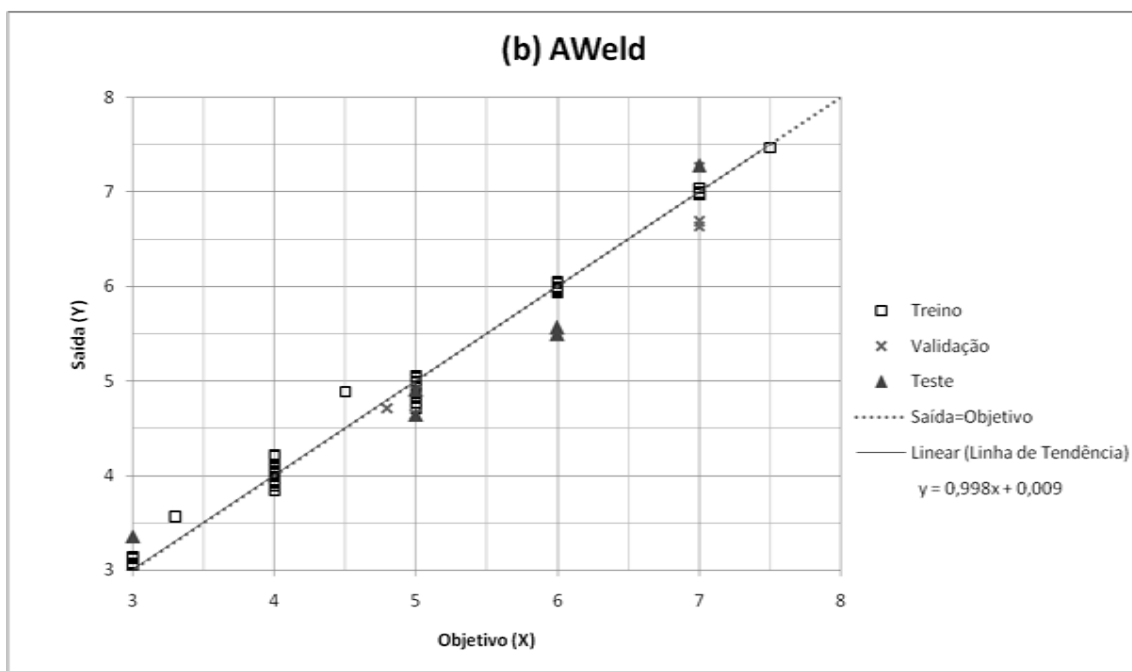
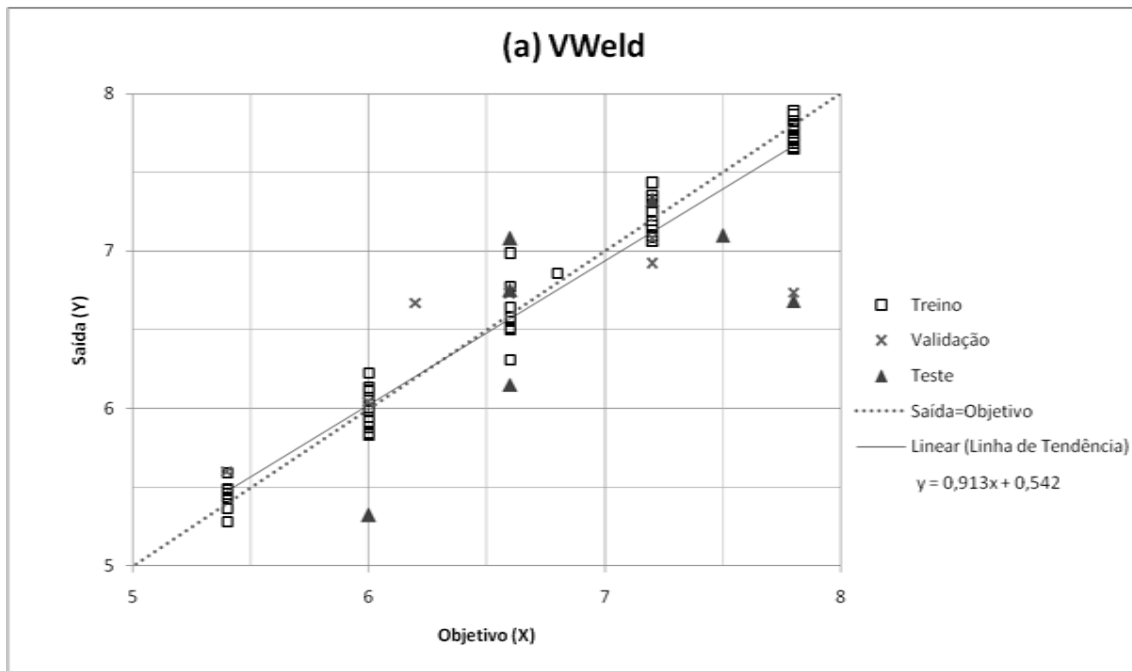


Figura 4.6 - Gráfico do MATLAB que mostra o treinamento da rede.

A Figura 4.7 mostra o desempenho da rede para cada um dos parâmetros de saída.



(continua na próxima página)

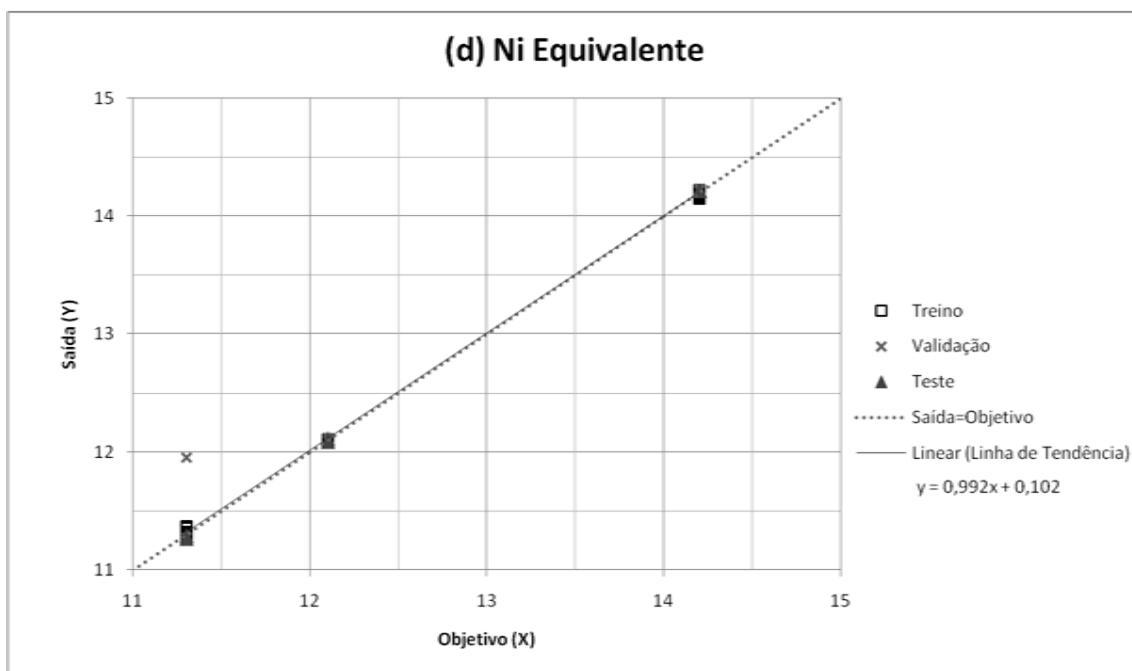
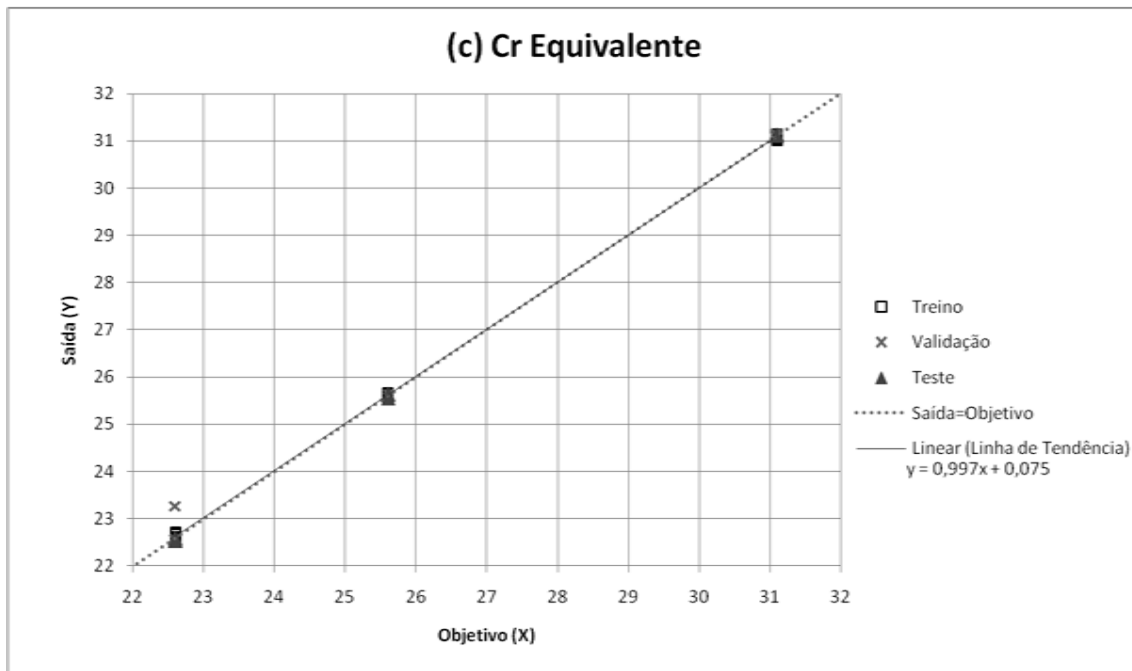


Figura 4.7 - Gráficos que mostram o desempenho da rede para as parâmetros de saída: (a) VWeld, (b) AWeld, (c) Cr Equivalente e (d) Ni Equivalente.

Tabela 4.4 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede

	MSE	Erro Médio (%)	Erro Máximo
Vweld	0,07	2,45%	1,12 (14%)
Aweld	0,09	3,17%	1,97 (30%)
Cr eq	0,01	0,16%	0,66 (3%)
Ni eq	0,01	0,19%	0,66 (6%)

Segue tabela que mostram o desempenho da rede com os 03 cordões que foram separados para realização de testes adicionais, assim como o diagrama de blocos da rede. Foram utilizados os mesmos cordões para os testes adicionais que na rede anterior.

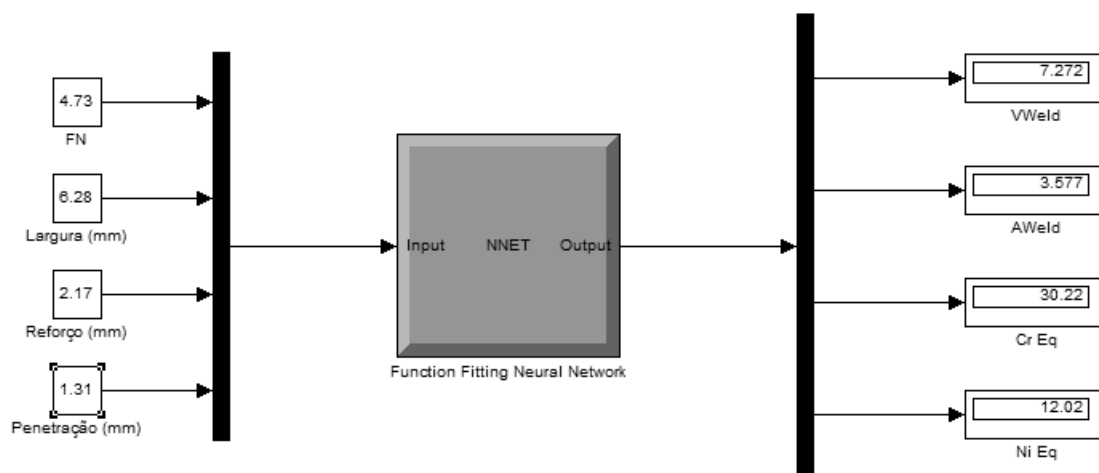


Figura 4.8 - Simulink: representação por diagramas da segunda rede neural.

Tabela 4.5 - Valores encontrados pela rede neural 2 para os cordões adicionais.

Dados dos Cordões Sobressalentes											
Entrada				Objetivo				Saída			
FN	L	R	P	Vweld	Aweld	Cr	Ni	Vweld	Aweld	Cr	Ni
5,77	6,6591	2,1167	0,975	6,6	4	22,6	11,3	7,01	3,83	22,57	11,33
7,24	7,0853	2,4114	2,0995	7,8	4	25,6	14,2	7,39	4,96	25,61	14,21
4,73	6,2827	2,167	1,3116	6,8	3,3	31,1	12,1	7,27	3,58	30,22	12,02

Tabela 4.6 - Valores de Média do Erro ao Quadrado e Erro Médio em porcentagem de cada um dos parâmetros de saída da rede para os cordões sobressalentes.

	MSE	Erro Médio (%)
Vweld	0,19	6,1%
Aweld	0,34	12,2%
Cr eq	0,26	1,0%
Ni eq	2,48e-3	0,3%

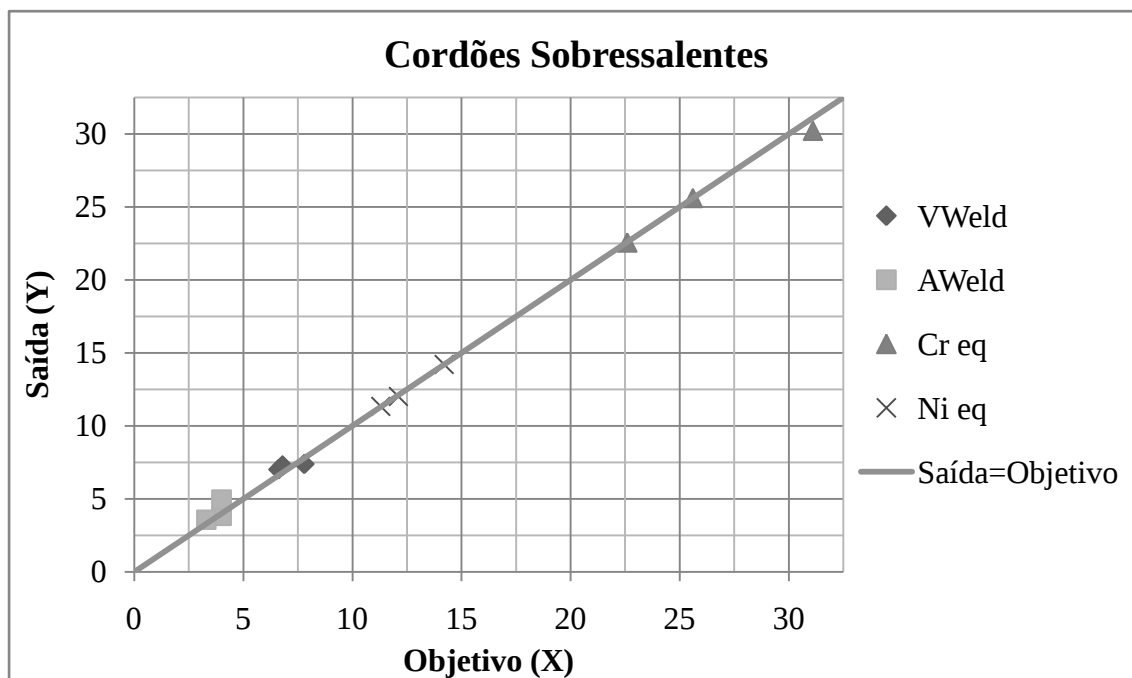


Figura 4.9 - Gráfico mostrando o desvio entre o objetivo e a saída da rede para os cordões separados para testes adicionais.

A predição do Vweld e Aweld foi eficiente, entretanto, a predição do Cr e Ni equivalentes foi excepcional. A relação entre a quantidade de ferrita para os valores de Cr e Ni equivalentes é uma relação mais simples, já que as faixas de FN para cada arame não se intercalam para os arames propostos.

Não foi possível encontrar uma relação que explique porque o Vweld apresentou melhores resultados que o Aweld.

4.1 Comparação dos Resultados

Esse trabalho foi comparado com outros trabalhos similares que publicaram seus resultados de forma conveniente para essa análise.

Comparando a equação 2.18 com a Equação 3.1, chega-se a seguinte conclusão:

$$RMS = \sqrt{MSE} \quad 4.1$$

4.1.1 Quantidade de Ferrita

O diagrama constitucional WRC-1992, e os trabalhos de Vitek, et al. (2000), Vitek, et al. (2003), Vasudevan, et al. (2003) foram comparados ao trabalho atual na Tabela 4.7 e 4.8 através do RMS.

Tabela 4.7 - Comparação de vários trabalhos pelo RMS dos pontos utilizados para treinamento da rede.

MÉTODO DE PREDIÇÃO	ΔFN	Nº Pontos	RMS
Diagrama WRC-1992	0-117	961	5.84
FNN-1999 (Vitek, et al., 2000)	0-117	961	3.52
ORFN (Vitek, et al., 2003)	0-117	961	3.88
BNN (Vasudevan, et al., 2003)	0-117	924	1.99
Trabalho Atual	2-8	67	0.27

Tabela 4.8 - Comparação de vários trabalhos pelo RMS dos pontos utilizados para teste adicional, ou seja, pontos que até então não foram utilizados durante a elaboração do modelo de rede neural.

MÉTODO DE PREDIÇÃO	ΔFN	Nº Pontos	RMS
Diagrama WRC-1992	0-117	265	2.59
FNN-1999 (Vitek, et al., 2000)	0-117	265	2.24
ORFN (Vitek, et al., 2003)	0-117	265	1.84
Trabalho Atual	2-8	3	0.34

Todos os outros trabalhos comparados com o trabalho atual foram elaborados com o mesmo banco de dados (Banco de Dados do Diagrama WRC-1992) para uma faixa de FN ampla que inclui aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis duplex, ao contrário desse trabalho, que foi realizado apenas com aços inoxidáveis austeníticos e uma pequena faixa de FN. O banco de dados WRC foi gerado com soldas autógenas, já o trabalho apresentado aqui criou um banco de dados com soldas realizadas a partir do processo GMAW com diferentes metais de base e adição.

Tabela 4.9 - Comparação entre os erros do Modelo FNN-1999 e Diagrama WRC-1992 para uma menor faixa de FN ($FN \leq 18$) e pra o trabalho atual ($2 \leq FN \leq 8$) para o conjunto completo dos dados para treinamento.

Erro Absoluto	Modelo FNN-1999		Diagrama WRC-1992		Trabalho Atual	
	Nº pontos	% do Total	Nº pontos	% do Total	Nº pontos	% do Total
≤ 1.5	590	74.0	509	63.9	67	100
≤ 2.5	722	90.6	679	85.2	-	-
≤ 3.5	763	95.7	741	93.0	-	-
≥ 9.5	3	0.4	13	1.6	-	-

Como todos os erros absolutos do trabalho atual foram inferiores a 1,5 segue outra tabela com faixas menores de erros absolutos.

Tabela 4.10 - Erro Absoluto para o modelo baseado em redes neurais aqui desenvolvido.

ERRO ABSOLUTO	Nº pontos	% do Total
≤ 0.1	25	37.5
≤ 0.2	38	56.7
≤ 0.3	51	76.1
≤ 0.4	60	89.6
≥ 0.5	4	6.0

4.1.2 Dimensões do Cordão de Solda

Como não existe um único trabalho que encontre a quantidade de ferrita e dimensões do cordão, outros estudos foram selecionados para avaliar os resultados do modelo baseado em redes neurais artificiais aqui desenvolvido.

Na Tabela 4.11, este trabalho foi comparado ao trabalho de Pinto (2011) através do erro médio, cuja fórmula está apresentada na equação 4.2.

$$Erro\ Médio = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{Experimental} - X_{Encontrado}| \quad 4.2$$

Tabela 4.11 - Comparação do trabalho atual com o trabalho de Pinto (2011) para o conjunto de dados para treinamento, conjunto de dados para teste adicional e a soma dos dois conjuntos anteriores.

ERRO MÉDIO	Pinto (2011)			Trabalho Atual		
	Nº Pontos	Largura	Altura	Nº Pontos	Largura	Altura
Conjunto de dados para treinamento	120	0.47	0.14	67	0.29	0.14
Conjunto de dados para teste adicional	5	0.42	0.10	3	0.27	0.17
Conjunto de dados completo	125	0.47	0.14	70	0.29	0.14

O trabalho de Chan et al.(1999) foi comparado com o trabalho atual na Tabela 4.12. Chan et al.(1999) utilizou 96 cordões para treinamento da sua rede. Os cordões foram executados sobre placas de aço carbono, assim como o material do arame. O material do arame e placa não foram variados.

Tabela 4.12 - Comparação entre o trabalho atual com o trabalho de Chan et al. (1999) para o conjunto de dados para treinamento

	Chan et al. (1999)		Trabalho Atual	
	RMS	Erro Médio (%)	RMS	Erro Médio (%)
Largura	0.55	5	0.37	5
Altura	0.23	7	0.18	6
Penetração	0.44	12	0.26	15

Esse trabalho confirmou o que o trabalho do Chan, et al. (1999) já havia mostrado: a predição da penetração do cordão de solda possui piores resultados. Entretanto, não foi possível encontrar o motivo dessa verificação. Nesse mesmo trabalho, foi verificado que a largura possui um erro maior que a altura do cordão, já que a altura está mais suscetível as variações das condições ambientais. Esse fato também foi confirmado nesse trabalho.

5 CONCLUSÕES

A utilização de modelos baseados em redes neurais realmente tem excelentes resultados e como não exige grandes recursos computacionais é uma excelente opção para tornar a soldagem robotizada ainda mais simples.

Nesse trabalho foi possível verificar que o aumento da quantidade de saídas da rede não prejudicou sua eficiência. Pelo contrario, a rede apresentada aqui considerou 04 saídas (FN, largura, penetração e reforço do cordão de solda) e apresentou resultados melhores que as redes que preveem apenas FN.

Levar em consideração a tensão e corrente, que são variáveis utilizadas para encontrar o aporte térmico melhora muito a predição de ferrita. Essa melhora foi tanta, que mesmo considerando os elementos formadores de ferrita e austenita através da fórmula de Schaeffler os resultados foram melhores. Como foi visto nesse trabalho, a fórmula de Schaeffler foi utilizada por ser mais simples, mas a fórmula de Ni e Cr Equivalente do Diagrama WRC-92 é melhor já que seu diagrama apresenta resultados melhores. A utilização do percentual de cada elemento como dado de entrada da rede apresentaria resultados ainda melhores, já que a própria rede definiria a relação entre os elementos e sua influência para a formação da ferrita. Entretanto, a percentagem de cada elemento presente no material do arame não é uma informação facilmente encontrada e por isso foi simplificada pelas fórmulas de Ni e Cr Equivalente de Schaeffler.

A utilização de uma única rede para prever tanto soldas de aço inoxidáveis duplex quanto aços inoxidáveis austeníticos pode ter uma influencia negativa para a predição de ferrita, o que ajudou que o resultado desse trabalho fosse melhor. Vitek, et al. (2000) mostrou que a influência dos elementos químicos para a formação de ferrita pode ser diferente para aços inoxidáveis duplex e austeníticos e esse trabalho utilizou apenas aços inoxidáveis austeníticos.

Esse trabalho também confirmou o que foi dito na revisão bibliográfica: uma camada é suficiente para aproximar qualquer função continua e duas camadas são suficientes para

aproximar qualquer função matemática. Já que a utilização de apenas duas camadas nesse trabalho não prejudicou os resultados.

A implantação de modelos que permitam que o robô seja configurado com os parâmetros de saída desejados do cordão facilitaria a vida do operador que precisaria ter menor experiência, reduziria a perda de material e tempo com teste. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma de como pode ser descrito o processo de soldagem. Primeiramente, são definidos todos os parâmetros de soldagem. Entre eles está a tensão e corrente que depois de definida o robô deve ser calibrado para encontrar qual valor de V_{weld} e A_{weld} corresponde aos valores desejados. Em seguida é feita a programação do robô e a execução da solda. Dificilmente a primeira tentativa resulta em um cordão bom, por maior que seja a pesquisa para definição dos parâmetros iniciais de soldagem. Mais difícil ainda quando existe uma exigência de dimensão e microestrutura do cordão de solda. Portanto, esse processo freqüentemente é repetido por diversas vezes até encontrar um cordão que atenda a necessidade.

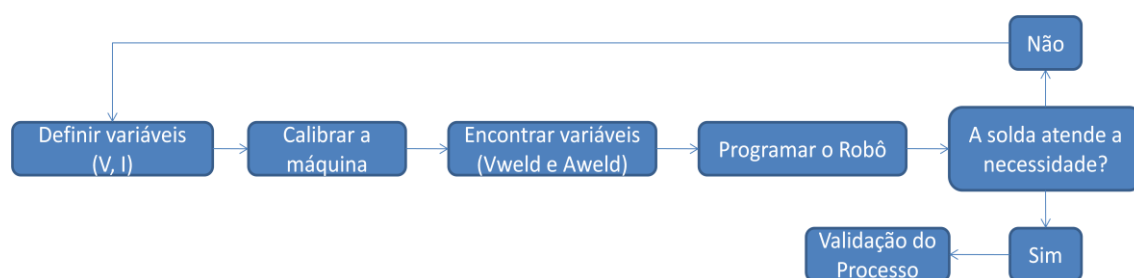


Figura 5.1 - Fluxograma que define o processo de soldagem robotizada convencional.

Utilizando a rede neural artificial criada nesse trabalho, os parâmetros de soldagem serão definidos pela rede. Os parâmetros que foram mantidos constante nesse trabalho também devem ser adotados, enquanto, o V_{weld} , A_{weld} e material do arame serão dados pela rede de acordo com as dimensões e quantidade de ferrita desejada para o cordão de solda. A rede neural artificial pode ser utilizada através de um computador com o programa Matlab onde será aberto a representação por diagramas da rede, ou seja, o Simulink como mostrou as Figuras 4.4 e 4.8 no capítulo anterior. Depois de definido os parâmetros, o robô deve ser programado e o processo pode ser validado, já que o cordão atenderá a sua necessidade. A fluxograma do processo de soldagem com a utilização da rede neural artificial está apresentada na Figura 5.2.



Figura 5.2 - Fluxograma que define o processo de soldagem robotizada com a utilização da rede neural artificial criada nesse trabalho.

Muito ainda precisa ser feito para termos dados suficientes para prever qualquer solda a partir dos parâmetros de saída desejados do cordão de solda. Outros processos de soldagem, outros materiais de chapa e de adição, outras posições de solda, outras velocidades de soldagem, outros gases e diâmetros de arames/eletrodos precisam ser testados. A temperatura inicial da chapa também é um parâmetro que de acordo com a bibliografia pesquisada deve ter uma importante influência na formação da ferrita já que altera a curva de resfriamento do cordão de solda. Uma rede neural artificial que considera além dos parâmetros já considerados a variação da temperatura inicial da chapa deve trazer uma contribuição significativa para a ciência.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho ainda tem muito para ser feito antes de se considerar concluído. O banco de dados realizado aqui foi muito pequeno em relação a imensa quantidade de possibilidades. Portanto, a primeira sugestão para trabalhos futuros é aumentar as possibilidades de predição do programa ampliando o banco de dados para outras variáveis como: velocidade de soldagem, diâmetros de arame, posição de soldagem, espessura de chapa e outros materiais de adição e metais de base de aços inoxidáveis austeníticos.

A temperatura inicial da chapa influencia o ciclo térmico da soldagem, e conseqüentemente, a quantidade de ferrita presente no metal de solda. Portanto, um trabalho que a considere amplia as opções de soldagem, além de permitir o estudo da sua influência na microestrutura do metal de solda.

Hoje, o Laboratório de Robótica Simulação e Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais já desenvolveu um programa que cria a trajetória de soldagem do robô automaticamente. Sugere-se, que nesse mesmo programa também seja incluída a predição da configuração do robô para os parâmetros de saída da solda desejados.

O modelo desenvolvido nesse trabalho pode ser utilizado em um computador com Matlab, através da sua ferramenta Simulink. Para facilitar o acesso em ambiente industrial desse modelo, sugere-se que seja feita uma interface amigável para o modelo e que pode ser utilizada em celulares, tablets ou computadores que não tenham o Matlab.

7 BIBLIOGRAFIA

AWS. 1993. ANSI/AWS A5.9-93. *Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*. Miami : s.n., 1993.

—. **1998.** *Welding Handbook: Metals and their Weldability*. Miami : R. L. O'Brien, 1998. Vol. 4.

—. **1997.** *Welding Handbook: Welding Processes*. Miami : R. L. O'Brien, 1997. Vol.2.

Bermejo, M. A. V. 2012. Predictive and Measure Methods for Delta Ferrite Determination in Stainless Steels. *Welding Journal*. April, 2012, Vols. Vol. 91: 113s-121s.

Bhadeshia, H. K. D. H. 1999. Neural NetWork in Materials Science. *ISIJ International*. 1999, Vol. Vol. 39, N°10, pp.966-979.

Bhadeshia, H. K. D. H., et al. 2009. Performance of Neural Networks in Materials Science. *Materials Science and Technology*. 2009, Vol. Vol. 25, N°4, pp. 504-510.

Bracarense, A. Q., et al. 2002. Soldagem Robotizada. [A. do livro] V. F. Romano. *Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*. Rio de Janeiro, Rj, Brasil : Edgard Blucher Ltda, 2002.

Braga, A., Ludermir, T. e Carvalho, A. C. 2000. *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro : LTC, 2000.

Castro, R. e Cadenet, J. J. 1975. *Welding Metallurgy of Stainless and Heat Resisting Stell*. Londres : Cambridge Univ. Press, 1975. 189p.

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

David, S. A. e Vitek, J. M. 1989. Correlation Between Solidification Parameters and Weld Microstructures. *International Materials Reviews*. 1989, Vol. 34.

David, S. A., Vitek, J. M. e Hebble, T. L. 1987. Effect of Rapid Solidification on Stainless Steel Weld Metal Microstructures and its Implications on the Schaeffler Diagram. *Welding Journals*. 66 (10): 289-s to 300-s, 1987.

Dupont, J. N. e Marder, A. R. 1995. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding Journal*. December, 1995, 406s-416s.

ESAB. 2005. Soldagem MIG/MAG. <http://www.esab.com.br/>. [Online] 25 de Janeiro de 2005. [Citado em: 22 de setembro de 2012.] http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf.

Hauser, D. e Van Echo, J.A. 1982. Effects of ferrita Content in Austenitic Stainless Steel. *Welding Journal*. 1982, Vols. 61(2):37s-44s.

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

Kim, I. S., et al. 2005. An Investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. *Journal of Material Processing Technology*. 2005, Vol. 159, p.113-118.

Kou, S. 2003. *Welding Metallurgy*. Hoboken : John Wiley, 2003. 2ª Ed..

Lefebvre, J. 1993. Guidance on Specifications of Ferrite in Stainless Steel Weld Metal. *Welding in the World*. 1993, Vols. 31(6): 390-406.

Lippold, J. e Kotecki, D. 2005. *Welding Metallurgy and Weldability os Stainless Steels*. New Jersey : Wiley-Interscience, 2005.

Manikya Kanti, K. e Srinivasa Rao, P. 2008. Prediction of Bead Geometry in Pulsed GMA Welding using Back Programation Neural Network. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, Vol. V.200 , p.300 a 305.

Marques, P. V., Modenesi, P. J. e Bracarense, A. Q. 2011. *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte : UFMG, 2011.

McCowan, C. N., Siewert, T. A. e Olson, D. L. 1989. Stainless Steel Weld Metal: Prediction of ferrite content. *WRC Bulletin*. (342), 1989, Vol. 36 pg.

Modenesi, P. e Marques, P. 2006. *Apostila: Soldagem I – Introdução aos Processos de Soldagem*. Belo Horizonte : s.n., 2006.

Modenesi, P. J. 2008. Introdução à Física do Arco Elétrico. *Apostila do Curso Soldagem I*. Belo Horizonte : Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais-UFMG, 2008.

—. **2001.** *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis*. São Paulo : s.n., 2001.

Modenesi, P., Marques, P. e Santos, D. 2011. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte : s.n., 2011.

Peckner, D. e Bernstein, I. M. 1977. *Handbook of Stainless Steel*. s.l. : MC Graw-Hill, 1977.

Pinto, D. P. 2011. Modelagem da Forma Geométrica do Cordões de Solda Utilizando Curvas para Simulação Computacional. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte : Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, 2011.

Thomas, R. G. 1978. The Effect of Delta Ferrite Content on the Creep Rupture Properties of Austenitic Weld Metals. *Welding Journal*. 1978, Vols. 57(3):81s-86s.

Vasudevan, M., et al. 2004. Bayesian Neural Network Analysis of Ferrite Number in Stainless Steel Welds. *Science and Technology of Welding and Joining*. N°2, 2004, Vol. Vol.9, p.109-120.

Vasudevan, M., et al. 2002. Bayesian Neural Network Analysis of the compositional variations on ferrite number in 316LN austenitic stainless Steel Welds. *Trans. Ind. Ins. Met.* 55 (5). pg. 389-396, 2002.

Vasudevan, M., et al. 2003. Delta ferrite prediction in Stainless Steel Welds using Neural Network analysis and comparison with other prediction methods. *Journal of Materials Processing Technology*. 142, 2003, pg 20-28.

Vasudevan, M., Murugananth, M. e Bhaduri, A. K. 2002. Application of Bayesian neural network for modeling and prediction of FN in austenitic Stainless Steel Welds, in: H. Cerjak, H.K.D.H. Bhadeshia. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena-VI, Institute of Material*. pp.1079-1099, 2002.

Vitek, J. M. e David, S. A. 1999. Using Neural Networks to Describe Complex Phase Transformation Behavior. *International Conference on Solid-Solid Phase Transformation*. 1999.

Vitek, J. M., David, S. A. e Hinman, C. R. 2003. Improved Ferrite Number Prediction Model that Accounts for Cooling Rate Effects - Part 1: Model Development. *Welding Research*. January, 2003, Vols. 10s-15s.

—. **2003.** Improved Ferrite Number Prediction Model that Accounts for Cooling Rate Effects - Parte 2: Model Results. *Welding Research*. February, 2003, Vols. 43s-50s.

Vitek, J. M., Iskander, Y. S. e Oblow, E. M. 2000. Improved Ferrite Number Prediction in Stainless Steel Arc Welds Using Artificial Neural Networks - Part 1: Neural Network Development. *Welding Research*. February, 2000, Vols. 33s-40s.

—. **2000.** Improved Ferrite Number Prediction in Stainless Steel Arc Welds Using Artificial Neural Networks - Part 2: Neural NetWork Results. *Welding Research*. February, 2000, Vols. 41s-50s.

—. **1999.** Neural Networks Model for Predicting Ferrite Number in Stainless Steel Welds. *Trends in Welding Research*. ASM International, Materials Park, Ohio, 1999, p. 119-124.

Wainer, E., Brandi, S. D. e Mello, F. D. H. 1992. *Soldagem - Processos e Metalurgia*. São Paulo : Edgard Blucher Ltda., 1992.