

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL E METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO BATISTA MEIRELES

AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE
COBRE COM REVESTIMENTO DE
CROMO EM SOLDA A PONTO POR
RESISTÊNCIA ELETRICA EM
LIGAS DE ZIRCÔNIO

ORIENTADOR: JOSÉ ADILSON DE CASTRO Ph.D

UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE



VOLTA REDONDA
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE COBRE COM
REVESTIMENTO DE CROMO EM SOLDA A PONTO POR
RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM LIGAS DE ZIRCÔNIO**

JOÃO BATISTA MEIRELES

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

JOÃO BATISTA MEIRELES

**AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE COBRE COM REVESTIMENTO DE
CROMO EM SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA ELETRICA EM LIGAS
DE ZIRCÔNIO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

ORIENTADOR: José Adilson de Castro, Ph.D.

Volta Redonda
2019

JOÃO BATISTA MEIRELES

AVALIAÇÃO DE ELETRODOS DE COBRE COM REVESTIMENTO DE CROMO EM SOLDA A PONTO POR RESISTÊNCIA ELETRICA EM LIGAS DE ZIRCÔNIO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Defendido em 04 de janeiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. José Adilson de Castro – Orientador

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Ds.C. Fabiane Roberta Freitas da Silva

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Ds.C. Sandro Rosa Corrêa

Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA

Volta Redonda
2019

RESUMO

Uma das dificuldades da soldagem de estruturas de combustíveis nucleares cujo material é o zircaloy é possuir uma pequena faixa de parâmetros de trabalho. Isso se deve a alta temperatura de fusão do zircaloy que danifica os eletrodos que são fabricados de ligas de cobre. No intuito de expandir a faixa de trabalho, foi testado um revestimento de cromo nas superfícies dos eletrodos, pois o cromo apresenta uma temperatura de fusão maior do que o zircaloy e também daquela apresentada pelo cobre. Foram soldados amostras com eletrodos comumente utilizados, sem nenhum revestimento e eletrodos revestidos de cromo para uma comparação da ampliação da faixa trabalho, garantindo a qualidade adequada para a soldagem. Foram utilizados ensaios metalográficos para avaliar a medida do tamanho da lente, e ensaios de corrosão para verificar a integridade da solda, que são critérios usuais de aceitação. Ocorreu uma ampliação de 42% da faixa de trabalho e também foi possível aumentar a lente de solda em 11,7%. Além disso, foi utilizada simulação computacional para análise da região soldada e possibilitar a disponibilização de uma ferramenta de análise adicional. A simulação computacional foi capaz de prever o tamanho da lente de solda utilizando os parâmetros de controle. Ambas as abordagens indicaram que se obtém ampliação da faixa de trabalho e conseqüentemente o aumento do tamanho da lente de solda, tornando a nova metodologia mais confiável e adequada para a soldagem com segurança.

Palavras- chave: Energia Nuclear, Solda a Ponto, Zircônio.

ABSTRACT

One of the difficulties of welding nuclear fuel structures whose material is zircaloy is to have a small range of working parameters. This is due to the high melting temperature of zircaloy that damages the electrodes that are manufactured from copper alloys. In order to increase the parameter range, a chromium coating was tested on the surfaces of the electrode, once the melting temperature of the chromium is higher than that of zircaloy, as well as of copper. Samples have been welded with common electrodes, without any coating and welding electrodes covered by chromium for a comparison of the working range magnification, ensuring the proper quality for welding. Metallographic tests were used to evaluate nugget size and corrosion tests to verify the integrity of the weld. They are usual criteria for weld acceptance. There was a 42% increase in the working range and it was also possible to increase the nugget by 11.7%. In addition, computational simulation was used to analyze the welded region, allowing the use of an additional analysis tool. The simulation was able to predict the size of the welding nugget using the control parameters. Both approaches indicated that an increase in the range of acceptable welding parameters and consequently increase in the nugget size of the weld were obtained, making the new methodology more reliable and suitable for welding processes with safety.

Key-words: Nuclear Energy, Resistance Spot Welding, Zirconium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte transversal de uma junta de solda a ponto por resistência em ligas de zircônio (Fonte: Laboratório de Materiais – INB).....	7
Figura 2: Ilustração de distribuição de temperatura em uma soldagem a ponto em chapas de aço [8].	9
Figura 3: Típico ciclo de soldagem a ponto [9].	10
Figura 4: Corpo de prova de solda a ponto e os eletrodos [Fonte: o Autor].	11
Figura 5: Indicação das Resistências [Fonte: o Autor].	13
Figura 6: Resistência de Construção[17].....	16
Figura 7: Distribuição de corrente na camada de revestimento: (a) a condutividade do revestimento é menor que a do material base; (b) a condutividade do revestimento é maior do que a do material base. As linhas de corrente se espalham mais facilmente dentro do revestimento do que dentro do material base.....	18
Figura 8: Máquina de solda estacionária[23].....	22
Figura 9: Máquina de solda suspensa[24].....	22
Figura 10: Máquina de solda robô[25].....	23
Figura 11: Circuito elétrico típico máquina de solda a ponto[28].....	24
Figura 12: Temperaturas Instantâneas estimadas de soldagem a ponto de chapas de aço em graus Celsius no instante de finalização da soldagem[32].	25
Figura 13: Tipos mais utilizados de eletrodo na soldagem a ponto[26].....	26
Figura 14: Características de um eletrodo[3].....	27
Figura 15: Desenho esquemático de um eletrodo de soldagem a ponto de componentes de ligas de zircônio, em destaque Face de soldagem (A), Corpo (B) e Conexão (C) [Fonte: o Autor].....	28
Figura 16: Corpo de prova e eletrodos. Em amarelo, representação do ponto de solda [Fonte: o Autor].	29
Figura 17: Refrigeração do Eletrodo de Soldagem[29].	33
Figura 18: Ciclo de solda básico em solda a ponto[12].	34
Figura 19: Curva de soldabilidade[3].....	37
Figura 20: Curva de força aplicada no processo de soldagem[38].....	39

Figura 21: Ilustração do ensaio de destacamento e medição do ponto de solda[53].	49
Figura 22: Ensaio de Tração.	49
Figura 23: Corpo de Prova da Estrutura do Combustível Nuclear.	50
Figura 24: Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova[12].	50
Figura 25: Programação da soldagem e análise.	57
Figura 26: A – Superfície do corpo de prova sem corrosão; B – Superfície do corpo de prova com corrosão.	60
Figura 27: Dimensões do Eletrodo.	61
Figura 28: Eletrodo de sem Revestimento (Avermelhado) e Eletrodo com Revestimento (Prateado).	62
Figura 29: Espessura da Camada de Cromo na Superfície do Eletrodo.	62
Figura 30: Dimensões do Mandril.	63
Figura 31: Mandril sem Revestimento (Avermelhado) e Mandril com Revestimento (Prateado).	63
Figura 32: Máquina de Soldagem a Ponto de Estruturas de Combustíveis Nucleares.	64
Figura 33: A - Corpo de Prova de Solda a Ponto e os Eletrodos. B - Detalhe do Volume de Controle Utilizado na Simulação Computacional.	65
Figura 34: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova SRMI07.	71
Figura 35: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova SRMA72.	72
Figura 36: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova RCM126.	73
Figura 37: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova RCMA36.	74
Figura 38: Gráfico Comparativo de Faixas de Trabalho.	75
Figura 39: Gráfico da Energia x Área da Seção transversal da Lente de Solda.	77
Figura 40: Faixa de Trabalho x Área da Seção transversal da Lente de Solda.	78
Figura 41: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMI07, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMI07.	80

Figura 42: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMA72, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMA72.....	80
Figura 43: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do RCM126, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do RCM126.....	80
Figura 44: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do RCMA36, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do RCMA36.	81
Figura 45: Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas macrografias em eletrodos e mandris sem revestimento.	82
Figura 46: Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas macrografias em eletrodos e mandris com revestimento de cromo duro.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela RWMA[32]..	32
Tabela 2: Propriedades importantes em materiais para aplicações nucleares[44].	45
Tabela 3: Composições químicas utilizadas comercialmente para ligas de zircônio [46] [47] [48].	46
Tabela 4: Propriedades dos materiais.	56
Tabela 5: Parâmetros de Soldagem.	57
Tabela 6: Parâmetro de Força de Compressão.	58
Tabela 7: Propriedades do material do eletrodo e mandril.	61
Tabela 8: Parâmetros utilizados e resultados da área da lente de solda na macrografia, para corpos de provas soldados com eletrodos sem revestimento.	71
Tabela 9: Parâmetros utilizados e resultados de Corrosão, para corpos de provas soldados com eletrodos sem revestimento.	71
Tabela 10: Faixa de Trabalho para soldagem com eletrodos de soldagem sem revestimento.	72
Tabela 11: Parâmetros utilizados e resultados da área da lente de solda na macrografia, para corpos de provas soldados com eletrodos com revestimento de cromo.	73
Tabela 12: Parâmetros utilizados e resultados de Corrosão, para corpos de provas soldados com eletrodos com revestimento de cromo.	73
Tabela 13: Faixa de Trabalho para soldagem com eletrodos de soldagem com revestimento de cromo.	74
Tabela 14: Resultados das temperaturas de superfícies do eletrodo e mandril sem revestimento, obtidos por simulação computacional.	84
Tabela 15: Resultados das temperaturas de superfícies do eletrodo e mandril com revestimento de cromo, obtidos por simulação computacional.	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

A	Ampère
AC	Alternating Current
ASTM	American Society for Testing and Materials
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Nuclear Reactor of a Canadian Design
CC	Condições de Contorno
CI	Condições Iniciais
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
Cr	Cromo
CuCoBe	Cobre – Cobalto – Berílio
DC	Direct Current
DIN	Deutsches Institut für Normung
Fe	Ferro
h	Horas
HRB	Dureza Rockwell
HSLA	High Strength Low Alloy
Hz	Hertz
IACS	International Annealed Copper Standard
IF	Interstitial free
J	Joule
MF	Medium Frequency
N	Newton
Ni	Níquel
Nb	Nióbio

O	Oxigênio
Pa	Pascal
PWR	Pressurized Water Reactor
Sb	Estanho
s	Segundos
RWMA	Resistance Welding Manufacturing Alliance
RCMA	Revestimento de Cromo, Corrente Máxima
RCMI	Revestimento de Cromo, Corrente Mínima
SRMA	Sem Revestimento, Corrente Máxima
SRMI	Sem Revestimento, Corrente Mínima
V	Volts
ZTA	Zona Termicamente Afetada
°C	Graus Celsius
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Objetivos	4
2.1	Objetivos Gerais.....	4
2.2	Objetivos Específicos.....	4
3	Revisão Bibliográfica.....	6
3.1	A Soldagem a ponto por resistência elétrica.....	6
3.1.1	Vantagens	8
3.1.2	Desvantagens.....	8
3.2	Fundamentos do processo.....	9
3.2.1	Soldagem a ponto em tubos	10
3.2.2	Geração de calor	11
3.2.3	Resistência elétrica	13
3.2.4	Resistências de contato.....	15
3.3	Equipamento e Dispositivos	20
3.3.1	Máquinas de soldagem a ponto por resistência	21
3.3.2	Eletrodos	24
3.3.3	Mandril	29
3.3.4	Materiais do eletrodo e mandril	30
3.3.5	Sistema de refrigeração.....	33
3.4	Parâmetros de soldagem a ponto e seus efeitos	33
3.4.1	Corrente de soldagem.....	35
3.4.2	Força do eletrodo.....	37
3.4.3	Tempo de compressão	40
3.4.4	Tempo de soldagem.....	41
3.4.5	Tempo de retenção	42
3.4.6	Tempo de pausa	43
3.5	Ligas de zircônio para aplicação nuclear	43
3.6	Ensaio e métodos de controle e qualidade de Solda.....	46
3.6.1	Inspeção visual.....	47
3.6.2	Ensaio por arrancamento	48

3.6.3	Ensaio de tração	49
3.6.4	Ensaio Metalográficos.....	51
3.6.5	Ensaio de corrosão.....	51
3.7	Trabalhos Recentes no Tema	53
4	Materiais e Métodos	55
4.1	Corpo de prova	56
4.2	Planejamento Experimental	56
4.2.1	Parâmetros de soldagem	57
4.3	Testes da integridade de solda	58
4.3.1	Metalografia	59
4.3.2	Testes de corrosão.....	59
4.4	Equipamentos e dispositivos utilizados.....	60
4.4.1	Eletrodos utilizados	60
4.4.2	Mandril utilizado	62
4.4.3	Máquina de solda utilizada.....	63
4.5	Simulação Computacional.....	64
4.5.1	Condução térmica.....	65
4.5.2	Ciclo térmico	67
4.5.3	Condições iniciais e de contornos.....	68
5	Resultados	70
5.1	Resultados Experimentais.....	70
5.1.1	Faixa de trabalho para eletrodos sem revestimento.....	70
5.1.2	Faixa de trabalho para eletrodos com revestimento de cromo.....	72
5.1.3	Comparação entre faixas de trabalho.	74
5.2	Resultados da simulação computacional	78
5.2.1	Distribuição térmica e região fundida	78
5.2.2	Simulado x experimental	81
5.2.3	Temperatura Na Região De Contato.....	83
6	Conclusões	87
7	Trabalhos Futuros	89
8	Referências Bibliográficas.....	90

ANEXO 1 – Tabela de dados dos CPs.....	96
--	----

1 INTRODUÇÃO

A soldagem por resistência é um processo de união de chapas metálicas. É utilizada em indústrias automotivas, de aplicação, aeroespacial e nuclear. A soldagem por resistência foi inventada por Elihu Thomson em 1877, que aplicou esse processo de soldagem para unir fios de cobre. Logo percebeu que esta técnica poderia ser usada para a soldagem de outros materiais[1].

Soldagem por resistência é um dos processos para união entre componentes metálicos que formam a estrutura de um combustível nuclear. Essa estrutura é formada por tubos de zircaloy e de reticulados de chapas finas chamados de grades espaçadoras. Os tubos e as grades espaçadoras são unidos por meio do processo conhecido como soldagem a ponto, formando uma estrutura rígida que serve como “esqueleto” do combustível nuclear. Uma estrutura possui em torno de 1300 pontos soldados.

Soldagem a ponto é uma subclassificação da soldagem por resistência elétrica. É um processo de soldagem no qual a união dos metais é realizada na região sobreposta onde o calor é gerado. O calor gerado é resultante da resistência do material à passagem de corrente elétrica em um intervalo de tempo determinado. A união ocorre pela fusão e solidificação do material no ponto de solda. Uma força é sempre aplicada pelos eletrodos, antes, durante e após a aplicação da corrente para restringir a área de contato da solda nas superfícies sobrepostas. As superfícies em contato, na região de concentração de corrente são aquecidas por um curto pulso de baixa tensão e alta corrente, para formar

uma região fundida de metal de solda, que recebe o nome de ponto de solda[2].

Os eletrodos desempenham um papel fundamental na geração de calor durante o processo de soldagem a resistência. No processo de soldagem do esqueleto, os eletrodos têm forma de pontas arredondadas e desempenham a função de conduzir a corrente até o material, aplicar a força necessária e dissipar o calor gerado durante o processo de soldagem.

Durante o processo de soldagem por resistência da estrutura do combustível nuclear, o valor da corrente de soldagem varia entre 2 a 6kA, e a força varia de 300 a 700 N, dependendo da geometria soldada. A temperatura na superfície de contato do eletrodo/chapa chega próximo à temperatura de fusão do zircaloy.

Na fabricação de esqueleto existem requisitos rigorosos na questão de qualidade da solda. Um desses requisitos é a ausência de corrosão. No caso das ligas de zircônio um dos motivos para a corrosão é a inclusão metálica de outros materiais na região de soldagem, como por exemplo, o cobre, causando o efeito de pilha e causando corrosão.

O eletrodo utilizado na soldagem a ponto no esqueleto possui material e geometria especificados de modo a fornecer a melhor combinação de propriedades elétricas e mecânicas para evitar interações químicas na superfície da solda na operação de soldagem, de modo a evitar a corrosão na utilização posterior.

Durante a operação de soldagem, os eletrodos estão sujeitos a grandes tensões compressivas em elevadas temperaturas, fazendo com que sua face se deforme progressivamente, necessitando de substituição após uma quantidade de pontos determinada por esse desgaste, para que todos os pontos de solda obtidos sejam satisfatórios.

A busca por aumento de produtividade e qualidade é sempre esperada na indústria. É o que se espera também no setor nuclear. A inovação proposta é uma utilização de métodos já conhecidos em um novo setor: cromagem de

eletrodos de cobre. A temperatura de fusão da liga de zircônio é em torno de 1860°C. Ao realizar a soldagem e atingir a temperatura de fusão do cobre (1085°C), pode causar o depósito indesejado de cobre na região soldada. Para proteger o cobre contra essa temperatura excessiva, foi adicionada uma camada de cromo duro (temperatura de fusão de 1907°C) que não se fundiu com o zircaloy na superfície e não trouxe impactos significativos à passagem de corrente. Essa inovação nos eletrodos permitiu aumentar a faixa de parâmetros de trabalho.

Foram feitos ensaios metalográficos e de corrosão para verificar se é possível utilizar o eletrodo de soldagem com revestimento de cromo. Os resultados desses ensaios mostraram que era possível uma ampliação na faixa de parâmetros de trabalho.

Como um mecanismo de facilitar o desenvolvimento parâmetro, foi desenvolvida uma simulação computacional que foi capaz de prever o tamanho da lente de solda, além de apresentar a distribuição térmica da região soldada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

- Avaliar o comportamento da deposição de uma camada de cromo duro na superfície dos eletrodos utilizados na soldagem por resistência de estruturas de combustíveis nucleares feitos de ligas de zircônio, comparando ao comportamento de eletrodos comumente utilizados.
- Gerar uma simulação computacional que seja um mecanismo de predição de para o tamanho da lente de solda e fornecer dados para auxiliar a formação da faixa de parâmetros de trabalho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender de maneira mais aprofundada o processo de soldagem a ponto em ligas de zircônio;
- Verificar se a influência de uma deposição de camada de cromo nos eletrodos e se pode influenciar na qualidade da junta soldada.
- Realizar ensaios macrográficos e de corrosão e comparar as juntas soldadas feitas com eletrodos sem revestimento de cromo com aqueles com revestimento.
- Comparar a curva de soldabilidade entre os dois tipos de eletrodos.

- Estabelecer um modelo matemático (para a simulação computacional) em que reflita o comportamento o mais próximo possível da realidade da junta soldada em seus principais parâmetros (geração do calor; distribuição térmica; temperatura; perdas).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

No processo de Soldagem a ponto por resistência (Resistance Spot Welding), as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças: mecânica, pneumática, hidráulica ou uma mistura delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do material base. A resistência deste material base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando-se uma região fundida que recebe o nome de lente de solda[3].

Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde passa a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentes de solda geradas são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo[3].

A resistência elétrica na interface entre as peças se situa geralmente no intervalo de 50 a 500 $\mu\Omega$, o que também depende da condutividade térmica do metal envolvido. As tensões empregadas variam de 1 a 20 V –muito raramente

alcançam 30 V – com o tempo de aplicação da corrente variando entre menos de 0,01 s para folhas (chapas muito finas) até vários segundos para peças mais espessas[4].

Segundo a definição da norma DIN 1910 [5] parte 2, a soldagem por resistência elétrica é uma classificação do processo de soldagem, e na parte 5 essa mesma norma classifica o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica como uma subdivisão do processo de soldagem por resistência.

Diferentes materiais podem ser soldados por este processo: Aços baixa liga e baixo carbono, revestidos, inoxidáveis, alumínio e suas ligas entre outros. Zircônio, Titânio, Cobre e suas ligas, Magnésio e alguns metais refratários também podem ser soldados. Existe uma diversidade de formas de realizar pontos de solda: solda a ponto simples, solda múltipla, solda em série, solda em paralelo e soldas indiretas. Um corte transversal de uma macrografia de uma solda a ponto em ligas de zircônio é mostrada na Figura 1.

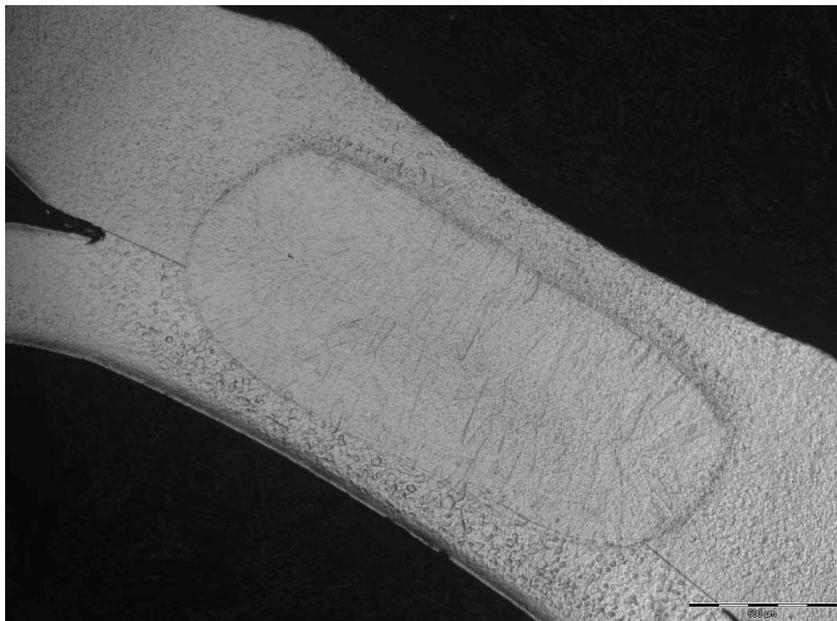


Figura 1: Corte transversal de uma junta de solda a ponto por resistência em ligas de zircônio (Fonte: Laboratório de Materiais – INB).

A soldagem por resistência elétrica é um dos processos mais utilizados na união de chapas de espessuras variadas e diferentes tipos de materiais, este processo é aplicado principalmente na indústria automotiva na soldagem de carrocerias de automóveis e na chamada linha branca na fabricação de eletrodomésticos[7].

Esta soldagem também tem aplicação na soldagem de estruturas de Elementos Combustíveis Nucleares, onde é soldado uma chapa em um tubo, ambos de ligas de zircônio. Cada estrutura de um Elemento Combustível Nuclear possui em torno de 1300 pontos de solda. A soldagem da estrutura do Elemento Combustível é mais complexa do que as aplicações mais comuns. O material utilizado, o zircaloy 4, tem alto ponto de fusão o que diminui a soldabilidade e a vida útil do eletrodo. Como é utilizado um tubo e chapas, a cada ação de solda, são feitos dois pontos de solda, um em cada lado do tubo.

3.1.1 Vantagens

Como as principais vantagens da soldagem a ponto por resistência se podem citar[10]:

- Maior resistência a vibrações mecânicas.
- Não há necessidade de acabamento final na união soldada, pois, este processo não produz escória, nem respingo, isso quando a soldagem por resistência é executada corretamente.
- Alta velocidade, alta adaptabilidade para automatização em produção.
- Menor habilidade para ser executada.
- Baixo custo de operação desse processo, sendo que cada ponto de solda custa cerca de centavos.

3.1.2 Desvantagens

O processo também apresenta algumas limitações tais como[10]:

- Só se podem soldar entre si metais de naturezas diferentes quando suscetíveis a formar uma liga (aço inox, ligas de níquel-cromo e ligas de zircônio). Apesar de a aplicação nuclear usar os diversos materiais, eles não soldam entre si.
- Os custos de equipamento são geralmente mais altos do que os custos da maioria dos equipamentos de soldagem a arco;
- Soldas a ponto têm baixos limites de resistência à tração e à fadiga por causa do entalhe entre as chapas.

3.2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO

Em um processo normal de soldagem a ponto, o aquecimento devido à resistência é desenvolvido em três interfaces: entre eletrodo e chapa, entre chapa e chapa, e por fim entre chapa e eletrodo, como pode ser observado na Figura 2, onde também é possível ver a distribuição de temperatura na soldagem a ponto.

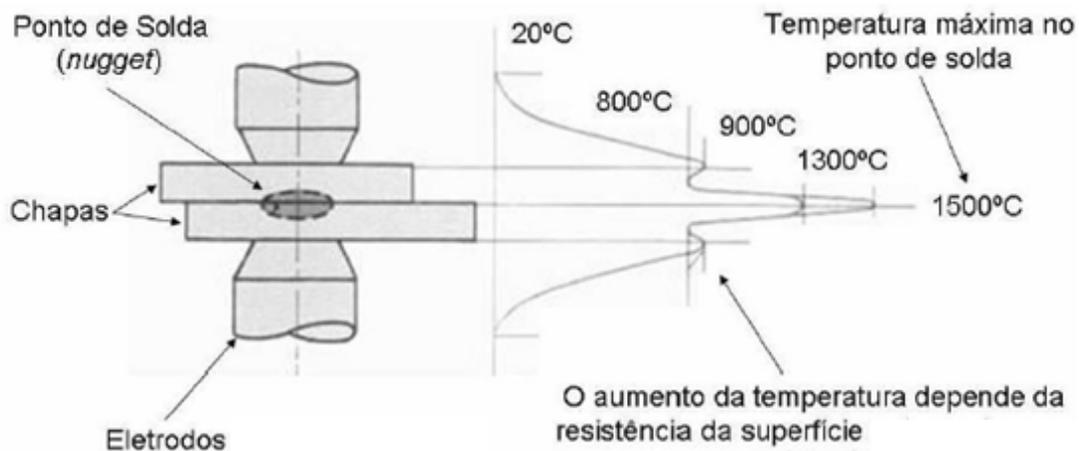


Figura 2: Ilustração de distribuição de temperatura em uma soldagem a ponto em chapas de aço [8].

O ponto de solda (lente ou nugget) é produzido na área de contato entre chapas durante o tempo de soldagem, enquanto a corrente de soldagem passa de um eletrodo ao outro através das chapas, e em virtude da resistência apresentada, o calor necessário para a fusão dos materiais será gerado. Após a conclusão do ciclo de soldagem, uma lente de solda deverá ter sido formada. A indentação é uma marca deixada pelos eletrodos na chapa durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível.

Um ciclo de soldagem representa a combinação entre a corrente de soldagem, a força nos eletrodos e o tempo de aplicação, essa combinação é responsável pelo resultado final da qualidade da solda. A Figura 3 ilustra um típico ciclo de soldagem.

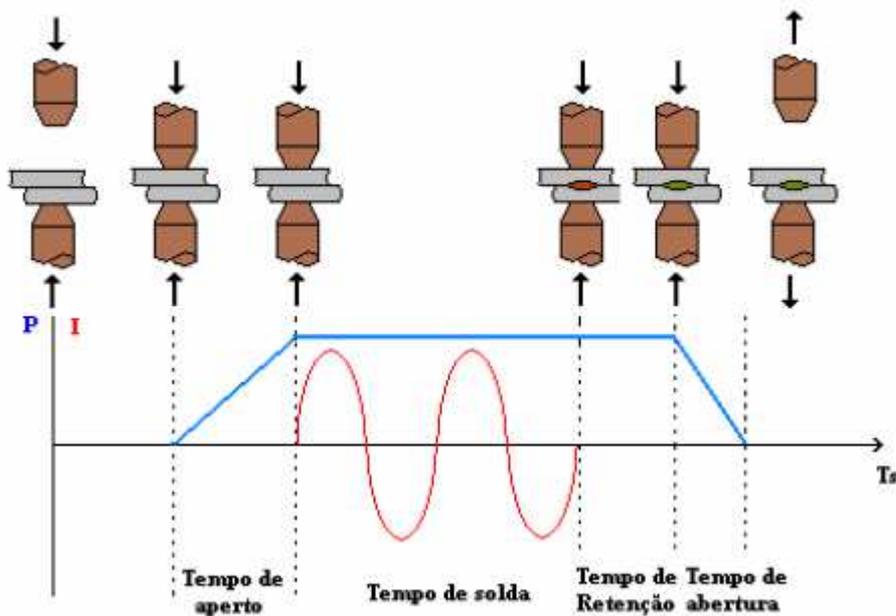


Figura 3: Típico ciclo de soldagem a ponto [9].

Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na Figura 3. Neste caso a frequência da rede é de 60 Hz e 1 pulso ou ciclo terá a duração de: $1/60 = 0,0167s$. A indústria automotiva, a principal usuária deste processo, utiliza na construção dos automóveis entre 3000 e 4000 pontos de solda[10].

Um ponto de solda deverá ter sido gerado ao final de um ciclo completo de soldagem. A alteração da resistência elétrica pode afetar a formação do ponto de solda que não assume o formato esférico característico da extremidade do eletrodo caso não tenha sido transferido calor suficiente dentro do processo[11].

Quando o calor transferido durante o processo é insuficiente para fundir completamente toda a área de solda, pontos podem ser gerados com algum tipo de defeito não totalmente aparente e à medida que o eletrodo se degrada, a densidade de corrente diminui, produzindo pontos irregulares[11].

3.2.1 Soldagem a ponto em tubos

A soldagem a ponto que é comumente conhecida na indústria é a união de duas chapas, conforme Figura 2. Para formar a estrutura de um elemento combustível nuclear, são soldados a ponto tubos em um retículo de chapas que

é chamado de grades espaçadoras, ou melhor, são soldados duas chapas em um tubo conforme ilustrado na Figura 4.

Essa configuração consiste na sequência eletrodo / chapa / tubo / mandril / tubo / chapa / eletrodo, e ocorrerá um ponto de solda em cada região de contato chapa/tubo. Essa configuração está ilustrada na Figura 4. A configuração introduz um tipo de eletrodo que é o mandril. Esse eletrodo será detalhado no tópico 3.3.3.

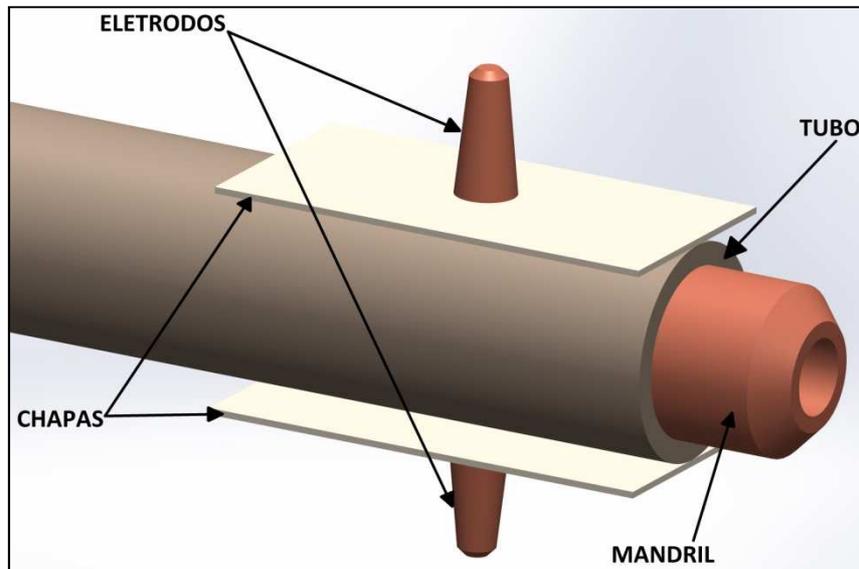


Figura 4: Corpo de prova de solda a ponto e os eletrodos [Fonte: o Autor].

3.2.2 Geração de calor

A geração de calor se deve basicamente à resistência do conjunto à passagem de corrente elétrica de um eletrodo a outro, esse calor é retido na região do ponto onde alcança altas temperaturas, responsáveis pela fusão das chapas e a geração do ponto de solda. Uma parte desse calor é perdida no ambiente, outra parte se perde através da convecção, condução e radiação[9].

O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto, incluindo a peça de trabalho sendo soldada, é uma série de resistências (Figura 5) e o valor delas afeta o fluxo de corrente. A corrente deve ser a mesma em qualquer ponto do circuito de tal forma que o calor gerado em qualquer ponto é diretamente proporcional à resistência nesse ponto[3].

Em um condutor elétrico, a quantidade de calor gerado depende de três fatores:

1. Corrente elétrica;
2. Resistência do condutor (incluindo resistência da interface);
3. Duração da corrente.

Esses fatores acabam afetando diretamente o calor ou energia gerada pelo sistema, essa energia pode ser obtida através da Equação 1:

$$E = \int I^2 R dt \quad (1)$$

Onde:

E : Energia gerada [J];

I : Corrente [A];

R : Resistência do material [Ω];

t : Tempo de duração da corrente [s].

Na soldagem por resistência então, o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizada para gerar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. Da Equação 1 é possível observar que a corrente de soldagem exigida para produzir uma dada solda é, aproximadamente, inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo. Assim, se o tempo for extremamente curto, a corrente exigida será muito alta[12].

O calor é gerado em todos os pontos de resistência, onde a intensidade do calor gerado é dependente da resistência à passagem da corrente de soldagem. Um fator importante é a concentração de calor na interface do metal base, pois esse efeito irá minimizar o calor gerado nas outras regiões. Como a maior resistência estará localizada na interface entre a chapa e o tubo, o calor será desenvolvido mais rapidamente neste local. Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar a lente de solda[9].

Considerando-se a distribuição da temperatura nos pontos durante a soldagem, o tempo transcorrido e as perdas geradas, é possível afirmar que para que a solda ocorra, a região de contato entre as chapas deve ser a primeira a atingir a temperatura de fusão dos metais base, em termos de rendimento, as soldas realizadas em tempos menores representam um melhor rendimento térmico no processo[9].

3.2.3 Resistência elétrica

A resistência elétrica é definida como a oposição a passagem da corrente elétrica através de um meio condutor, a sua intensidade é medida em Ohms (Ω). O calor gerado pelo efeito Joule e responsável pela união das chapas metálicas durante o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, depende diretamente da corrente elétrica (A), da resistência elétrica e do tempo de soldagem medido em segundos (s).

A resistência elétrica no circuito da corrente é o principal fator que controla a soldagem, pois a resistência elétrica define os valores e a necessidade de demanda para outros parâmetros envolvidos no processo.

As resistências elétricas envolvidas em todo o circuito são importantes devido às elevadas correntes de soldagem necessárias para que ocorra a fusão. Cada parte de material e cada contato gera uma resistência. As resistências envolvidas neste processo são mais bem entendidas quando se analisa a Figura 5.

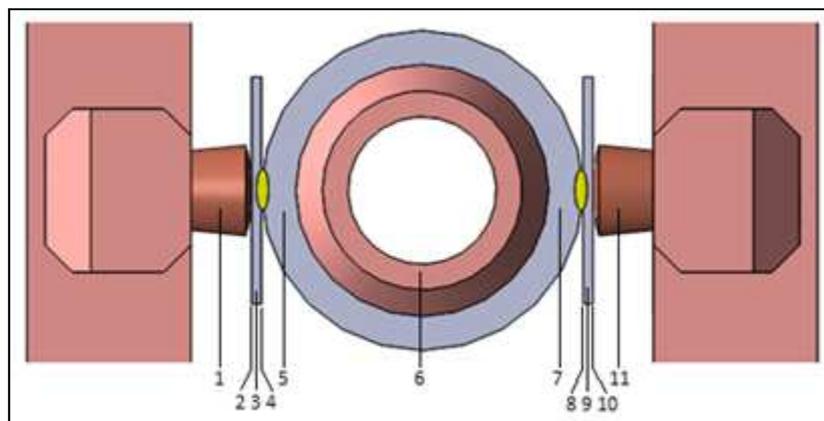


Figura 5: Indicação das Resistências [Fonte: o Autor].

A soma de todas as resistências do circuito por onde passa a corrente, gera a resistência total do circuito que é expressa através da Equação 2.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} \quad (2)$$

Onde:

- R_1 e R_{11} : resistência elétrica do material do eletrodo;
- R_2 e R_{10} : resistência de contato entre o eletrodo e a grade espaçadora. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície da grade espaçadora e do eletrodo, do tamanho e do perfil da face do eletrodo e da força de eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, é esperado que a superfície da grade espaçadora não atingisse sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (R_1 e R_{11});
- R_3 e R_9 : resistência total da própria grade espaçadora, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- R_4 e R_8 : resistência entre a grade espaçadora e o tubo guia, interface no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de mais alta resistência e, portanto, o ponto de maior geração de calor.
- R_5 e R_7 : resistência total do próprio tubo guia que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;
- R_6 : resistência elétrica do material do mandril, que é um anteparo utilizado para suportar a força exercida na soldagem e conduzir a corrente elétrica para o outro lado do tubo.

As resistências de interface entre as chapas soldadas R_4 e R_8 estão ligadas diretamente as condições da superfície das chapas, a força e ao contato do eletrodo. Estas resistências são as que desempenham o papel mais importante no sistema, pois é nestas regiões que o ponto é formado, assim como a geração de calor necessária para a fusão do material. De modo geral, as resistências de contato são mais importantes na geração de calor durante o processo de soldagem por resistência do que as resistências das peças a serem soldadas[5].

O valor da resistência elétrica na interface entre as chapas metálicas se situa geralmente no intervalo entre 50 a 500 $\mu\Omega$, sendo necessárias correntes com intensidade entre 5000 e 1000.000 A para que ocorra a fusão do material, o que depende da condutividade térmica do metal envolvido na soldagem[4].

As resistências entre o eletrodo superior com a chapa superior e eletrodo inferior com a chapa inferior, são consideradas para o caso de materiais de baixa resistividade elétrica, onde devem ser mantidas em valores baixos para evitar excesso na geração de calor e aumentar a vida útil dos eletrodos.

A resistência é uma combinação das propriedades dos materiais e da força aplicada na região de soldagem. A resistência elétrica devido ao material é descrito na segunda lei de Ohm (Equação 3).

$$R_M = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

Onde:

ρ : resistividade do material;

L: distância que a corrente percorre;

A: área de secção transversal.

3.2.4 Resistências de contato

Como mencionado anteriormente, as superfícies das chapas são sempre ásperas. O tamanho das asperezas pode variar desde o comprimento da amostra até a escala atômica. Por convenção, as irregularidades da superfície são classificadas em erros de forma, ondulação e rugosidade. Esses níveis de rugosidade estão associados à área de contato. O estudo dessas áreas segue a tendência geral da mecânica desde os modelos macroscópicos até as tentativas atuais de entender os processos em escala micro/nano no contato dos sólidos. A topografia da superfície afeta todas as características de contato, mas principalmente as mecânicas. Outro fator importante que afeta o comportamento de contato é a presença de vários filmes (como óxidos, contaminantes e revestimentos)[13].

A resistência de contato na interface das chapas a serem soldadas é a fonte fundamental de aquecimento pelo efeito Joule para metais de alta condutibilidade elétrica. É dependente da resistividade intrínseca da camada de revestimento e da dureza, do contorno e da limpeza da superfície[14].

É possível definir e criar um local de grande resistência quando direcionar a passagem da corrente entre as partes a serem soldadas para uma restrição, este procedimento é definido como constrição de corrente[15]. A corrente passa por pontos de contato que são menores que área de contato imaginada (Figura 6). Uma vez que as linhas de corrente elétrica são constrições para permitir que elas passem através dos pontos de contato, a resistência elétrica aumenta. Este aumento é definido como a resistência à constrição. Filmes contaminantes nas superfícies de acoplamento aumentam a resistência dos pontos. A resistência total devido à constrição e filmes contaminantes é denominada resistência de contato[16].

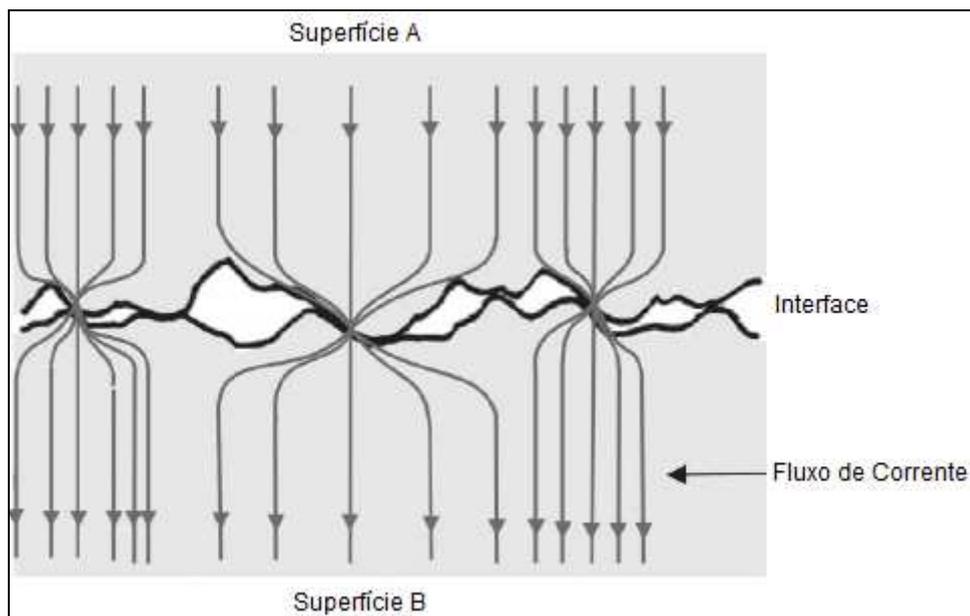


Figura 6: Resistência de Constrição[17].

Na dissertação de Holm[17], ele considerou a maioria dos fenômenos de contato importantes. Timsit[18] atualizou esse tópico no contexto da abordagem geral de Holm, descrevendo os fatores de origem elétrica ou térmica que afetam a resistência de contato.

No caso de um filme condutor em uma das superfícies em contato, seu efeito na resistência à constrição de um ponto pode ser positivo ou negativo, dependendo da relação de resistências do filme e do substrato. A presença do filme também pode alterar a dureza e afetar a resistência de contato, alterando o modo de deformação. Se o filme for formado como resultado da difusão, compostos intermetálicos de alta resistividade podem ser formados, aumentando a resistência de contato. No caso de um filme isolante formado na superfície de contato, a condução de corrente ocorre somente quando o filme é quebrado, pelo menos parcialmente, e onde os contatos metal-metal forem feitos[19].

Revestimentos produzidos por galvanoplastia que forem eletricamente condutivos reduzem a resistência de contato causada por, entre outros fatores, diminuição da dureza, maior condutividade do revestimento comparado ao substrato, prevenção da formação de película isolante, corrosão e redução do desgaste mecânico. No caso estudado nesse trabalho, o revestimento de cromo no eletrodo de soldagem, que é fabricado em cobre, trás vantagens principalmente nas três últimas características citadas: a camada vai prevenir a formação de óxido de cobre na superfície do eletrodo, lembrando que o óxido de cobre é um material isolante, reduz o desgaste do eletrodo e diminui a rugosidade na superfície do mesmo, melhorando assim a resistência de contato na interface eletrodo / chapa.

No caso de galvanização condutiva, a resistência elétrica depende da relação entre a espessura do revestimento e o diâmetro do eletrodo, bem como a proporção entre a condutividade do revestimento e do material base. Se a resistividade do revestimento for menor que a do material base, a corrente elétrica se espalhará mais facilmente no metal base do que no revestimento Figura 7a. A queda potencial na vizinhança do ponto no material base é insignificante em comparação com a possível queda ao longo do revestimento.

Portanto, a interface revestimento / material base é quase equipotencial e a densidade de corrente no filme é uniforme (Figura 7a).

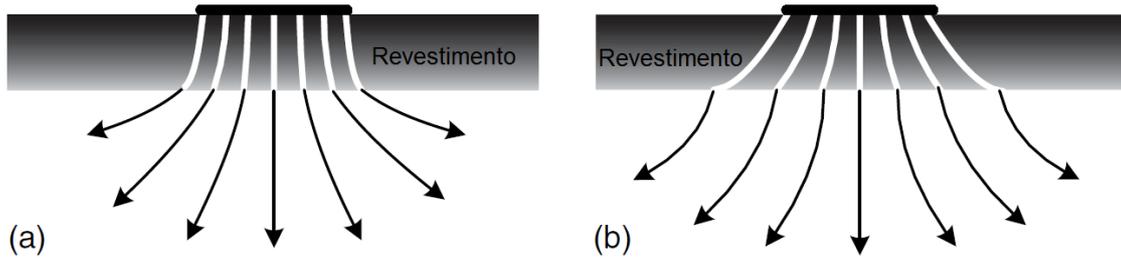


Figura 7: Distribuição de corrente na camada de revestimento: (a) a condutividade do revestimento é menor que a do material base; (b) a condutividade do revestimento é maior do que a do material base. As linhas de corrente se espalham mais facilmente dentro do revestimento do que dentro do material base.

Se a condutividade do material de revestimento for maior que a do material base, as linhas de corrente se espalham no revestimento mais facilmente do que no material base (Figura 7b), e a resistência de espalhamento diminui com o aumento da espessura do revestimento.

Se as resistividades de dois materiais em contato (por exemplo, eletrodo e chapa) são, respectivamente, ρ_1 e a resistividade do material 1 e ρ_2 e a resistividade do material 2, então a resistência de contato devida a constrição, considerando o desenvolvimento Braunovic[13], a resistência total de contato, considerando a resistência a constrição e a resistência à camada de revestimento é descrita pela Equação 4.

$$R_T = [(\rho_1 + \rho_2)/2][(\pi\eta H_{min(1,2)}/4F)^{1/2} + \rho_c d_c H_c / F] \quad (4)$$

Onde:

ρ_1 : resistividade do material de contato 1 [Ωm];

ρ_2 : resistividade do material de contato 2 [Ωm];

F : Força compressiva [N];

η : Percentual em contato;

$H_{min(1,2)}$: Dureza do material mais macio da interface [MPa];

ρ_c : resistividade da camada de revestimento [Ωm];

H_c : Dureza do material do revestimento [MPa].

A Equação 4 é amplamente usada para interpretar dados de resistência de contato para superfícies revestidas. As propriedades de contato elétrico dos

revestimentos de metal para conectores são geralmente medidas sondando a superfície revestida.

Separando os termos da Equação 4 em resistência de constricção, R_C , e resistência a camada de revestimento, R_R , tem-se:

$$R_R = \rho_c d_c H_c / F \quad (5)$$

$$R_C = [(\rho_1 + \rho_2) / 2] (\pi \eta H_{\min(1,2)} / 4F)^{1/2} \quad (6)$$

Desenvolvendo a Equação 6, tem-se:

$$R_C = 0,89 \rho_m (\eta H_{\min(1,2)} / F)^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

ρ_m : resistividade média dos materiais de contato [Ωm];

A Equação 5 e a Equação 7 são semelhantes às utilizadas no trabalho de Tan[20] quando ele estuda a soldagem a ponto em ligas de Níquel. A única diferença é que Tan utiliza parâmetros para o percentual de contato. A Equação 7 também é semelhante ao que utilizado por Brandi[5] quando ele descreve a resistência de contato, porém ele utiliza o limite de escoamento para uma predição da dureza do material. Baldim[6] também utiliza uma equação parecida com a Equação 7 para predição de calor, o que difere é a metodologia aplicada ao percentual em contato.

Existe uma relação entre a resistência de contato, corrente mínima de soldagem e vida útil do eletrodo. Se a resistência de contato for baixa, uma corrente elevada será necessária para realizar a soldagem e, conseqüentemente, a vida útil do eletrodo será menor. Aumentando a dureza e a rugosidade da superfície resulta em um aumento da resistência de contato e, conseqüentemente, da quantidade de calor desenvolvido para o mesmo fluxo de corrente, exigindo, desta forma, menores correntes de soldagem.

3.3 EQUIPAMENTO E DISPOSITIVOS

A seleção do equipamento de soldagem por resistência é usualmente determinada pelo projeto da junta, os materiais de construção, requerimentos de qualidade, normas de produção e considerações econômicas. Para a realização de um ponto de solda é necessário inicialmente, um equipamento adequado, responsável por realizar o ponto de solda a que se pretende obter neste processo, o equipamento também denominado como máquina de solda.

Até o fim dos anos 80, a corrente em soldagem a ponto por resistência era gerada por um transformador na mesma frequência da rede elétrica (50/60Hz). Esta frequência é considerada baixa e é designada por LF, do inglês “Low Frequency”. As fontes que utilizam a frequência da rede e produzem uma corrente alternada recebe a designação de LF/AC. Porém, esse tipo de transformador não atendia a maiores demandas de potência quando requeridas. Com isso, transformadores trifásicos com pontes retificadoras gerando uma corrente constante foram desenvolvidos para conseguir suprir a maior demanda. Entretanto, devido à alta indução dos transformadores trifásicos, a regulação da corrente era dificultada não apresentando resultados apropriados, além disso, estes transformadores eram grandes e pesados[21].

Com a introdução de novos materiais na indústria automobilística (aço de alta resistência mecânica, alumínio, etc.), uma maior energia de soldagem passou a ser necessária, com modelagem e controle mais exato dos parâmetros de solda. O uso de robôs na soldagem exigiu a construção de pinças de solda com transformadores integrados, a fim de superar os problemas de perda de energia pelos cabos secundários. Passou a ser necessário tornar o conjunto pinça-transformador o mais compacto e leve possível[22].

Como os transformadores trifásicos apresentavam os problemas citados, não conseguiam atender os avanços tecnológicos. Surgiu assim a ideia de operar o transformador a uma frequência mais alta do que os 60 Hz da rede, para reduzir seu peso e dimensões e alcançar um melhor controle do processo. Essa frequência foi sendo aumentada e descobriu-se que com 1 kHz tem uma otimização da relação rendimento e perda de potência[21]. Com isso, os transformadores puderam ser fabricados com menor quantidade de ferro-silício

necessário no núcleo do transformador, além de melhorar o controle do processo de soldagem. Esses transformadores são conhecidos como MF/DC (do inglês Medium Frequency combinado com Direct Current).

Além da evolução das máquinas de solda, os dispositivos de solda também evoluíram. Já existem eletrodos de diversas geometrias para diversas aplicações. Os materiais para fabricação também se adequam a aplicação como materiais mais macios ou mais duros, resistentes à temperatura. Para a realização de solda em tubos, com a realização de dois pontos de solda ao mesmo instante, é necessária a utilização de um tipo de eletrodo que não é muito comum nas aplicações usuais, que é o mandril.

3.3.1 Máquinas de soldagem a ponto por resistência

A forma construtiva e de operação das máquinas de solda são diferentes, porém seguem o mesmo princípio de funcionamento e padrões de regulagem. Ela pode ser do tipo estacionária, como mostrado na Figura 8, pode ser uma máquina de soldagem a ponto suspensa, também chamado de pinça de solda, como mostrado na Figura 9 ou também pode ser do tipo robô, que é uma máquina estacionária presa a um braço robótico, apresentado na Figura 10. A forma construtiva dos tipos das máquinas de solda é diferente, porém o funcionamento é semelhante e obedecem aos mesmos padrões de regulagem. O modelo de máquina do tipo robô é o mais empregado atualmente pela indústria, pois permite maior facilidade de acesso às áreas complexas, rapidez e eficiência no processo de soldagem.



Figura 8: Máquina de solda estacionária[23].



Figura 9: Máquina de solda suspensa[24].

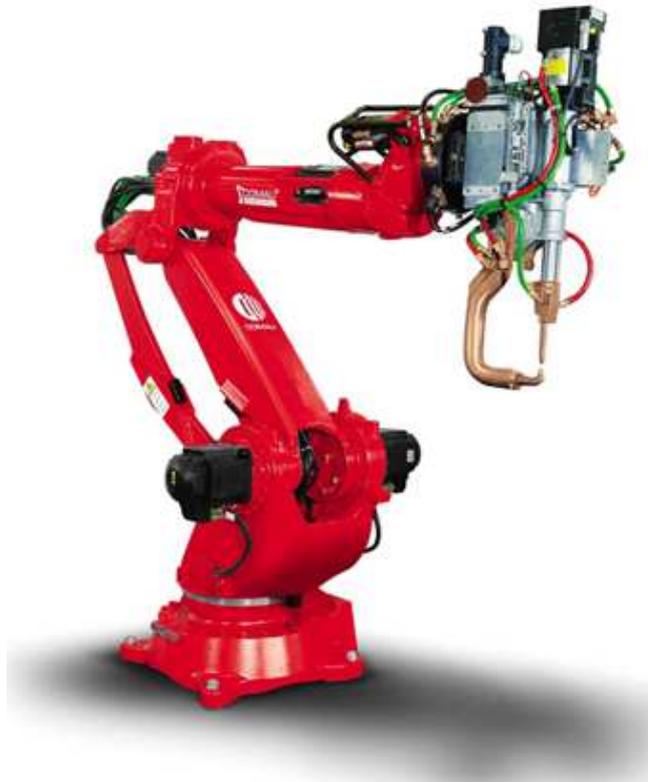


Figura 10: Máquina de solda robô[25].

Todas as máquinas de soldagem a ponto por resistência apresentam basicamente três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito elétrico e o sistema de controle[5] [26].

- Sistema mecânico: É composto de sistemas hidráulicos, pneumáticos, magnéticos e/ou mecânicos e são responsáveis pela aplicação da força do eletrodo para segurar a peça. Este sistema deve controlar a velocidade de aproximação do eletrodo a qual deve ser rápida, mas controlada, de modo que as faces do eletrodo não sejam deformadas a partir de batidas repetidas. Características mecânicas de máquinas de soldagem a ponto por resistência, tal como: rigidez, atrito, e movimento de massa, tem influências complexas sobre o processo de soldagem por resistência e qualidade de solda[20].
- Circuito Elétrico: Composto de um circuito primário que abrange a linha de alimentação incluindo uma bobina primária no transformador de soldagem, e um circuito secundário que inclui uma bobina secundária, os cabos que conduzem a corrente de soldagem através das pinças e os eletrodos até o material. Esse transformador é responsável por

transformar a corrente de alta voltagem e baixa amperagem para uma corrente de baixa voltagem e alta amperagem[27]. Este circuito encarrega-se de fornecer a corrente aos eletrodos como apresentado na Figura 11.

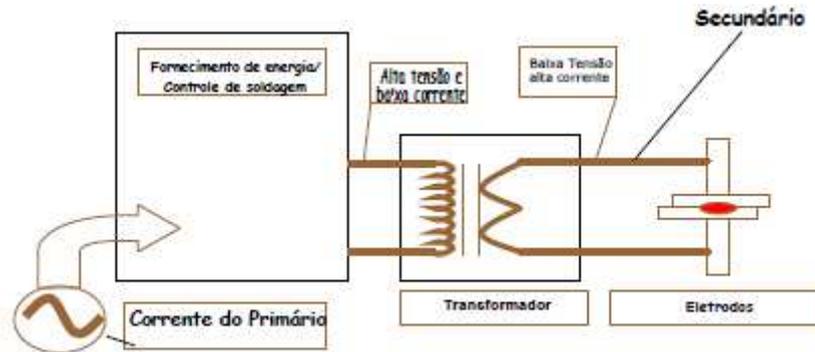


Figura 11: Circuito elétrico típico máquina de solda a ponto[28].

- Sistema de controle: É responsável pelo controle do processo de soldagem e fornece as seguintes funções principais: O momento inicial da soldagem, a abertura das pinças, o momento exato de fechar as pinças, início e término da passagem de corrente elétrica, a intensidade desta corrente elétrica e outras funções secundárias. Esses valores de tempo e de intensidade de corrente são definidos no comando de soldagem, através de uma programação feita por um técnico, de acordo com as normas fundamentadas em bons resultados obtidos de maneira empírica. O comando de soldagem nada mais é que um temporizador das ações da pinça, adicionado a um controlador de corrente elétrica[29].

Esses três componentes (mecânico, elétrico e controle) regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência: a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem[30].

3.3.2 Eletrodos

Os eletrodos são a parte física mais importante do equipamento. O propósito do eletrodo é conduzir a corrente de soldagem para a peça de trabalho, aplicar força para juntar as peças a serem soldadas e retirar ou reduzir o calor da superfície da peça de trabalho além de manter a sua forma e características

originais de condutor térmico e elétrico, suportando severas condições de trabalho[31].

Durante a operação de soldagem, altas correntes, grandes forças compressivas e altas temperaturas são atingidas na superfície de contato do eletrodo/chapa. A Figura 12 mostra a distribuição de temperatura na soldagem de um tipo de Aço (temperatura de fusão entre 1300°C e 1400°C). No contato eletrodo/chapa a temperatura chega a 900°C. Sabe-se que a temperatura de fusão do cobre é em torno de 1085°C. Ao aproximar da temperatura de fusão do cobre aumenta o desgaste do mesmo. Se ultrapassar a temperatura de fusão do cobre no contato, pode ser depositado cobre sobre a região de solda o que pode gerar corrosão, e a corrosão não é aceitável em aplicação nuclear. O controle de parâmetros para aumentar a vida útil do eletrodo se torna mais difícil considerando que a temperatura de fusão das ligas de zircônio varia em torno de 1800°C a 1900°C.

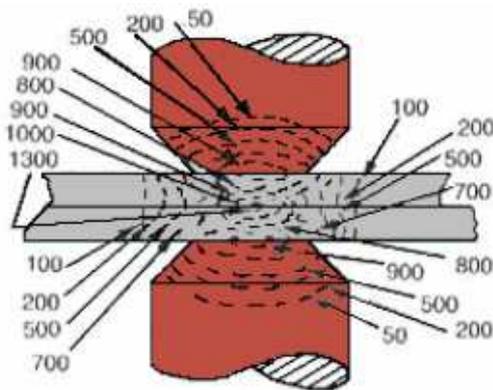


Figura 12: Temperaturas Instantâneas estimadas de soldagem a ponto de chapas de aço em graus Celsius no instante de finalização da soldagem[32].

A efetividade do processo depende consideravelmente das condições e da vida do eletrodo. Esta é geralmente definida como o número de soldas que podem ser feitas, sem a necessidade de troca do eletrodo, antes da qualidade da solda diminuir a níveis inaceitáveis. Uma baixa vida do eletrodo pode limitar a taxa de produção. Os eletrodos absorvem calor através da superfície da peça de trabalho e devem manter a sua forma e características originais de condutividade térmica e elétrica em severas condições de trabalho[33]. As dificuldades para manter o bom desempenho do eletrodo se devem aos grandes gradientes de temperatura a que eles estão sujeitos (Figura 12), além

das grandes forças compressivas. Como consequência, os eletrodos estão constantemente mudando as geometrias de suas pontas (deformação elástica e plástica), levando ao desgaste e/ou alteração de forma.

Por ter um papel muito importante na soldagem, os eletrodos são construídos com diferentes geometrias, cada qual com sua finalidade e aplicação. Os mais utilizados são mostrados na Figura 13. Nota-se que existe uma grande diferença entre as geometrias da ponta do eletrodo, sendo que no eletrodo plano o contato se dá pela área total definida pelo diâmetro do corpo do eletrodo, enquanto que em outras configurações a área é bem menor que uma seção do corpo do eletrodo, como é o caso do truncado. Essa geometria define a densidade de corrente que vai passar pelas peças a serem soldadas.

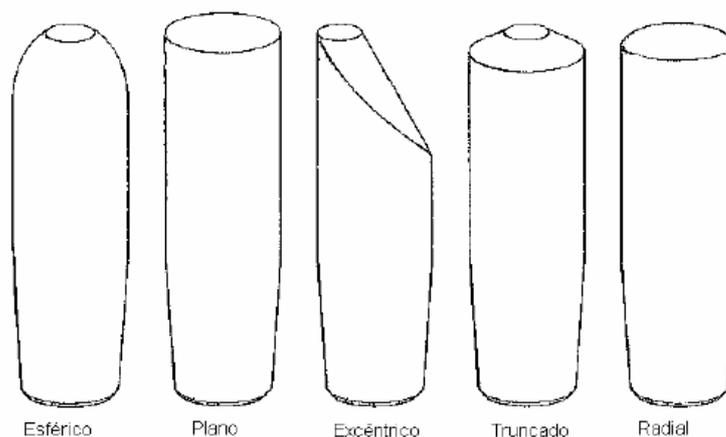


Figura 13: Tipos mais utilizados de eletrodo na soldagem a ponto[26].

Existem inúmeros formatos de eletrodos, cada qual para um determinado tipo de aplicação, que pode variar em função dos acessos disponíveis, das espessuras das chapas a serem soldadas e do posicionamento dos pontos de solda.

Na soldagem a ponto, a área de contato do eletrodo controla o diâmetro resultante do ponto de solda e a densidade de corrente de soldagem. Os eletrodos devem ter boa condutibilidade elétrica, mas eles devem também ter resistência mecânica e dureza adequada para resistir à deformação causada por aplicações repetidas e altas solicitações térmicas [32] [26] [34].

Normalmente um eletrodo para soldagem a ponto (Figura 14) possui quatro características geométricas:

A – Face: é a parte que mantém contato com a peça de trabalho e na soldagem é a parte mais importante do eletrodo por que ela determina o valor da densidade de corrente a aplicar na realização do ponto de solda, assim como também determina o valor da pressão a utilizar para atingir a força necessária na realização da soldagem.

B – O corpo: deve ter a suficiente massa, área ou espessura para suportar a força aplicada nas chapas e também para carregar a corrente de soldagem.

C – Conexão: é a forma como ele vai conectado no porta eletrodo ou suporte do eletrodo.

D – Cavityde para refrigeração: é a parte oca interna de alguns eletrodos que está conectado ao porta eletrodo, serve para a refrigeração do eletrodo, não pode ser muito pequena para não dificultar a passagem da água de refrigeração e nem muito larga para não debilitara estrutura do eletrodo[12].

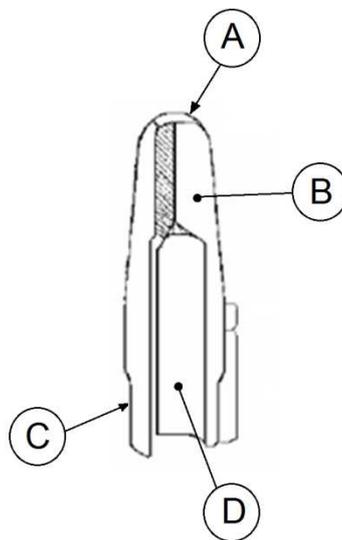


Figura 14: Características de um eletrodo[3].

Durante a realização do ponto de solda, a corrente é passada através do eletrodo. A quantidade de corrente a passar e o calor gerado pela corrente nas superfícies de contato das peças está em função direta do diâmetro do eletrodo. Este efeito é chamado “Densidade de Corrente” que é a quantidade

de corrente que pode passar por uma determinada superfície (A/mm^2). Se o diâmetro do eletrodo é pequeno a densidade de corrente será alta então terá maior quantidade de corrente em uma área menor. Caso um maior aporte de calor seja gerado, pode acontecer o afundamento do eletrodo na chapa (indentação). Se o diâmetro do eletrodo for maior, a densidade de corrente será menor, pouco calor será gerado, a pressão do eletrodo diminuirá e a soldagem pode não ser realizada ou será fraca. Logo o diâmetro da face do eletrodo tem uma importância na realização do ponto de solda.

O eletrodo para soldagem a ponto de componentes de ligas de zircônio (Figura 15) possui características diferentes dos eletrodos comuns. Embora a maioria dos eletrodos utilizados na soldagem a ponto convencional possua a cavidade para refrigeração, que é a parte oca interna do eletrodo que está conectada ao porta eletrodo, os eletrodos utilizados na soldagem de componentes de ligas de zircônio, não possui essa cavidade. A ausência dessa cavidade é devido às limitações geométricas em que é feito a soldagem. Em consequência disso, a vida útil do eletrodo é menor.

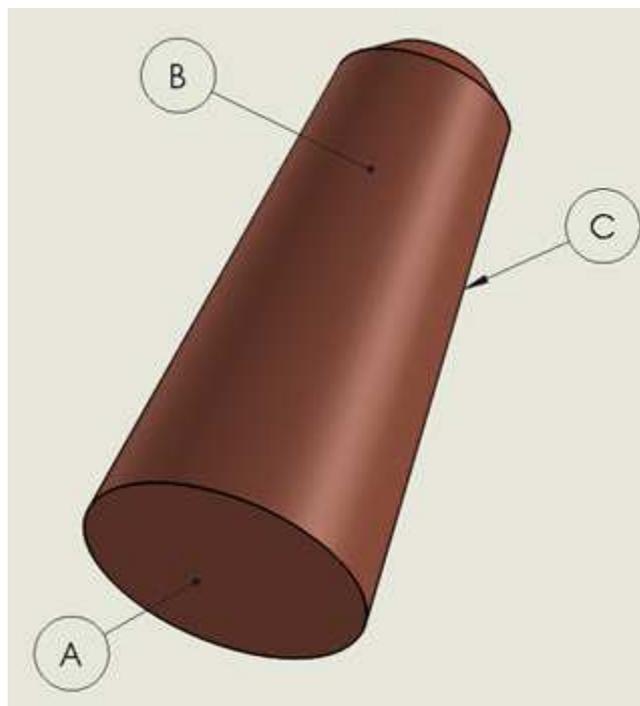


Figura 15: Desenho esquemático de um eletrodo de soldagem a ponto de componentes de ligas de zircônio, em destaque Face de soldagem (A), Corpo (B) e Conexão (C) [Fonte: o Autor].

3.3.3 Mandril

Para a realização da soldagem de chapas em tubo, como é feita durante a soldagem da estrutura do combustível nuclear, é necessário um dispositivo que suporte todo esforço mecânico causado pela aplicação da força pelos eletrodos na chapa no momento da soldagem para não deforme o tubo. Esse dispositivo também deve atuar como dissipador de calor gerado pela soldagem. Esse dispositivo, também considerado um eletrodo é denominado “Mandril”, e é apresentado na Figura 16.

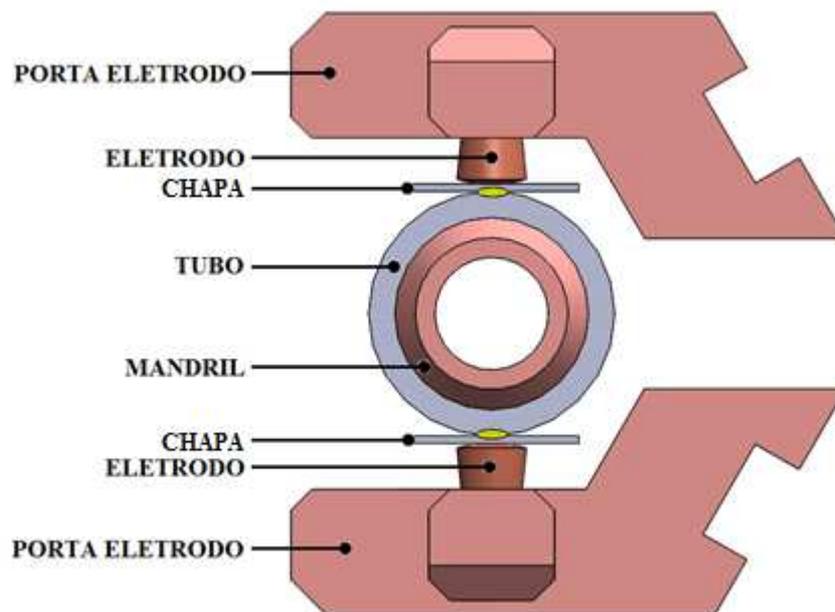


Figura 16: Corpo de prova e eletrodos. Em amarelo, representação do ponto de solda [Fonte: o Autor].

O mandril também tem a função de ser o condutor da corrente elétrica para a realização da soldagem em ambos os lados do tubo, permitindo assim a realização de dois pontos de solda simultaneamente. Levando em consideração os conhecimentos empregados em eletricidade, os pontos de solda estão em série, pois uma mesma corrente elétrica é empregada para realização dos dois pontos de solda. A corrente elétrica irá percorrer todo o circuito, partindo do transformador passando por: porta eletrodo superior, eletrodo superior, chapa superior, tubo, mandril, tubo, chapa inferior, eletrodo inferior e porta eletrodo inferior.

Pela necessidade de ser um eficiente condutor de eletricidade e calor, o mandril é fabricado do mesmo material do eletrodo e é dimensionado levando em consideração a solicitação mecânica empregada no processo.

3.3.4 Materiais do eletrodo e mandril

O material dos eletrodos deve possuir as seguintes propriedades[4]:

- a) – Alta condutividade térmica e elétrica.
- b) – Baixa resistência de contato
- c) – Grande resistência mecânica e ao desgaste nas temperaturas de trabalho.

Numerosos elementos têm sido pesquisados para melhorar a composição do material a usar nos eletrodos. Um material duro, por exemplo, pode ter melhor resistência ao desgaste, mas com o aumento do teor de ligas e conseqüentemente das suas durezas, a condutividade elétrica é geralmente diminuída. Uma combinação entre condutividade elétrica e térmica, junto com adequada dureza mecânica e resistência às temperaturas de operação são os requerimentos essenciais para um adequado material do eletrodo[32].

O Cobre, material mais utilizado para a construção de um eletrodo, pode ser endurecido por diferentes mecanismos, entre eles: endurecimento a frio, por solução sólida, por precipitação e por dispersão, os quais originam mudanças na estrutura cristalina do metal. Devido às condições de trabalho o eletrodo pode sofrer deformação plástica. Os materiais para eletrodos em soldagem por resistência são classificados pela RWMA[32] da seguinte forma:

- GRUPO A – Ligas de cobre
- GRUPO B – Materiais refratários e compósitos
- GRUPO C – Materiais especiais

Dentro de cada Grupo, os eletrodos ainda são classificados por classes, ou seja:

Classe 1: É composta de materiais não tratáveis termicamente e endurecidos por trabalho a frio, que não afeta as altas condutibilidades térmica e elétrica;

Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutibilidades elétrica e térmica mais baixa em relação aos eletrodos da classe 1. As propriedades mecânicas e físicas requeridas são conseguidas por tratamento térmico ou por uma combinação de tratamento térmico e trabalho a frio. Os eletrodos da classe 2 são os mais utilizados e podem se adequar a uma ampla faixa de metais e condições;

Classe 3: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e menores condutibilidades térmica e elétrica.

A Tabela 1 resume os tipos e a composição dos eletrodos, considerando as suas características de acordo com a classe do material.

Tabela 1: Classificação dos eletrodos de soldagem a ponto pela RWMA[32]

Grupo	Classe RWMA	Material do Eletrodo	Condutividade (% IACS mín.)	Dureza (HRB mín.)	Material a Ser Soldado
A	1	Cobre - Zircônio	80	65	Ligas de alumínio, ligas de magnésio, materiais revestidos (galvanizados), latão e bronze.
	2	Cobre - Cromo	75	75	Aços laminados a frio e a quente, aço inoxidável, latão e bronze de baixa condutividade e soldagem de aços galvanizados.
	3	Cobre - Cobalto - Berílio - Níquel	45	90	Materiais de alta resistência como aços inoxidáveis, aços níquel-cromo.
B	10	Cobre - Tungstênio	45	72	Materiais altamente condutores como: ligas de Cu e Ag, eletroconformação, eletroforjamento. Materiais pouco condutores como aços inoxidáveis, onde altas forças devem ser aplicadas.
	11	Cobre - Tungstênio	40	94	
	12	Cobre - Tungstênio	35	98	
	13	Tungstênio	30	69	
	14	Molibdênio	30	85	
C	20	Materiais Especiais $CuAl_2O_3$	75	75	Metais com revestimento metálico como aços galvanizados, aços doces e aços baixo carbono.

Existem eletrodos que são fabricados através do processo de usinagem. Vale dizer que esses eletrodos estão sujeitos a características de dureza bem abaixo das praticadas na Tabela 1, resultando em desgastes e deformações mais acentuados.

Na aplicação nuclear existem restrições a certos materiais metálicos. Alguns materiais metálicos podem se tornar fonte radioativa em um reator nuclear. Outros materiais podem acelerar o processo de corrosão da liga de zircônio. Além disso, não é especificado nenhum tipo de material de eletrodo especificamente para a liga de Zircônio, pois não é uma liga comum. Por esse motivo deve selecionar os materiais que irão compor a liga de cobre.

3.3.5 Sistema de refrigeração

A corrente alta no momento da soldagem gera um aquecimento intenso nas áreas em que se tem a menor resistência, como por exemplo, o contato entre o eletrodo e a chapa. Assim sendo, em alguns casos é necessária a utilização de circuitos de refrigeração para os braços das pinças, para os eletrodos e muitas vezes até para os transformadores, evitando-se dessa forma a possibilidade de um aquecimento descontrolado nessas partes. Caso exista um superaquecimento dos eletrodos, estes podem vir a perder algumas de suas propriedades físicas, sendo que uma alteração de temperatura nas partes metálicas evidentemente é acompanhada de uma alteração significativa do valor de resistência elétrica desses metais.

Dessa forma, as partes refrigeradas possuem dutos internos para passagem de água, conforme mostra a Figura 17, dependendo da aplicação da pinça. Esta água deve ser tratada quimicamente para que se elimine a possibilidade de ataques corrosivos, incrustações, além de fungos e bactérias, a fim de prolongar o uso dos dutos, das tubulações das instalações e dos equipamentos. A velocidade e a temperatura do fluxo refrigerante devem ser definidas de acordo com o uso do equipamento, para que o sistema não fique subdimensionado[34].

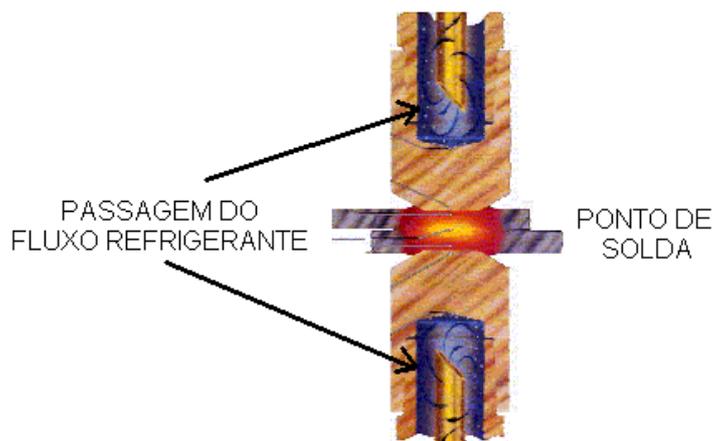


Figura 17: Refrigeração do Eletrodo de Soldagem[29].

3.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM A PONTO E SEUS EFEITOS

Na prática normal, para obter uma condição de calor desejada, a corrente de soldagem, força aplicada na peça de trabalho e o tempo de soldagem são pré-

selecionados para uma particular aplicação, dependendo das propriedades do material da peça de trabalho a ser soldada e a geometria da ponta do eletrodo[35].

As combinações desses parâmetros formam um ciclo de soldagem. Este ciclo de soldagem está dividido em três partes características, que são a Corrente, Força e Tempo, sendo que o último está subdividido em quatro partes, como mostrado na Figura 18.

No processo de soldagem a ponto por resistência as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças mecânica, pneumática, hidráulica ou uma mistura delas. Em seguida, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido e passa pelos eletrodos, não consumíveis, através do metal base. A resistência deste metal base à passagem da corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando-se uma região fundida que recebe o nome de lente de solda. Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente resfria e solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde passa a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentes de solda geradas são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo[8].

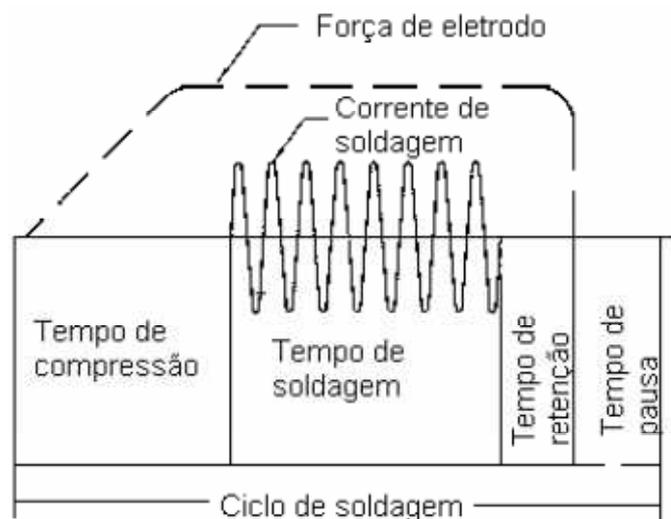


Figura 18: Ciclo de solda básico em solda a ponto[12].

Parâmetros de soldagem são as variáveis do processo que são combinadas entre elas para realizar um ponto de solda, efetivando a junção de uma junta. Os valores certos desses parâmetros são um dos responsáveis de uma boa ou má qualidade da solda.

Conforme explanado, em soldagem a ponto por resistência existem três parâmetros principais: Corrente de soldagem, Força do eletrodo e Tempo de soldagem os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. A resistência elétrica da peça não é um parâmetro, mas tem muita importância, pois ela é responsável da geração de calor devido à oposição à passagem da corrente (efeito Joule).

3.4.1 Corrente de soldagem

Tanto a corrente alternada (A.C.) quanto à corrente contínua (D.C.) são usadas para produzir soldas a ponto. A indústria, com raríssimas exceções, dependia principalmente dos sistemas monofásicos de corrente alternada para a grande maioria de suas operações de soldagem. Com o advento de robôs e a necessidade resultante de componentes leves para a soldagem, um sistema integrado de controle transformador-retificador foi desenvolvido. Este sistema executa soldagens com corrente contínua livre de flutuações devido à retificação de uma fonte de energia de alta frequência, o que representa uma alternativa econômica em relação aos tradicionais sistemas de corrente alternada[8].

Um Toróide (bobina) ou um Sensor de efeito Hall pode ser usado para medir a corrente. O toróide, o mais usado, mede tensão induzida pelo campo magnético variável que envolve os condutores que conduzem corrente. Só pode ser usado para medir corrente AC. Este sinal de tensão pode ser eletronicamente integrado e assim fornecer uma medida indireta da corrente de soldagem. Variações na posição e orientação do Toróide podem causar variações na área efetiva logo também nos valores medidos da corrente. Estudos mostram que este erro pode ser até 5% da medição quando o Toróide não está fixo na máquina de soldagem[33].

As correntes de soldagem utilizadas pelo processo podem variar de valores bem baixos, no caso de soldagens de componentes eletrônicos, até valores bastante elevados podendo atingir níveis superiores a 15 kA.

Em geral, uma rampa de subida da corrente é utilizada para evitar sobre aquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta. Já uma rampa de descida da corrente é normalmente usada para controlar a característica do resfriamento na região da soldagem. Essa característica inclui a solidificação e a taxa de resfriamento no estado sólido, mas Vargas[36] mostra que tais rampas têm pouco efeito sobre o tamanho do ponto.

Segundo a Equação 1, a corrente de soldagem tem um efeito muito maior na geração de calor do que a resistência ou o tempo, devido a sua influência quadrática. Sendo assim é uma importante variável a ser controlada. Os dois fatores que causam variação na corrente de soldagem são: flutuações na tensão da linha de transmissão da energia elétrica e variações na impedância do circuito secundário quando se utiliza máquinas à corrente alternada. Variações de impedância são causadas por mudanças na geometria do circuito ou pela introdução de massas metálicas magnéticas no circuito fechado secundário da máquina. Máquinas com corrente contínua não são significativamente afetadas por massas metálicas magnéticas no circuito secundário e são pouco afetadas pela geometria do circuito[32].

Tão importante quanto à corrente em si, a densidade de corrente na região de passagem de corrente na chapa também deve ser observada. Os limites superiores e inferiores para a densidade de corrente dependem da sua intensidade e do diâmetro e forma da ponta do eletrodo. Se a intensidade e densidade de corrente forem insuficientes, nunca ocorrerá fusão, mesmo com um longo tempo. Entretanto, sendo as mesmas excessivas, o eletrodo penetrará na peça, pois grande parte das chapas ou toda sua espessura estará na fase plástica. Assim, para uma dada força de aplicação dos eletrodos, há uma corrente máxima, acima da qual o metal sob os mesmos é expulso violentamente provocando soldas com defeito[37].

A resistência máxima das soldas é obtida pela soldagem com densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão[3]. A Figura 19 mostra um gráfico de soldabilidade e os níveis: inferior e superior da corrente entre os quais a soldagem é realizada.

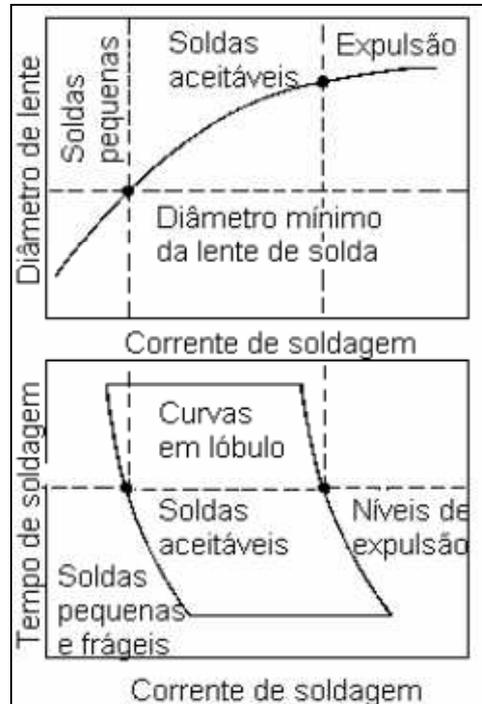


Figura 19: Curva de soldabilidade[3].

3.4.2 Força do eletrodo

A força de eletrodo é aquela força aplicada às chapas e tubos pelos eletrodos durante o ciclo de soldagem. O fechamento do circuito elétrico através dos eletrodos e o material são assegurados pela aplicação desta força. A força é transmitida aos eletrodos de soldagem por um sistema pneumático, hidráulico ou elétrico. A pressão desenvolvida nas interfaces depende da área das faces do eletrodo em contato com as chapas[8]. As funções desta força ou pressão são:

- Trazer as várias interfaces a um firme contato;
- Reduzir resistência de contato inicial nas interfaces;
- Impedir a expulsão do metal de solda da junta;
- Consolidar a lente de solda.

A força de eletrodo, usualmente medida e expressa como um valor estático é uma força dinâmica em operação e é afetada pelo atrito e pela inércia das partes da máquina de soldagem que se movem.

Numa máquina de soldagem a ponto por resistência, essa força é exercida, seja por sistema mecânico (equipamentos de baixa capacidade e manuais), pneumático (mais rápidos) ou sistema hidráulico-pneumático (maior força). Sendo assim, nos equipamentos industriais, quando se tentar regular a força, se está regulando na verdade a pressão do sistema. Equipamentos mais modernos possuem controladores de pressão para manter as forças constantes na ponta do eletrodo, no caso de variação da pressão da linha. Também permitem, com estes controladores, regulagem remota da força através do painel de controle. Lembra-se que a força aplicada pelo eletrodo se transforma novamente em pressão sobre as chapas, em função da área de contato dos eletrodos.

Mas a força, mesmo assumindo ser mantida constante, pode variar com o tempo durante uma soldagem. Fonseca e Bracarense[38] verificaram que a força exercida pelo eletrodo, medida por uma célula de carga posicionada no sistema mecânico de acionamento da pinça, varia ao longo da soldagem, como mostra a Figura 20. A força parte de um valor inicial e cresce até o início do tempo de soldagem, quando se mantém praticamente constante. Durante o tempo de soldagem, estes autores acreditam que a força tenha sofrido uma pequena queda, creditadas por eles à expansão térmica do material. Concluído o tempo de soldagem, ela cresce subitamente no momento em que a corrente para de circular, atingindo um valor máximo. Finalmente a força vai reduzindo e cai à zero com o retorno do eletrodo à posição inicial.

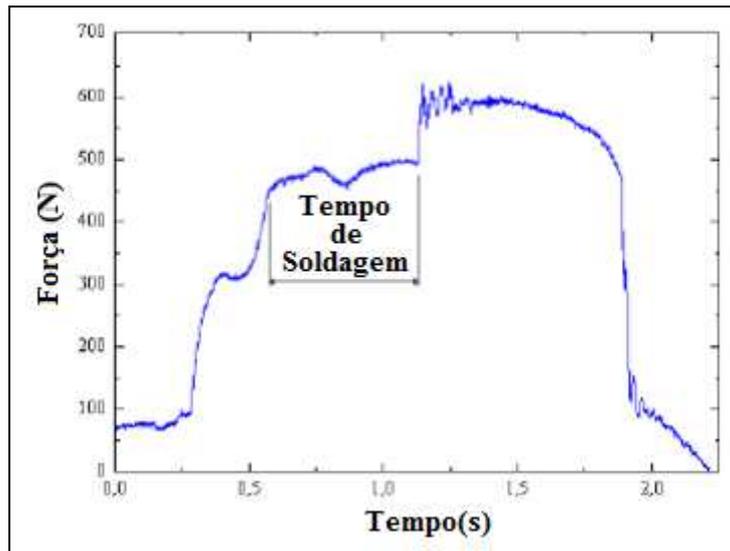


Figura 20: Curva de força aplicada no processo de soldagem[38]

A força do eletrodo afeta a resistência de contato que tem efeito dominante na formação do ponto de solda. A resistência de contato ou constricção na Equação 7 e a resistência à camada de revestimento na Equação 5 são influenciadas pela força de soldagem através de seu efeito na resistência de contato da interface entre as chapas. Conforme já mencionado, as superfícies das chapas a serem soldadas, em escala microscópica, são compostas por uma série de picos e vales. Quando elas são submetidas à baixa força de eletrodo, o contato real na interface chapa/chapa será apenas nos picos, correspondendo a uma pequena porcentagem da área. Portanto, a resistência de contato será alta. À medida que a força de eletrodo aumenta, os pontos altos sofrem uma deformação e a área de contato na interface chapa / chapa aumenta, decrescendo, assim, a resistência de contato. Na maioria das aplicações, o material do eletrodo possui menor dureza do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo / chapa que na interface chapa / chapa[8].

Ao aumentar a força de soldagem, a corrente de soldagem também deverá ser aumentada até um valor limite. O efeito no calor total gerado, entretanto, pode ser inverso. À medida que a força aumenta, a resistência de contato e o calor gerado na interface diminuem. A força do eletrodo deve ser suficiente para conter o metal fundido dentro dos parâmetros dimensionais da face do eletrodo. Se a força for baixa, pode ocorrer expulsão de material na superfície

externa da chapa, expulsão de material na interface chapa / chapa e desgaste prematuro do eletrodo. Quando a força é muito alta a resistência de contato na superfície dos dois metais será baixa, reduzindo assim o calor gerado nesta área. Com isso, os pontos de solda formados com alta força do eletrodo, tipicamente exibirão impressão excessiva na superfície externa da chapa, pontos de solda com diâmetro abaixo do especificado ou até mesmo a falta de fusão[10].

A resistência elétrica aumenta quando a força nos eletrodos é pequena, devido ao contato incompleto entre as superfícies. Alta resistência elétrica entre eletrodos / chapas não é desejável, apesar de benéfico para a geração de calor entre as chapas. Uma elevada força do eletrodo, por outro lado, deforma as asperezas e aumenta a área de contato[39], reduzindo a resistência elétrica, mas podendo ocasionar marcas superficiais ou deformação excessiva no material de base (prejudicando o acabamento superficial). Assim, a força exercida pelos eletrodos caracteriza-se por limites inferiores e superiores, portanto, dentro de valores operacionais ótimos, a força do eletrodo se comporta de forma inversamente proporcional à resistência elétrica, conforme já verificado na Equação 5 e na Equação 7[4].

3.4.3 Tempo de compressão

O processo de soldagem a ponto normalmente tem diferentes etapas. O tempo de cada etapa deve ser precisamente controlado mesmo que cada um dure apenas uma fração de segundo. O tempo usado é medido em ciclos ou em milissegundos. A Figura 18 mostra os principais tempos de soldagem utilizados em soldagem por resistência.

O primeiro intervalo é o tempo de compressão, que é o tempo do processo entre a aplicação inicial da força do eletrodo na chapa metálica e a primeira aplicação da corrente[40].

O tempo de compressão se divide em duas etapas: tempo de acostamento e tempo de pré-pressão. O tempo de acostamento é o tempo que os eletrodos demoram desde a sua posição inicial, afastado das chapas, até tocar nelas. Este tempo deve ser o suficientemente longo para evitar fortes batidas no

momento em que os eletrodos encostam-se à chapa e para permitir a parada das vibrações dos braços da pinça. E o tempo de pré-pressão que é o tempo que o sistema de força demora desde o encostamento até a pressão de trabalho.

O tempo de compressão é utilizado para atrasar a corrente até que o metal base tenha sido submetido ao valor de força de eletrodo determinada. Se a corrente de soldagem for ligada antes que esta força seja atingida, haverá expulsão de metal fundido e a solda será de má qualidade. Se a corrente for ligada antes que os eletrodos entrem em contato com a chapa metálica, quando o fizerem, haverá forte expulsão de metal, podendo causar danos ao ferramental e ferimentos nas pessoas localizadas perto da área. Se a corrente for ligada após do início da pressão de soldagem, a solda poderá até ser de boa qualidade, mas tempo é gasto desnecessariamente e o custo de produção pode aumentar significativamente, logo uma correta sincronização entre o tempo de compressão e o início da corrente de soldagem deve ser feita[41].

3.4.4 Tempo de soldagem

Pela Equação 1, observa-se que, mantendo-se a resistência total constante, a quantidade de calor gerado em qualquer parte do circuito é proporcional ao tempo e ao quadrado da corrente de soldagem. O tempo que está descrito na Equação 1 é o tempo de soldagem. Esse tempo requerido para obtenção de um diâmetro adequado de ponto de solda pode ser diminuído até um valor limite, dependendo da densidade de corrente. A taxa de geração de calor deve ser tal que soldas com resistência mecânica adequada sejam produzidas sem aquecimento excessivo dos eletrodos e a sua conseqüente deterioração[12].

O tempo de soldagem é o intervalo onde ocorre a formação do ponto de solda, neste momento, a corrente de soldagem gera calor suficiente para aquecer a região de contato entre os eletrodos e as chapas e o material se funde dando origem ao ponto de solda. Ele é compreendido entre o início e o término da passagem da corrente elétrica. O tempo de soldagem deve ser observado atentamente para que não seja longo o suficiente para gerar endentação e aderência do eletrodo na chapa, ou até mesmo gerar furos nas peças. Se o tempo de soldagem for muito curto, é possível que não haja a formação do

ponto de solda completo, ou apresente apenas um pequeno ponto de solda não totalmente fundido.

O Tempo de soldagem pode ser dividido em três partes: tempo de subida de corrente (upslope), tempo de aplicação da corrente ou tempo de corrente máxima e tempo de descida de corrente (downslope).

“Upslope” é o tempo de aumento gradual da corrente desde o início do processo até um valor máximo onde a aplicação da corrente máxima se inicia. É geralmente utilizado para evitar sobreaquecimento e expulsão do metal no início do tempo de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta[12].

O tempo de corrente máxima é o intervalo de tempo, relativamente curto, de aplicação da corrente máxima de soldagem. Da Equação 1 pode-se ver que quando se usa intervalos de tempo de soldagem (corrente máxima) muito pequenos o valor da corrente de soldagem aumenta consideravelmente para se conseguir a energia ou calor necessário para fundir o metal base. O calor total desenvolvido é proporcional ao tempo de soldagem. Essencialmente calor é perdido por condução no resto da chapa e pelos eletrodos, uma pequena quantidade é perdida por radiação. Essas perdas se incrementam com o aumento do tempo de soldagem[12].

O “Downslope” é a diminuição gradual da corrente no final do tempo de soldagem. Ele é utilizado para controlar a solidificação da lente de solda e para evitar a rachaduras em metais que são endurecidos por têmpera ou sujeitos a fissuração em quente[12].

3.4.5 Tempo de retenção

A pós-soldagem é necessária para manter as chapas pressionadas, até um determinado arrefecimento do local da soldagem (solidificação da lente do ponto) e impede a formação de espaços ociosos no próprio ponto. Esse tempo de pós-soldagem ou tempo de retenção é o tempo durante o qual os eletrodos continuam na sua posição mantendo a força na peça de trabalho e é contabilizado entre o término da passagem da corrente e o início da abertura

da pinça. Deve ser suficiente para que tensões residuais se esgotem até a sua adequada resistência mecânica antes que a pinça abra[12].

Se os eletrodos forem removidos da solda rapidamente após a corrente de soldagem ter cessado pode acontecer empenamento da região de solda nas chapas finas. Com chapas espessas, o tempo deve ser o suficiente para esfriar e solidificar a ampla lente de solda. É melhor, então, ter os eletrodos em contato com o material até que a solda esfrie completamente de modo que esta tenha a resistência suficiente para resistir ao carregamento imposto quando a pressão dos eletrodos for retirada[12].

Esse tempo também exerce uma influência no resfriamento e, por consequência, na vida útil dos eletrodos. O contato entre as chapas aquecidas e os eletrodos não deve ser mantido por um tempo acima do mínimo requerido para a solidificação do ponto de solda para que a superfície de trabalho do eletrodo possa se resfriar antes de iniciar o próximo ciclo de soldagem.

3.4.6 Tempo de pausa

É o tempo durante o qual o eletrodo é separado da peça de trabalho, a qual é movimentada até a próxima localização de solda; este termo é geralmente aplicado quando o ciclo de solda é repetitivo[40].

3.5 LIGAS DE ZIRCÔNIO PARA APLICAÇÃO NUCLEAR

O zircônio (Zr) é um metal cinza prateado, que pode ocorrer na tonalidade azul escura, dúctil, refratário, com elevada resistência à tração, alta dureza e resistente à corrosão. Seu estado físico é apresentado na forma sólida. Na tabela periódica de elementos químicos, está situado no grupo IV e tem as seguintes características[42]:

- Número atômico (Z): 40;
- Massa atômica (MA): 91,224 u;
- Massa específica: 6,4 g/cm³;
- Energia de ionização: 659,2 kJ/mol;

- Ponto de fusão: 1.850°C;
- Ponto de ebulição: 4.377°C;
- Raio atômico: 155 pm;
- Eletronegatividade: 1,33.

Na crosta terrestre, o zircônio ocorre normalmente associado ao háfnio, na proporção de 50 para 1. A principal fonte de zircônio é a zirconita, que também é conhecida como zircão[42].

A propriedade do zircônio definida pela ASTM indica que é dúctil e tem propriedades mecânicas semelhantes ao titânio e ao aço inoxidável austenítico[43]. O zircônio tem excelente resistência à corrosão em diversos meios, incluindo água superaquecida, e é transparente à energia térmica dos nêutrons. Essas propriedades são ideais para o uso do zircônio nos reatores nucleares resfriados à água como revestimento das pastilhas de urânio. Atualmente, uma grande parte do zircônio é usada nos reatores nucleares[43].

O zircônio é um elemento altamente recomendado para utilização na estrutura do combustível nuclear e outros componentes internos do reator devido à elevada resistência à corrosão em água superaquecida e vapor em combinação com a transparência à energia térmica do nêutron. Por isso, as ligas de zircônio são utilizadas em reatores do tipo PWR, BWR e CANDU. Sua elevada resistência é justificada pela formação natural de uma camada de óxido estável denso na superfície do material. Esse filme é auto recuperador e continua a crescer lentamente até aproximadamente 550°C, permanecendo firmemente aderido[43].

A Tabela 3 mostra duas propriedades importantes para aplicação nuclear: absorção de nêutrons e resistência mecânica. Comparando o ao ferro, ao níquel e ao titânio, o zircônio tem menor resistência mecânica, mas tem até 30 vezes menos absorção de nêutrons. Já ao se compará-lo com o belírio, a absorção é 10 vezes maior, mas a resistência mecânica é o dobro. Portanto, a combinação dessas duas propriedades torna o Zr o material estrutural mais adequado para o uso em reatores nucleares.

Tabela 2: Propriedades importantes em materiais para aplicações nucleares[44].

Metal	Seção de choque de absorção (cm⁻¹)	Limite de resistência a 300°C (MPa)
Ni	0,31	1100
Ti	0,26	1000
Fe	0,17	1100
Al	0,014	90
Mg	0,005	90
Be	0,001	350
Zr	0,01	900

Vários processos foram considerados para melhorar a pureza do zircônio, mas a resistência à corrosão em temperaturas elevadas ainda era um problema devido a traços de nitrogênio. Como o material puro apresentava menor resistência à corrosão quando comparado com ligas com estanho, cromo, ferro e níquel, percebeu-se que a pureza não era o problema. Devido a isso, o desenvolvimento das ligas de zircônio se iniciou[45].

Devido à sua baixa absorção de nêutrons, inicialmente o estanho surgiu como um elemento de liga promissor, além de neutralizar o efeito prejudicial do nitrogênio. A primeira liga, então denominada Zircaloy-1, continha 2,5% Sn. Testes de longa duração em autoclave a elevadas temperaturas foram realizados neste material e verificou-se que a taxa de corrosão permaneceu estável ao longo do teste. Com o tempo, os pesquisadores descobriram que a adição de ferro, cromo e níquel melhorava a resistência à corrosão do zircônio e assim foi criada a Zircaloy-2 (Zr-1,5Sn-0,15Fe-0,05Ni-0,10Cr). No entanto, o níquel formava compostos intermetálicos (fase de Laves Zr₂Ni) que absorvem cerca de 3,5% de hidrogênio, característica indesejável para reatores do tipo PWR, pois levava os tubos de Zircaloy ao colapso. Posteriormente foi criado o Zircaloy-3 (Zr-0,25Sn-0,25Fe), que foi imediatamente abandonado devido à baixa resistência mecânica e à baixa resistência à corrosão[46].

A retirada do níquel e o aumento do ferro geraram a liga Zircaloy-4 (Zr-1,5Sn-0,24Fe-0,10Cr), que possuía boa resistência à corrosão em temperaturas elevadas, como o Zircaloy-2, e com a metade de acúmulo de hidrogênio. Esta liga é a utilizada em reatores PWR e BWR[47].

O Zircaloy-2 e o Zircaloy-4 se caracterizam por uma matriz Zr-a, de estrutura hexagonal compacta, contendo estanho e oxigênio em solução sólida, substitucional e intersticial, respectivamente. Os outros elementos de adição (Fe, Cr e Ni) são praticamente insolúveis na matriz e se encontram como precipitados intermetálicos do tipo fase de Laves $Zr(Fe,Cr)_2$ e Zr_2Ni tetragonal para o Zircaloy-2 e fase de Laves $Zr(Fe,Cr)_2$ para o Zircaloy-4. Eles são distribuídos aleatoriamente no interior e no contorno dos grãos. O tamanho e a distribuição desses precipitados dependem do tratamento térmico que a liga foi submetida[48].

A Tabela 3 apresenta as composições químicas das principais ligas de zircônio para uso nuclear e os reatores onde são utilizadas. Os reatores PWR de Angra 1 e Angra 2 utilizam as ligas Zircaloy-4[48].

Tabela 3: Composições químicas utilizadas comercialmente para ligas de zircônio [46] [47] [48].

Liga	Elementos em peso (%)						Tipo de reator
	Sn	Nb	Fe	Cr	Ni	O	
Zircaloy-2	1,2-1,7	-	0,07-0,2	0,05-0,15	0,03-0,08	0,1-0,14	BWR, CANDU
Zircaloy-4	1,2-1,7	-	0,18-0,24	0,07-0,13	-	0,1-0,14	PWR, CANDU
Zr-1Sn-1Nb-0,1Fe	1	1	0,1	-	-	-	PWR
Zr-1Nb	-	0,8-1,2	0,015-0,06	-	-	0,09-0,12	PWR
Zr-2,5Nb	-	2,4-2,8	<0,15	-	-	0,09-0,13	CANDU

Para aumentar a taxa de queima do combustível, tende-se a prolongar o tempo de operação dos mesmos no reator, ocasionando assim o envelhecimento das ligas de zircônio. Isso leva à queda das propriedades mecânicas dos elementos por danos causados pela radiação, oxidação e absorção de hidrogênio[48].

3.6 ENSAIOS E MÉTODOS DE CONTROLE E QUALIDADE DE SOLDA

Uma solda por resistência pode ser examinada usando procedimentos de ensaios destrutivos e não destrutivos. As dificuldades inerentes a este último ensaio são amplamente conhecidas[49]. Os ensaios mecânicos são utilizados para se obter informações quantitativas sobre o comportamento mecânico de

pontos de solda. Satonaka[50] fez um trabalho de revisão dos métodos de análise da qualidade da solda e concluiu que monitoramento de parâmetros e testes destrutivos são os melhores métodos.

Utilizando a ideia de monitorar o processo de solda a ponto, a máquina de solda possui sensores que são dispostos ou montados sobre a máquina. Corrente é monitorada por um toróide (bobina) e a força monitorada por sensores piezoelétricos. A toróide pode ser montada na ponta dos eletrodos, nas pinças, porta-eletrodos ou na carcaça da máquina perto do transformador e os sensores de força nos atuadores de força do braço[51].

As empresas normalmente desenvolvem seus próprios métodos e procedimentos de controle de qualidade da solda, onde são realizadas inspeções visuais ou ensaios específicos de controle, os dados normalmente são registrados e quantificados para melhor avaliar os critérios mais adequados. Os procedimentos desenvolvidos pelas empresas, normalmente seguem padrões descritos em normas específicas internacionais que descrevem a sistemática do processo e os pontos a serem observados[52].

Os ensaios destrutivos são muito úteis para verificação da qualidade da solda onde a sua comprovação é obtida através de um conjunto de amostras aleatórias que passam por diferentes tipos de ensaios e controles. Os testes práticos avaliam a resistência da junta soldada e a qualidade do ponto gerado, o controle das características físicas como o diâmetro do ponto de solda, a profundidade de indentação, as propriedades de resistência do material e a região da ZTA são pontos importantes observados nos testes práticos de controle de qualidade da solda.

3.6.1 Inspeção visual

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plana e deveria ser livre de fusão superficial, indentação profunda dos eletrodos, trincas, descoloração ao redor da solda e outros fatores que indicam necessidade de manutenção dos eletrodos ou funcionamento impróprio do equipamento. Entretanto, a aparência superficial não é sempre um indicador confiável da qualidade da solda já que o desvio decorrente e outras causas de

aquecimento insuficiente ou penetração inadequada, usualmente, não deixam efeitos visíveis nas chapas.

Todas essas consequências da solda, além de degradarem o aspecto da superfície, podem dar a impressão de que a solda é defeituosa, como o caso da descoloração ao redor da solda, evidente em aço revestido, mas é um fato que não pode ser eliminado.

A coloração também é um indicativo que pode ocorrer corrosão no ponto de solda. A corrosão é uma característica controlada na soldagem de estruturas de combustíveis nucleares.

3.6.2 Ensaio por arrancamento

Um dos ensaios mais comuns utilizados em linha de montagem para verificação da soldagem é o ensaio de destacamento utilizando martelo e talhadeira, pois se mostra um teste que apresenta facilidade de operação, baixo custo de realização, fácil aprendizado e execução na fábrica.

O teste é realizado com o rompimento ou a fratura ao redor do ponto de solda formado em corpos de prova de chapas ou materiais idênticos aos utilizados, em alguns casos o ensaio é realizado na própria peça logo após o processo de soldagem, posteriormente ocorre à medição do diâmetro do ponto remanescente, o qual permanece na chapa que sofreu a fratura, essa medição de diâmetro é realizada como auxílio de um paquímetro e considera a média dos pontos de solda de todos os ensaios[53].

A avaliação do teste é muito subjetiva neste caso por não levar em consideração alguns fatores envolvidos no teste como a força de cisalhamento e as deformações causadas pelo processo de rompimento ou destacamento das chapas. Também é possível avaliar a qualidade da solda de forma semelhante, preparando-se corpos de prova padrão com duas partes iguais da chapa de aço utilizado, realizar a soldagem e em seguida fixá-los em um dispositivo adequado, as amostras de chapas soldadas são então dobradas ou forçadas ao distanciamento entre si até que ocorra o rompimento do ponto, com o uso de um paquímetro, mede-se o diâmetro do ponto de solda em direções perpendiculares entre si, o diâmetro dos pontos de solda que

permanecem aderidos à chapa medida, é que irá determinar a qualidade da solda comparando-se com medidas de diâmetros de pontos de referência de acordo com a especificação necessária para cada aplicação, normalmente cada empresa possui seu próprio modelo e os diâmetros de referência para comparação com os testes[53].

Em casos onde os pontos de solda apresentam assimetria ou se deformam por conta do ensaio de destacamento, são necessárias diversas medições em posições diferentes para que se possa estabelecer o diâmetro encontrado no teste, esse procedimento se faz necessário devido à variação de pontos irregulares onde não é possível estabelecer o diâmetro médio aproximado e a medição torna-se por isso, prejudicada quanto à precisão dos resultados. A Figura 21 apresenta o formato do corpo de prova utilizado para avaliar a qualidade do ponto de solda.

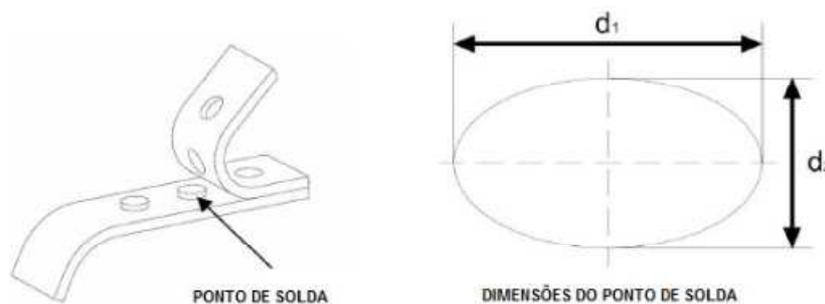


Figura 21: Ilustração do ensaio de destacamento e medição do ponto de solda[53].

3.6.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração ou teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças de separação nas duas peças unidas. Estas forças são opostas e agem em uma direção paralela à superfície da peça, conforme ilustrado na Figura 22.

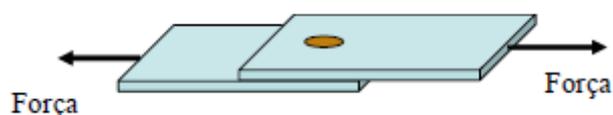


Figura 22: Ensaio de Tração.

O corpo de prova é carregado até a sua ruptura sob tensão numa máquina de tração. A geometria do corpo de prova para este teste da estrutura do combustível nuclear é um pouco diferente da tradicional e está apresentada na

Figura 23. A avaliação da solda é feita em função do valor máximo da carga utilizada para romper o corpo de prova, assim como o modo de ruptura do ponto deve apresentar o destacamento da lente de solda de uma das chapas.



Figura 23: Corpo de Prova da Estrutura do Combustível Nuclear.

A junta, quando submetida a tensões cisalhantes, pode falhar através da lente de solda, o que é associado à baixa resistência da lente, ou pelo rompimento do metal base adjacente à lente de solda, o que é associado com alta resistência da solda (Figura 24). Exige-se, em geral, um diâmetro de lente de solda de cerca de quatro vezes maior que a espessura da chapa, para que a falha por rompimento do metal base ocorra. Podem ocorrer diâmetros da lente de solda menor do que esse critério, dependendo da finalidade a que tal solda se destina[54].

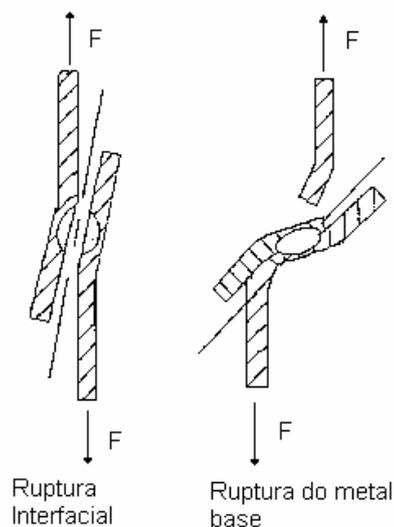


Figura 24: Tipos de falha em teste de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova[12].

3.6.4 Ensaios Metalográficos

O teste metalográfico é utilizado para medir o diâmetro da lente de solda. O ensaio metalográfico pode ser verificado a olho nu ou com o auxílio de um microscópio para ampliação da imagem do corpo de prova, a ampliação da imagem varia de acordo com a necessidade da análise, qualidade do corpo de prova entre outros fatores, normalmente é utilizada uma ampliação de até 1000 vezes[54].

A avaliação da qualidade da solda é verificada através de uma seção transversal do ponto de solda previamente preparado através do lixamento e polimento da amostra em níveis elevados, onde se pode verificar a presença de alguma descontinuidade na região que foi soldada e ainda analisar de forma detalha qual o nível de homogeneidade e heterogeneidade do material, também pode ser observado o diâmetro do ponto de solda e a penetração alcançada no ponto de solda realizado[53].

O processo de lixamento deve ser realizado com tipos de lixa de diferentes granulações, sempre iniciando da maior granulação para a menor granulação, seguido de uma solução de pasta de diamante e acompanhado de ataque químico por aplicação na superfície ou mesmo por imersão de uma solução composta por ácido nítrico em concentrações que variam de 2% a 5% do volume.

3.6.5 Ensaio de corrosão

O teste de corrosão visa determinar a resistência do corpo de prova à degradação por ação de agentes químicos ou por oxidação. Ensaios de corrosão podem ser realizados por várias razões. As principais razões para a realização do ensaio de corrosão na estrutura do combustível nuclear são:

1. Determinar se a solda tem certa qualidade, como inclusões metálicas na região de solda – como um procedimento de inspeção da produção,
2. Para avaliar o comportamento da solda em um meio semelhante a um reator nuclear,

Os métodos de ensaios de corrosão de metais podem ser divididos em três grupos principais: Ensaios de laboratório, Ensaios de campo e Ensaios de serviço.

Entre estes, o ensaios de laboratórios são os mais frequentemente usados e sua característica marcante é que os corpos de prova são especialmente preparados e testados com condições artificiais e controladas. Estas condições são escolhidas para acelerar o processo de corrosão e obter resultados tão rapidamente quanto possível. Resultados mais confiáveis podem ser obtidos, se os parâmetros ambientais do ensaio puderem ser controlados próximos àqueles encontrados em serviços. A principal vantagem dos ensaios de laboratório é que, a influência de parâmetros, tais como temperatura, tensões, umidade, composição do meio, composição do metal, estrutura, condições superficiais, revestimentos e outros sobre o comportamento de corrosão podem ser estudados. Tentativas para se aproximar as condições de laboratório àquelas encontradas em serviço, têm levado algumas vezes ao uso de modelos em baixa escala das situações de serviço. Na prática, há frequentemente o desejo de se obter informação confiável a partir de um ensaio de corrosão tão rapidamente quanto possível, mesmo que a vida do metal em serviço seja de diversos anos. Dessa forma, ensaios de corrosão acelerada foram desenvolvidos.

Em um ensaio de campo, várias amostras de diferentes tipos são expostas a meios que são quase idênticos aqueles em serviço. Estes ensaios são mais acurados que ensaios de laboratório e são frequentemente realizados para verificar os resultados de ensaios de laboratório. A principal desvantagem dos ensaios de campo é a sua longa duração.

Em um ensaio de serviço, amostras são colocadas na instalação ou estrutura real para dar informação mais confiável sobre o metal mais adequado para uma dada aplicação. Em muitos casos, ensaios de serviço são antipráticos, caros e podem requerer tempos de exposição muito longos.

As amostras são geralmente identificadas marcando-se ou estampando-se números e/ ou letras sobre elas. Sobre materiais frágeis, entalhes são feitos

nas extremidades para capacitar a identificação. Para conservar as marcações de identificação contra a possibilidade de obliterações durante ensaios de corrosão, amostras são também frequentemente identificadas por furos em posições específicas ou por seu posicionamento em suportes de testes.

Desde que um dos propósitos da maioria dos ensaios de corrosão é determinar a natureza do ataque, em termos de que partes de uma superfície total foram corroídas ou não, e a uniformidade da corrosão, as inspeções visuais são valiosas. Esta prática envolve não somente a observação de variações no aspecto externo da superfície da amostra, mas também variações no meio corrosivo. As observações devem ser feitas antes e após remoção dos produtos de corrosão da superfície da amostra.

As observações macroscópicas são uma extensão da inspeção visual. Nelas, as observações são feitas a magnificações relativamente baixas (2 a 20 vezes). Lentes de magnificação, lupas e microscópios binoculares de baixa magnificação são geralmente usados. Este método de exame dá informação mais detalhada sobre a posição dos pontos de corrosão e a natureza dos produtos de corrosão. Exames macroscópicos durante os ensaios ajudam a determinar os primeiros pontos de corrosão e trincas de corrosão.

Existem diversas outras maneiras de se realizar uma análise do ensaio de corrosão, porém somente essas serão utilizadas nesse trabalho. O ensaio foi feito em laboratório com a definição da composição do meio corrosivo e as condições são constantes e aceleradas para resultados mais rápidos.

3.7 TRABALHOS RECENTES NO TEMA

O desgaste dos eletrodos é tema para vários pesquisadores. Recentemente Panames[55] estudou o desgaste do eletrodo durante o aumento do número de pulsos do tempo de solda em aços IF e HSLA. O maior aporte térmico, devido o aumento do tempo de soldagem, causa desgaste no eletrodo e o desgaste foi avaliado experimentalmente avaliando os eletrodos e as regiões soldadas, informando graficamente a quantidade de pontos de solda que era possível realizar, mantendo a integridade da solda.

Também observando o desgaste do eletrodo, Branco[9] analisou do desgaste de capas de eletrodos de soldagem ponto e sua influência na qualidade da solda de chapas automotivas galvanizadas. As capas de eletrodos citada neste estudo não podem ser comparadas à camada de cromo proposto neste trabalho, pois as capas de eletrodos são parecidas com mini-eletrodos que são sacados quando a vida útil do mesmo acaba, enquanto a camada de cromo é adicionada diretamente no eletrodo não sendo possível sua troca. No trabalho são avaliados diversos tipos de materiais nas capas do eletrodo, relacionando os mesmos com a qualidade da solda e a quantidade de pontos de solda que cada capa pode realizar.

A simulação computacional como mecanismo de predição do tamanho da lente de solda também é objeto de estudo. Srinivasaraju[56] apresentou a distribuição de temperatura dos eletrodos e dos corpos de prova. Também foi observado o crescimento da lente de solda, conforme trabalho realizado por Molenda[57].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para comprovar a capacidade de soldagem do eletrodo de cobre com revestimento de cromo e se existe alguma vantagem em utilizar esse revestimento o trabalho foi dividido em duas etapas: uma etapa experimental e uma análise da distribuição de temperatura obtida através de simulação computacional.

Na etapa experimental foram soldados corpos de prova com duas configurações de eletrodos: sem revestimento e com revestimento de cromo. Foram adotados os testes de corrosão, em que os corpos de prova serão submetidos a uma autoclave com pressão e temperatura controlada por 72h, e testes de metalografia que verificaram o tamanho da lente de solda. Com os resultados destes testes, foi possível determinar a faixa de parâmetros de trabalho, e compará-los com relação ao tipo de eletrodo utilizado.

A simulação computacional teve o objetivo de se avaliar como é a distribuição térmica de cada corpo de prova no momento da soldagem, já que sua obtenção via medição experimental seria praticamente impossível, pois não é possível a visualização da poça de fusão da solda, que é interna ao corpo de prova, para uma possível utilização de uma câmera térmica. A utilização de outros métodos tais como termopares seria demasiadamente invasiva e poderia afetar de forma significativa as resistências elétricas do sistema. Como forma de validação da simulação computacional, foi comparado o tamanho da lente da solda obtida experimentalmente com o obtido na simulação.

Tanto a simulação computacional quanto a soldagem dos corpos de prova serão apresentadas com detalhes nesse tópico do trabalho.

4.1 CORPO DE PROVA

Os corpos de prova (CP) são compostos por duas chapas que são comumente denominadas “tira da grade espaçadora” com dimensões de 14,3 x 30 mm e espessura de 0,43 mm, e um tubo de diâmetro 14,1 mm e 0,85 mm de espessura. O desenho esquemático da soldagem no corpo de prova, com os eletrodos utilizados é apresentado na Figura 4 e na Figura 16. A Figura 23 apresenta um corpo de prova soldado.

O Zircalloy-4 é utilizado para a fabricação dos componentes da estrutura do combustível nuclear. A chapa foi feita por laminação e o tubo por extrusão. As propriedades do material do corpo de prova estão na Tabela 4. O ideal seria considerar que as propriedades dos materiais fossem dependentes da temperatura. No entanto, não foram obtidos dados a respeito dessa dependência de forma que suas propriedades térmicas e elétricas são consideradas constantes.

Tabela 4: Propriedades dos materiais.

Propriedade	Zircalloy-4[60]
Densidade	6560 kg/m ³
Condutividade Térmica	21,5 W/m.K
Calor Específico	285 J/kg.K
Resistividade Elétrica	7,4x10 ⁻⁷ Ω.m

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os corpos de prova (CP) que foram soldados estão de acordo com a geometria apresentada no Item 4.1.

Para verificar se o revestimento de cromo trará vantagens ao processo de soldagem o experimento foi dividido em algumas etapas. Primeiramente foram soldados 50 corpos de prova com eletrodos sem revestimento. Destes, 25 corpos de prova foram soldados com o objetivo de encontrar o ponto de energia máxima e 25 com o objetivo de encontrar o ponto de energia mínima. Dos 25 corpos de prova de cada ponto, 20 foram submetidos a ensaios metalográficos e 5 a ensaios de corrosão. O mesmo foi feito com os 50 corpos

de prova soldados com eletrodos e mandril com revestimento, totalizando 100 corpos de prova. Esta divisão está representada na Figura 25.

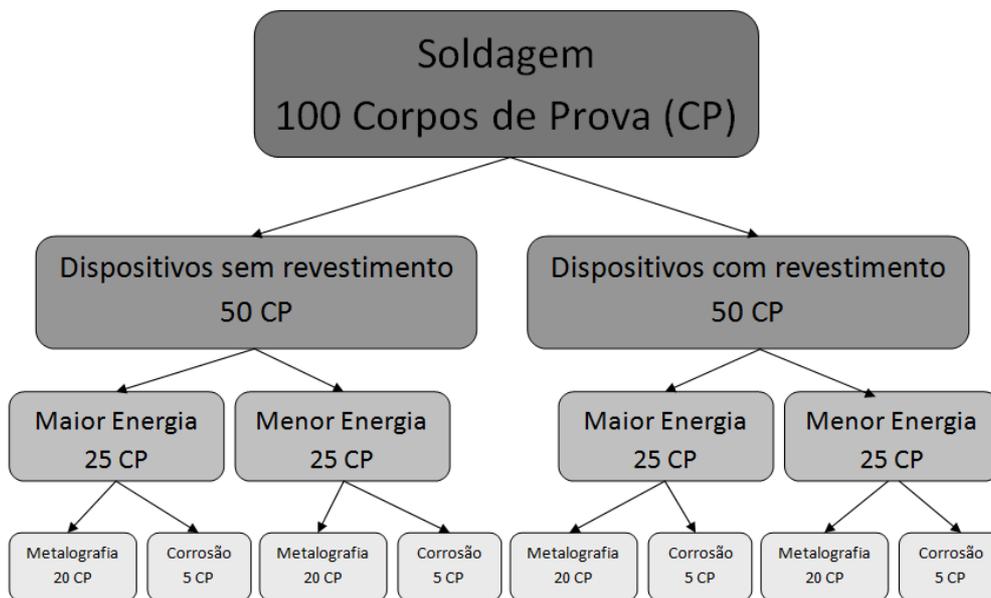


Figura 25: Programação da soldagem e análise.

4.2.1 Parâmetros de soldagem

Seguindo algumas normas e planos de soldagem já pré-estabelecidas no setor nuclear, foram selecionados alguns parâmetros de soldagem, fazendo com que se permita somente a alteração no parâmetro de corrente de soldagem.

Os parâmetros de soldagem foram escolhidos de forma a atender o critério de energia mínima, em que a área da lente de solda tem seu valor mínimo e de energia máxima no limite que acontece a fusão da superfície e agarramento dos eletrodos na superfície da chapa.

Alguns parâmetros foram constantes em todo o experimento, eles estão descritos juntamente com seus valores na Tabela 5. Os valores destes parâmetros são conhecidos por já apresentarem resultados satisfatórios. Esses parâmetros têm seu valor configurado diretamente, isto é, foi configurado no controlador da máquina de solda o valor que foi utilizado na soldagem.

Tabela 5: Parâmetros de Soldagem.

Parâmetros	Valor
Tempo de Compressão	200 ms
Tempo de Soldagem	40 ms
Tempo de Retenção	800 ms

Outros variaram de acordo com o tipo de energia utilizada, como a corrente e pressão. Nesse experimento, foi mantido o valor de força de compressão para a energia mínima e energia máxima, de forma a variar somente o valor de corrente nos pontos de energia mínima e máxima, para observar um possível aumento da faixa de trabalho utilizando o revestimento de cromo nos eletrodos. Estes valores de força de compressão estão descrito juntamente com seus valores na Tabela 6. Diferente de como é configurado o tempo de soldagem, a força de compressão é configurada indiretamente. O que acontece nesse caso, é que se configura o controlador da máquina de solda com uma porcentagem (0 a 100) da vazão de ar comprimido que atua nos cilindros que pressionaram os eletrodos da amostra para realizar a soldagem. Por esse motivo na Tabela 6 apresenta alvos de força, pois os valores realmente utilizados somente foram conhecidos após soldagem e serão apresentados no Item 5, que apresenta os valores de força do experimento que foi medido por meio de sensores de força.

Tabela 6: Parâmetro de Força de Compressão.

Parâmetros	Valor
Alvo de Força (Ponto de energia Mínimo)	500 N
Alvo de Força (Ponto de energia Máximo)	400 N

Já o parâmetro de corrente de soldagem foi obtido após os testes de integridade de solda realizados. Foram obtidos dois parâmetros, uma corrente mínima e outra corrente máxima, de modo a atender o que está proposto na Figura 19. De modo semelhante ao que acontece com a força de compressão, a corrente de soldagem é configurada indiretamente. É configurado o controlador da máquina de solda com uma porcentagem (0 a 100) da potência do transformador gerando uma corrente de soldagem que irá depender do conjunto de resistência combinado. Os valores obtidos serão apresentados no Item 5, que apresenta os resultados do experimento.

4.3 TESTES DA INTEGRIDADE DE SOLDA

Cada conjunto de amostras (eletrodo com ou sem revestimento e energia mínima ou máxima) foi submetido a ensaios metalográficos e testes de corrosão. A quantidade de amostras analisadas foi como previsto na Figura 25. A seguir é apresentado como foi realizado cada teste.

4.3.1 Metalografia

Na análise metalográfica os corpos de prova foram cortados transversalmente, com o auxílio de um líquido refrigerante, seguidos de embutimento a quente em baquelite. Depois de lixado, o corpo de prova foi submetido a polimento com alumina em suspensão. Na última etapa de polimento, os abrasivos foram substituídos por uma solução de 0,5 ml de ácido fluorídrico 40% e 35 ml de sílica coloidal. Não foi necessário ataque químico. Ao final de cada etapa as amostras foram lavadas com água desmineralizada. Após o polimento as amostras dos corpos de prova foram analisadas por microscopia óptica, de forma a caracterizar a lente de solda na seção transversal dos corpos de prova.

Para o cálculo da área da seção transversal da lente de solda foi utilizado o programa de análise de imagens, "ImageJ". Depois de aberto a foto da metalografia com o programa, foi selecionada a área da lente de solda e buscava no programa qual o valor de área a área selecionada representava. O programa informava o valor em pixel que depois convertido, levando em consideração a escala da foto, era obtido à área da seção transversal da lente de solda em mm².

Como requisito de corrente mínima o ensaio de metalografia deverá apresentar uma lente de solda mínima de 1mm². Após diversos ensaios de tração já realizados na INB, é sabido que com essa área mínima se alcança o valor mínimo de tração requerido por norma no setor nuclear. Além disso, o ensaio de metalografia não deverá apresentar poros e trincas na lente de solda e o ensaio de corrosão não deverá apresentar pontos esbranquiçados devido à inclusão de cobre na superfície da amostra.

4.3.2 Testes de corrosão

O teste de corrosão visou determinar a resistência do corpo de prova à degradação por ação de agentes químicos ou por oxidação. Este ensaio foi feito em uma autoclave: o corpo de prova foi imerso em água desmineralizada e foram submetidos a uma temperatura de 300°C ± 3°C e pressão de 87 bar por 72 horas. Os parâmetros dos testes de corrosão visam simular o ambiente de um reator nuclear, e foram normatizados na INB. Depois de lavados e

secados, os corpos de provas foram avaliados por inspeção visual, comparando com amostras padrões. Os corpos de provas que apresentem pontos de solda brancos ou cinzentos, assim como anéis ou zonas também nestas cores, perto ou dentro da zona termicamente afetada foram considerados reprovados. A Figura 26 como é a aparência do corpo de prova após o ensaio de corrosão.

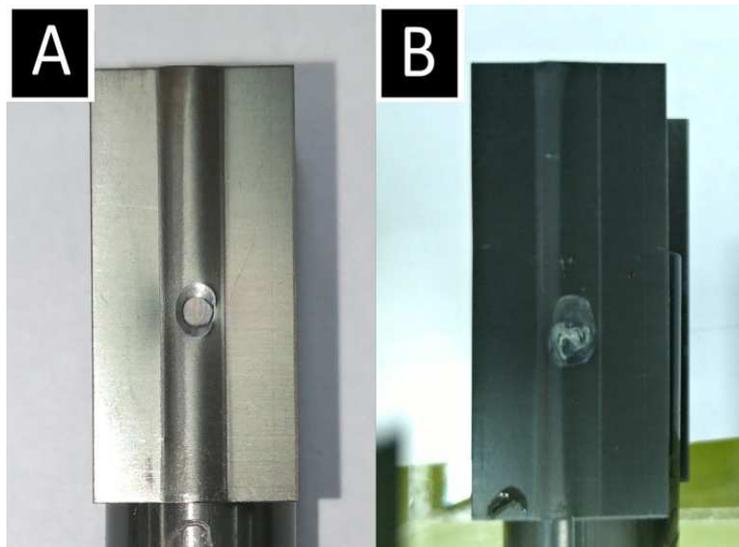


Figura 26: A – Superfície do corpo de prova sem corrosão; B – Superfície do corpo de prova com corrosão.

4.4 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS

4.4.1 Eletrodos utilizados

Os eletrodos que foram utilizados têm o formato de um cone truncado com a superfície em contato de contato esférica. As dimensões do eletrodo estão na Figura 27. O material dos eletrodos é uma liga DIN CuCo₂Be/2.1285 e o método de fabricação do mesmo é a usinagem. As propriedades do material do eletrodo estão na Tabela 7. O ideal seria considerar que as propriedades dos materiais fossem dependentes da temperatura. No entanto, não foram obtidos dados a respeito dessa dependência de forma que suas propriedades térmicas e elétricas são consideradas constantes.

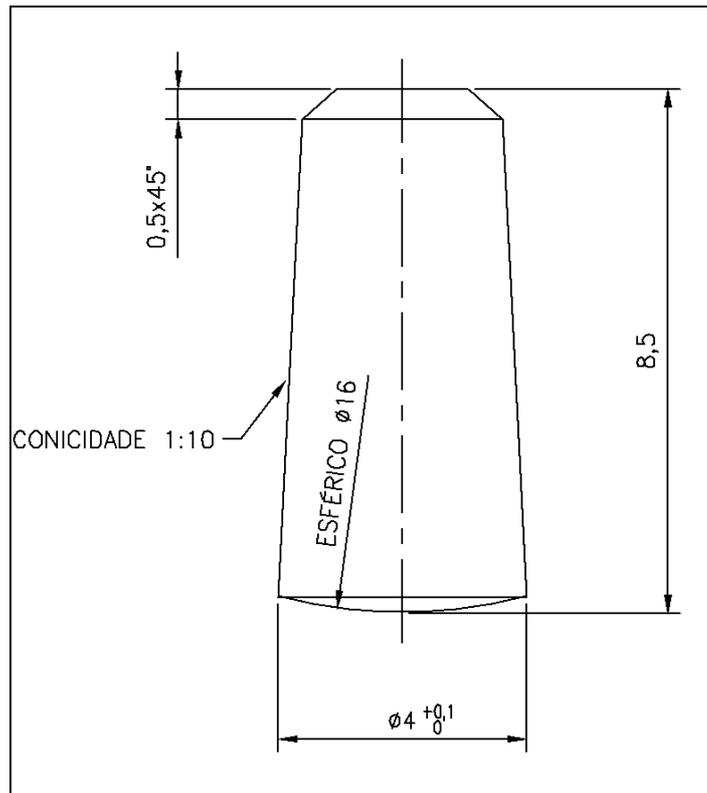


Figura 27: Dimensões do Eletrodo

Tabela 7: Propriedades do material do eletrodo e mandril.

Propriedade	CuCo2Be[58]	Cromo[59]
Densidade	8750 kg/m ³	7190 kg/m ³
Condutividade Térmica	401 W/m.K	69,1 W/m.K
Calor Específico	420 J/kg.K	461 J/kg.K
Resistividade Elétrica	$7,15 \times 10^{-8} \Omega.m$	$1,3 \times 10^{-7} \Omega.m$

Os corpos de prova foram soldados com dois tipos de eletrodos. O primeiro tipo de eletrodo é o que se utiliza atualmente para soldagem de estruturas de combustíveis nucleares. O segundo tipo são eletrodos com uma camada de cromo duro de $23 \pm 5 \mu m$ em sua superfície, que foi a inovação proposta neste trabalho. Um eletrodo sem revestimento e um revestido de cromo são apresentados da Figura 28. Para verificação da espessura da camada de cromo no eletrodo, foi selecionado aleatoriamente um eletrodo revestido e foi cortado transversalmente e através de microscopia óptica e medido dez vezes na região da face, foi verificada a espessura de cromo na superfície, conforme apresentado na Figura 29. As propriedades do cromo utilizado no revestimento do eletrodo estão na Tabela 7.

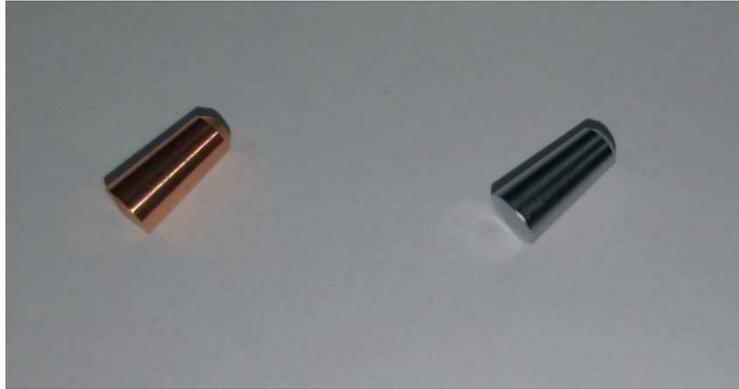


Figura 28: Eletrodo de sem Revestimento (Avermelhado) e Eletrodo com Revestimento (Prateado).

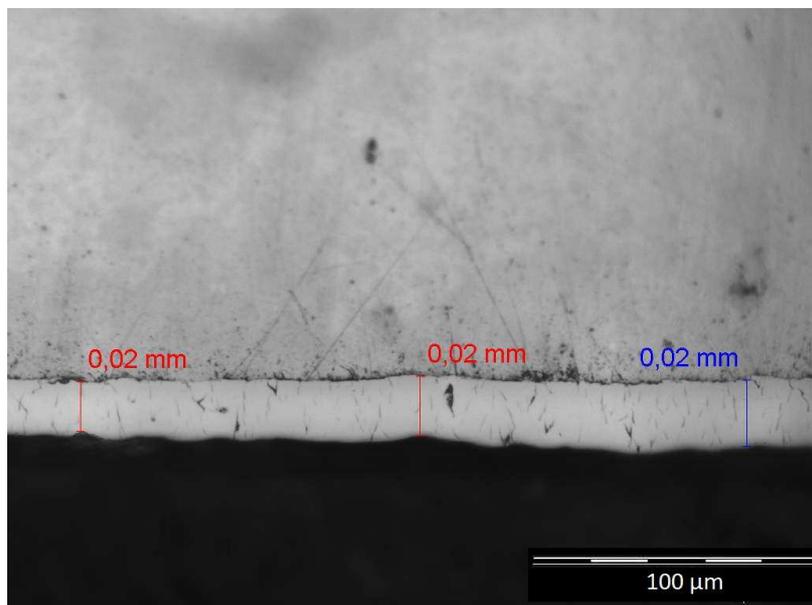


Figura 29: Espessura da Camada de Cromo na Superfície do Eletrodo

Antes de realizar os corpos de prova para este trabalho, foram soldados dois corpos de prova por par eletrodo para uniformizar as características do eletrodo.

4.4.2 Mandril utilizado

Os mandris de soldagem utilizados neste trabalho, que também desempenham a função de eletrodo, foram usinados a partir de uma liga DIN CuCo₂Be/2.1285 com as propriedades descritas na Tabela 7. O mandril é um cilindro oco com dimensões apresentadas na Figura 30. A superfície externa do cilindro é a que entrará em contato com a superfície interna do tubo. O mandril possui uma usinagem interna para conectá-lo ao dispositivo de controle de posicionamento do mesmo no interior do tubo.



Figura 32: Máquina de Soldagem a Ponto de Estruturas de Combustíveis Nucleares.

A máquina de solda possui um medidor de força modelo KISTLER Type 5867 e um medidor de corrente MYACHI MM-336A. A máquina de solda sofre periodicamente a calibração dos instrumentos de medição de força e corrente.

4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste trabalho foi utilizada a metodologia de volumes finitos, aplicando os fundamentos de transferência de calor, para determinar a dimensão da lente de solda utilizando diferentes conjuntos de eletrodos e variando entre a ausência ou não do revestimento de cromo duro na superfície dos eletrodos.

A principal função da simulação computacional nesse trabalho foi ter um mecanismo para predição do tamanho e características da lente de solda. E com a simulação foi capaz de apresentar a distribuição de temperatura que represente o que ocorre na amostra enquanto ela é soldada. Aplicando uma condição à distribuição de temperatura, foi possível inferir a área da secção transversal da lente de solda. Essa área obtida por simulação foi comparada com a obtida experimentalmente.

A geometria do problema que se deseja simular é apresentada na Figura 33A, onde estão representados os dois eletrodos, as duas chapas, o tubo e o mandril de soldagem. Foram realizadas simplificações com intuito de reduzir o tempo de simulação, selecionando somente o volume em que há variação térmica devido à energia de soldagem. Esse volume de controle é representado pela Figura 33B. A análise transiente do processo de soldagem a ponto foi modelada como um modelo simétrico e tridimensional utilizando o software MATLAB.

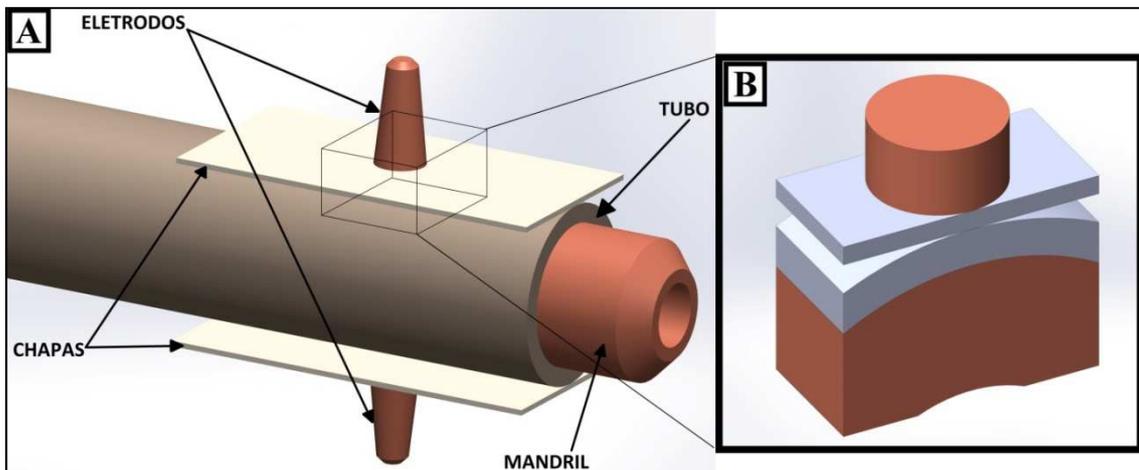


Figura 33: A - Corpo de Prova de Solda a Ponto e os Eletrodos. B - Detalhe do Volume de Controle Utilizado na Simulação Computacional.

Para modelar o processo de soldagem e fazer a previsão de tamanho da lente e temperatura no corpo de prova foram considerados os mesmos parâmetros do processo experimental. Além disso, algumas considerações adicionais foram feitas a fim de tornar viável a simulação computacional como: perda de calor na superfície do corpo de prova por convecção e radiação e não ocorrência de difusão de elementos químicos no local de soldagem. O modelo numérico de previsão de temperatura consiste na resolução da equação de conservação de energia, Equação 10 aplicada sobre o volume do corpo de prova como domínio de estudo.

4.5.1 Condução térmica

Um dos fatores mais importantes na condução de calor é determinar o campo de temperaturas submetidas às condições de contorno, ou seja, é desejável o conhecimento da distribuição da temperatura sobre o meio. Uma vez conhecido

a distribuição, através da lei de Fourier, é possível determinar o fluxo térmico condutivo, que consiste na Equação 8:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q = \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (8)$$

Onde:

ρ : Densidade;

c_p : Calor específico;

k : Condutividade térmica;

T : Temperatura;

q : Termo fonte.

A condução em regime permanente ocorre em muitos casos da engenharia apesar de sua simplicidade matemática. Mesmo não apresentando fielmente resultados condizentes com a realidade, é possível alcançar valores aproximados ao comportamento real.

Em regime permanente não há variação da quantidade de energia armazenada, reduzindo a Equação 8 à Equação 9:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q = 0 \quad (9)$$

Com este fator, a variação do tempo não interfere na variação de energia, tornando o cálculo menos preciso.

Em caso de regime transiente os problemas de condução de calor dependem do tempo, e nos cálculos, as condições de contorno foram alteradas conforme o período e resolução de cada etapa do cálculo. Por exemplo, se uma chapa de aço é aquecida em um ponto, à tendência é que o calor gerado neste ponto se distribua sobre a superfície até que uma distribuição de temperatura estacionária seja alcançada. A transferência de energia ocorre também no interior da chapa de aço por condução para a superfície e a temperatura em cada ponto decresce até uma condição de regime permanente seja alcançado.

Em regime transiente a equação do fluxo térmico de condutivo é considerada integralmente a Equação 8.

4.5.2 Ciclo térmico

A principal finalidade do modelo é simular o ciclo térmico oriundo da passagem da corrente, em cada região da junta soldada, durante o processo de soldagem a ponto de componentes de ligas de zircônio.

O modelo a ser utilizado se baseia na equação diferencial para conservação de energia, conforme proposto por Xavier[61], que engloba fenômenos de transferência de calor por radiação, convecção e condução, relacionadas aos fenômenos de transferência de massa, aquecimento, resfriamento, fusão e solidificação. A Equação 10 descreve o modelo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}[\rho c_p(\vec{u})T] = \text{div}[k(\text{grad}(T))] + S \quad (10)$$

Onde:

ρ : Densidade do aço;

c_p : Calor específico;

k : Condutividade térmica;

\vec{u} : Vetor velocidade;

T : Temperatura;

S : termo fonte, e se refere às fontes de entrada ou perda de calor, como o calor de fusão, a solidificação, transformações de fase e efeito Joule.

Uma solução para a Equação 10 pode ser obtida através da discretização utilizando o método de volumes finitos, que propicia a integração da equação no espaço e no tempo, conforme a Equação 11.

$$\int_{\delta t} \int_{\delta V} \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} dvdt + \int_{\delta t} \int_{\delta V} [\text{div}(\rho c_p(\vec{u})T - k \text{grad}(T))] dvdt = \int_{\delta t} \int_{\delta V} S dvdt \quad (11)$$

Posteriores arranjos algébricos levam à Equação 12, a qual seus termos representam os fluxos de energia transportada e seus coeficientes podem ser obtidos pelo esquema “powerlaw” descrito por Patankar[62]. A solução para a equação é obtida pelo método linha por linha descrito por este mesmo autor para o algoritmo tridiagonal.

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_T T_T + a_B T_B + b \quad (12)$$

O código desenvolvido, neste trabalho, é o modelamento do processo de soldagem a ponto, verificando seu comportamento quando os dispositivos do processo foram submetidos à corrente elétrica causando um aquecimento e fusão na região de união entre chapas gerando uma lente de solda. O código computacional calculou os gradientes de temperatura entre os componentes da soldagem e verificar a existência da lente de solda.

O código foi desenvolvido em ambiente MATLAB®. O programa foi dividido entre o programa principal e nove subprogramas. Dos subprogramas, sete foram de entrada de dados, que foram separados entre a geometria de cada parte relacionada na simulação e parâmetros do material e da soldagem. Os outros dois foram sub-rotinas de cálculos do esquema powerlaw e do termo fonte.

Os resultados de distribuição de temperatura obtidos por meio do modelo foram adicionalmente utilizados para previsão de tamanho da lente utilizando o calor de fusão e temperatura de fusão do material [41] [55]. O programa foi calibrado com o valor da área transversal da lente de solda. Depois de calibrado foi verificado com demais lentes de solda.

Na saída de dados, o programa disponibilizou os seguintes gráficos:

- Distribuição de temperatura em uma secção transversal central a lente de solda;
- Posição e tamanho de lente de solda neste mesmo plano.

4.5.3 Condições iniciais e de contornos

A solução da Equação 10 com as condições de contorno (CC's), iniciais (CI) e a representação da fonte permite, então, a obtenção dos valores de temperaturas há todos os instantes durante o procedimento de soldagem. Quanto às condições de contorno, foram admitidas duas condições térmicas: convecção e radiação pelas superfícies da peça. A fonte de calor tridimensional, que será a energia descrita na Equação 1, é incluída no termo fonte da Equação 10 em cada ponto de contato entre as superfícies dos componentes e pode-se, portanto, resolver o problema acoplado considerando

as não linearidades devidas a propriedades termofísicas (dependentes da temperatura e composição). A convecção e radiação nas superfícies da chapa foram classicamente descritos por:

$$q = q_c + q_r = h(T - T_e) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_e^4) \quad (13)$$

Onde:

$$T_e \text{ (temperatura)} = 23^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon \text{ (emissividade)} = 0,6$$

$$\sigma \text{ (constante de Stefan-Boltzman)} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$h \text{ (coeficiente de convecção)} = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Quanto à condição inicial, admite-se que todas as faces da chapa tenham temperatura igual a 23°C no início do processo. Aplicadas as CC's e CI, uma solução para a Equação 10 é obtida por meio do método de volumes finitos, conforme detalhado por Xavier[61].

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O que se busca encontrar na parte experimental desse trabalho foram dois pontos de potência específicos: um ponto de potência mínimo, onde a partir dessa potência foram apresentadas lentes de solda com uma resistência a tração mínima e um ponto de potência máximo, a partir da qual já não é possível ter uma solda confiável, devido à corrosão superficial, poros na lente de solda e expulsão de material.

A Equação 1 e a Equação 4, apresentam a equação de potência relacionando os parâmetros listados no item 4.2.1. A corrente é diretamente proporcional à potência de soldagem, já a força é inversamente proporcional. Por esse motivo, para uma potência mínima de soldagem é utilizada a máxima força. O mesmo é feito ao contrário.

5.1.1 Faixa de trabalho para eletrodos sem revestimento

Conforme foi explanado no procedimento experimental, item 4.2, dos 100 corpos de prova soldados, 50 foram soldados com eletrodos comumente usados, sem revestimento de cromo. Destes, foram selecionados 14 que foram aprovados nos testes metalográfico e de corrosão e melhor representaria a faixa de trabalho que foi testada. Os dados desses corpos de prova estão na Tabela 8 e Tabela 9. Como são realizadas ao mesmo tempo duas soldagens em série, conforme explicado no item 3.2.1, foi feita a média das duas lentes de

solda e essa média considerada na Tabela 8. Todos os destes descritos foram realizados nos laboratórios da INB.

Tabela 8: Parâmetros utilizados e resultados da área da lente de solda na metalografia, para corpos de provas soldados com eletrodos sem revestimento.

Tipo de Potência	Número Sequencial do Corpo de Prova	Corrente [kA]	Força [N]	Situação Metalografia	Área [mm ²] da Lente de Solda
Mínima	SRMI07	2,99	521	Aprovado	1,01
	SRMI17	3,08	497	Aprovado	1,35
	SRMI79	2,96	483	Aprovado	1,13
	SRMI80	3,03	483	Aprovado	1,11
	SRMI97	3,18	498	Aprovado	1,29
Máxima	SRMA09	3,71	389	Aprovado	1,56
	SRMA10	3,82	383	Aprovado	1,76
	SRMA71	3,83	398	Aprovado	1,79
	SRMA72	3,88	391	Aprovado	1,82
	SRMA73	3,89	390	Aprovado	1,94

Tabela 9: Parâmetros utilizados e resultados de Corrosão, para corpos de provas soldados com eletrodos sem revestimento.

Tipo de Potência	Número Sequencial do CP	Corrente [kA]	Força [N]	Situação Corrosão
Mínima	SRMI04	2,71	516	Aprovado
	SRMI08	3,04	518	Aprovado
Máxima	SRMA70	3,79	391	Aprovado
	SRMA95	3,78	386	Aprovado

A Figura 34 apresenta a metalografia do corpo de prova soldado com eletrodo comum, sem revestimento de cromo, no ponto de energia mínima.

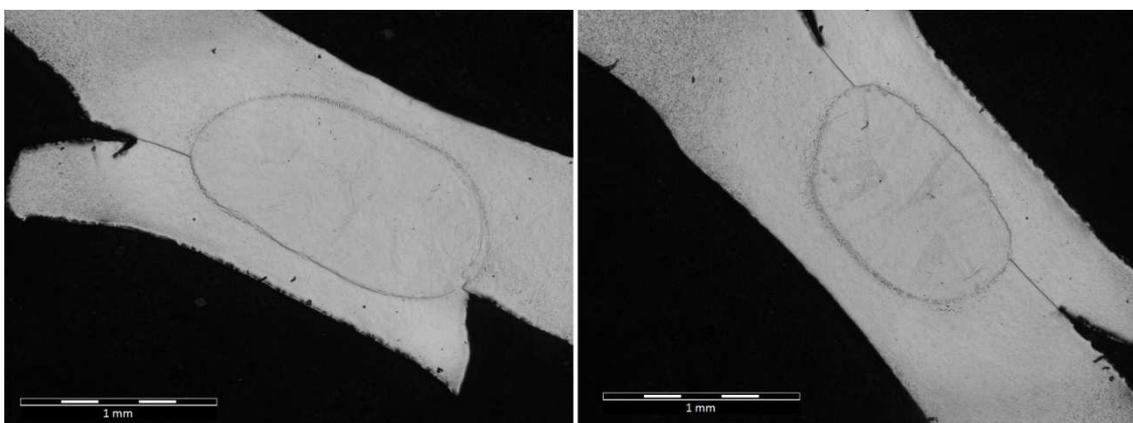


Figura 34: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova SRMI07.

A Figura 35 apresenta a metalografia do corpo de prova soldado com eletrodo comum, sem revestimento de cromo, no ponto de energia máximo.

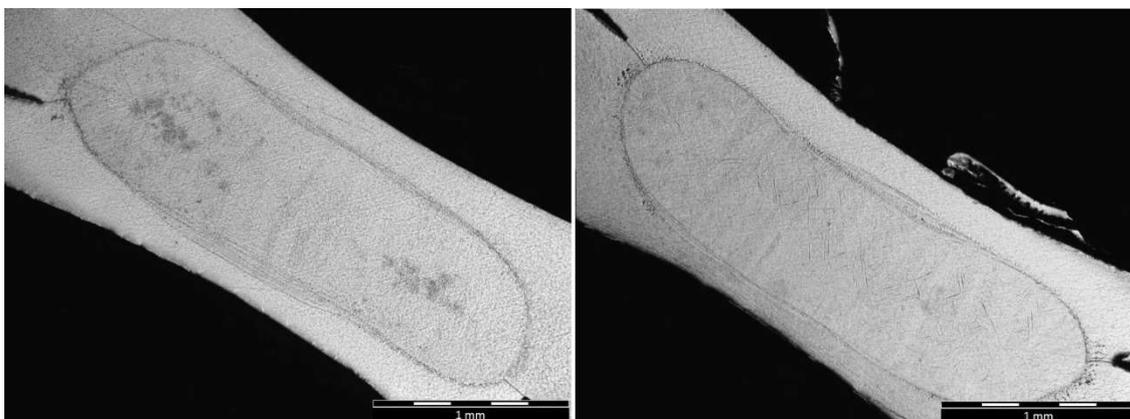


Figura 35: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova SRMA72.

Com esses dados foi possível montar a faixa de trabalho utilizando os valores médios da corrente de soldagem testada e utilizando a faixa pré-selecionada de força de compressão.

Tabela 10: Faixa de Trabalho para soldagem com eletrodos de soldagem sem revestimento.

Parâmetros	Corrente [kA]	Força [N]
Mínimo	3,00	500
Máximo	3,81	400

5.1.2 Faixa de trabalho para eletrodos com revestimento de cromo

Conforme foi realizado no item anterior, 50 corpos de prova foram soldados com eletrodos com revestimento de cromo. Destes, foram selecionados 14 que foram aprovados nos testes metalográfico e de corrosão e melhor representaria a faixa de trabalho que foi testada. Os dados desses corpos de prova estão na Tabela 11 e Tabela 12. Para o cálculo da área da seção transversal da lente de solda foi utilizado o programa de análise de imagens, ImageJ, como realizado no item anterior. A média das duas lentes de solda e essa média considerada na Tabela 11. Todos os destes descritos foram realizados nos laboratórios da INB.

Tabela 11: Parâmetros utilizados e resultados da área da lente de solda na metalografia, para corpos de provas soldados com eletrodos com revestimento de cromo.

Tipo de Potência	Número Sequencial do Corpo de Prova	Corrente [kA]	Força [N]	Situação Metalografia	Área [mm ²] da Lente de Solda
Mínima	RCMI26	2,88	505	Aprovado	1,22
	RCMI27	2,85	502	Aprovado	1,18
	RCMI28	2,88	505	Aprovado	1,22
	RCMI29	2,88	509	Aprovado	1,17
	RCMI30	2,99	509	Aprovado	1,12
Máxima	RCMA36	4,42	388	Aprovado	2,04
	RCMA37	4,55	385	Aprovado	2,03
	RCMA38	4,38	394	Aprovado	1,95
	RCMA39	4,34	394	Aprovado	2,03
	RCMA40	4,10	401	Aprovado	2,00

Tabela 12: Parâmetros utilizados e resultados de Corrosão, para corpos de provas soldados com eletrodos com revestimento de cromo.

Tipo de Potência	Número Sequencial do CP	Corrente [kA]	Força [N]	Situação Corrosão
Mínima	RCMI31	2,94	509	Aprovado
	RCMI32	2,95	512	Aprovado
Máxima	RCMA41	4,14	392	Aprovado
	RCMA42	4,26	391	Aprovado

A Figura 36 apresenta a metalografia do corpo de prova soldado com eletrodo com revestimento de cromo, no ponto de energia mínima.

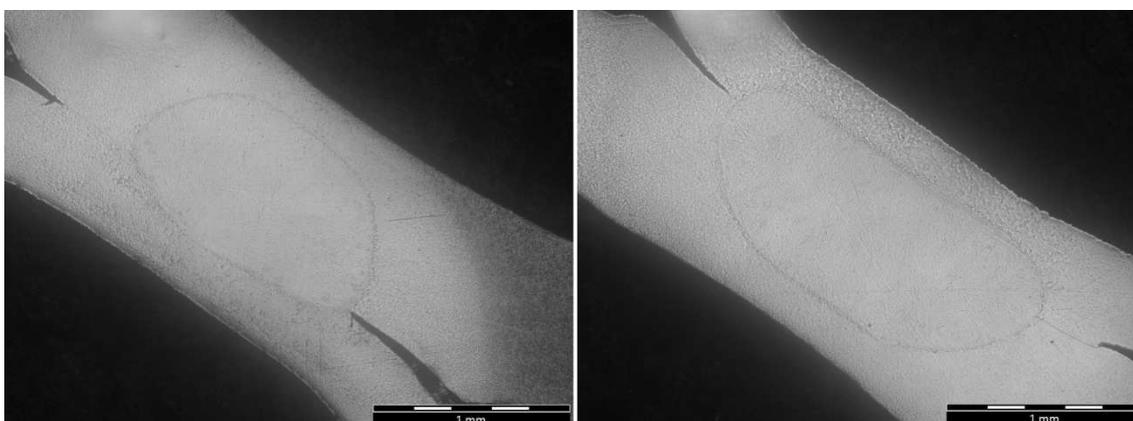


Figura 36: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova RCM126.

A Figura 37 apresenta a metalografia do corpo de prova soldado com eletrodo com revestimento de cromo, no ponto de energia máximo.

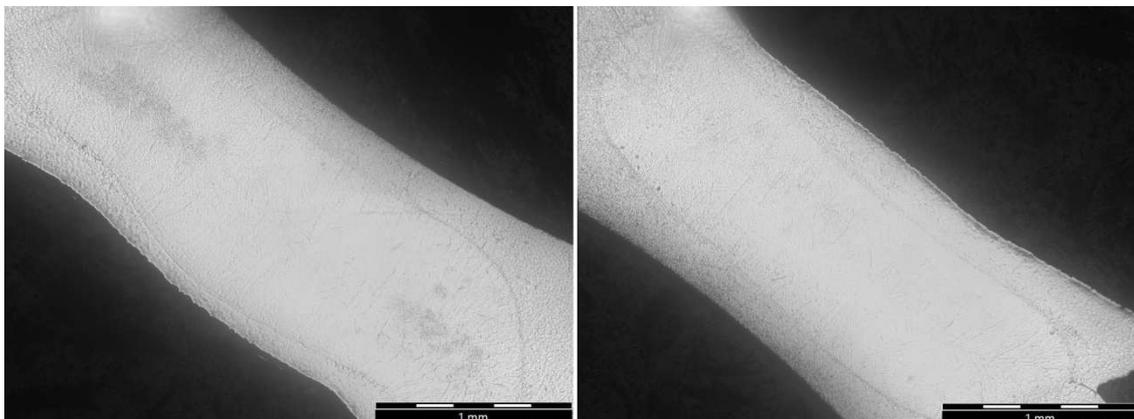


Figura 37: Macrografia das duas lentes de solda do corpo de Prova RCMA36.

Com esses dados foi possível montar a faixa de trabalho utilizando os valores médios da corrente de soldagem testada e utilizando a faixa pré-selecionada de força de compressão.

Tabela 13: Faixa de Trabalho para soldagem com eletrodos de soldagem com revestimento de cromo.

Parâmetros	Corrente [kA]	Força [N]
Mínimo	2,91	500
Máximo	4,31	400

5.1.3 Comparação entre faixas de trabalho.

A faixa de força desse experimento não teve uma variação efetiva uma vez que foi pré-fixado, porém a força sofre variações devido a diferenças na geometria do material, e isso não foi levado em consideração. Em ambos os casos, foi considerado uma faixa de força de compressão de 400 a 500 N. Com esses valores fixados podemos analisar um aumento da faixa de trabalho observando somente a faixa de corrente.

A variação da corrente foi significativa ao se comparar a faixa de trabalho em ambos os casos. Nas soldagens com os eletrodos sem revestimento, conforme Tabela 10, a faixa foi de 3,00 a 3,81 kA, resultando assim em um intervalo de 0,81 kA. A faixa de corrente nos eletrodos com revestimento de cromo duro

No ponto de energia máxima o aumento da temperatura na superfície eletrodo / chapa seria suportado pelo cromo, que tem um ponto de fusão maior e não houve desprendimento do cobre, o que permitiu uma corrente maior sem a ocorrência de corrosão superficial nos corpos de prova. O aumento da corrente dos eletrodos cromados não está relacionado à necessidade de um aporte maior de energia para “vencer” a camada de cromo e sim a um aumento de volume da lente de solda.

Isso já foi comprovado no ponto de energia mínimo quando praticamente a mesma corrente gerou praticamente a mesma área média. Além disso, quando os corpos de provas foram soldados com eletrodos sem revestimento, a média das áreas era de 1,774 mm² passando para 2,010 mm² quando soldados com eletrodos com revestimento. Isto representou um aumento de 11,7% no volume da lente de solda, comprovando que o aumento de corrente resultou em aumento de volume da lente de solda. Esse aumento também melhora a resistência da solda.

De posse da Equação 1 e da Equação 7, foi desenvolvido uma equação da energia na região de soldagem em função da corrente e a força, que foram os parâmetros que possuíram variação nesse estudo. Essa Equação 14, escrita em termos da força e corrente permite comparar as diversas soldas em relação à energia utilizada. Sendo que todos os parâmetros na Equação 15 foram constantes, C também será uma constante.

$$E = \frac{I^2}{F^{1/2}} C \quad (14)$$

Onde:

$$C = 0,89 \rho_m \Delta t (nH)^{1/2} \quad (15)$$

Utilizando a Equação 14, é possível comparar o aumento da energia de soldagem com o aumento da área da seção transversal da lente de solda, conforme Figura 39. Utilizando os eletrodos de soldagem revestidos, ocorreu uma maior área de solda no ponto de energia máxima. Isso ocorreu porque foi

possível aplicar uma maior energia na soldagem devido à proteção concedida pela camada de cromo na superfície.

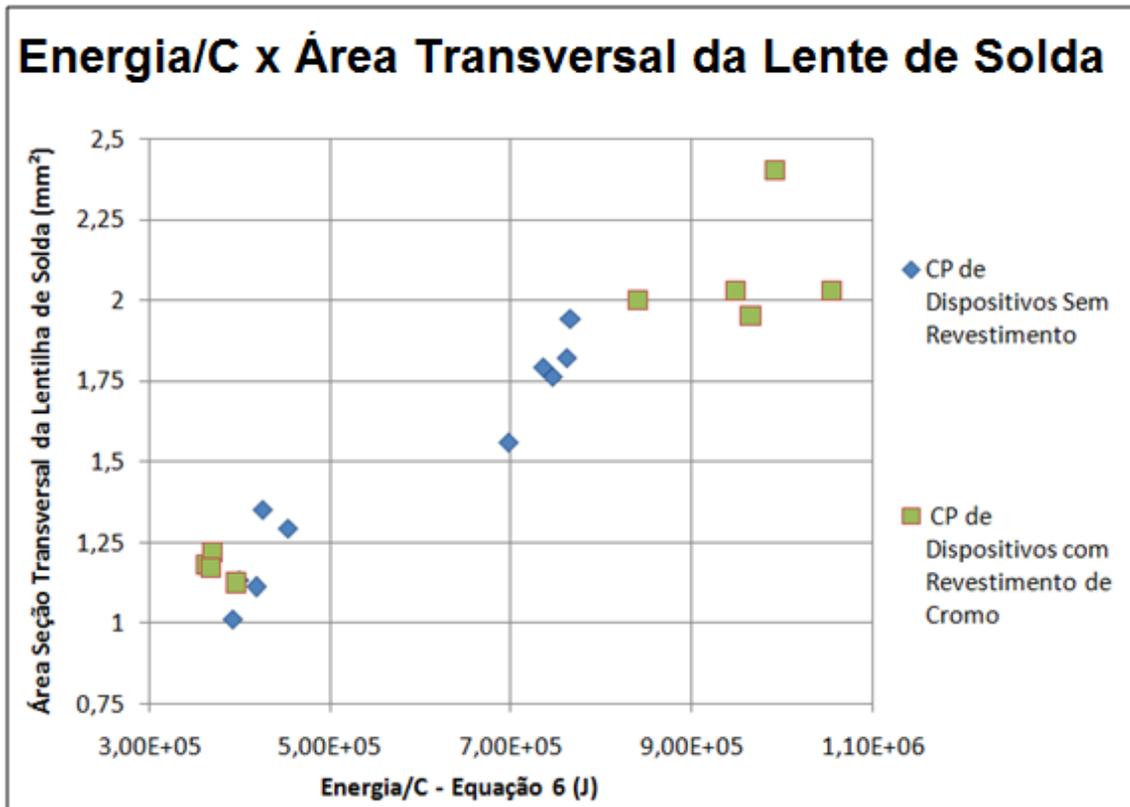


Figura 39: Gráfico da Energia x Área da Seção transversal da Lente de Solda.

De posse dos valores de energia máxima e mínima e da área da secção transversal, é possível fazer uma comparação com a faixa de trabalho que foi apresentado na Figura 38. Fazendo uma alteração na Equação 14 para representar uma curva de corrente em função da força e energia, tem-se a Equação 16:

$$I = \left(\frac{E}{C} \cdot F^{1/2} \right)^{1/2} \quad (16)$$

As curvas de energia estão apresentadas na Figura 40 sendo representadas pelo valor da área transversal da lente de solda correspondente. Com essa figura pode se verificar que a faixa de corrente x força percorreu uma área mínima, que é o limite para os ensaios de tração até uma área máxima que é limitada pelos ensaios de corrosão.

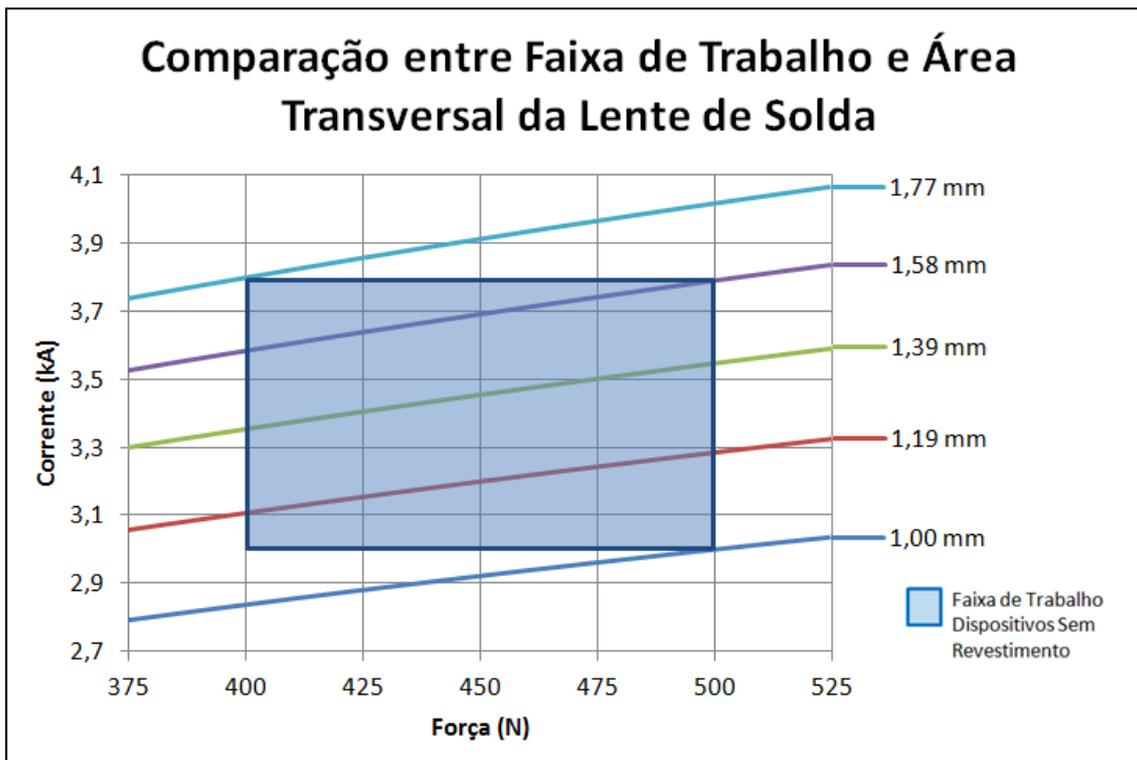


Figura 40: Faixa de Trabalho x Área da Seção transversal da Lente de Solda.

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional teve dois objetivos principais: o primeiro objetivo era apresentar a distribuição de temperatura da região soldada, com isso também saber a temperatura que está sendo suportada na superfície do eletrodo. O segundo objetivo, que foi alcançado a partir do primeiro, é verificar o tamanho da região soldada é permitir uma predição do tamanho da lente de solda.

Através do equacionamento descrito no item 4.4 e uma simulação estruturada sobre o MATLAB® a varredura em três dimensões e com o volume de controle conforme ilustrado na Figura 33B, a simulação computacional apresentou gráficos da distribuição da temperatura ao centro da lente de solda durante o processo de solda com todos os eletrodos envolvidos.

5.2.1 Distribuição térmica e região fundida

Depois de realizados todas as etapas experimentais do trabalho, foram utilizados os parâmetros de corrente e força contidos na Tabela 8 e na Tabela 9 como entrada da simulação computacional. Utilizando se da metodologia já descrita neste trabalho, foi possível encontrar a distribuição de temperatura no

plano central da lente de solda, que apresenta essa distribuição de temperatura utilizando cores conforme legenda em uma região de 6x6 mm.

Para determinar área da região fundida a partir das temperaturas apresentadas na parte A foi inferido que temperaturas iguais ou maiores que a temperatura de fusão do Zircônio determinaria a geometria e a área da lente de solda, conforme região vermelha da parte C da Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44. A área simulada foi comparada com a respectiva macrografia (Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37) em relação à área e geometria.

A Figura 41 mostra este processo descrito para uma soldagem realizada no ponto de energia mínima e a Figura 42 no ponto de energia máxima em eletrodos sem revestimento. Já a Figura 43 e Figura 44 são para a energia mínima e máxima, respectivamente, para soldagens realizadas com eletrodos com revestimento. Não serão apresentados todos os gráficos gerados na simulação para cada corpo de prova, pois os gráficos foram demasiadamente parecidos, alterando muito pouco a cor que infere a temperatura na região. Porém serão apresentadas, nos tópicos a seguir, tabelas informando dados de temperatura na superfície de contato na superfície do eletrodo e mandril, que foram o objetivo desse trabalho. Também foram apresentados gráficos de comparação da área fundida simulada, parte B da Figura 41 a Figura 44, com a área da lente obtida através da análise micrográfica.

Interessante observar que a ocorre um pico de temperatura próximo de 2300°C no centro da lente de solda. Esta temperatura é instantânea no instante de maior aquecimento imediatamente antes do fim de aporte de corrente. Essa temperatura não é mantida em todo tempo de aplicação de corrente.

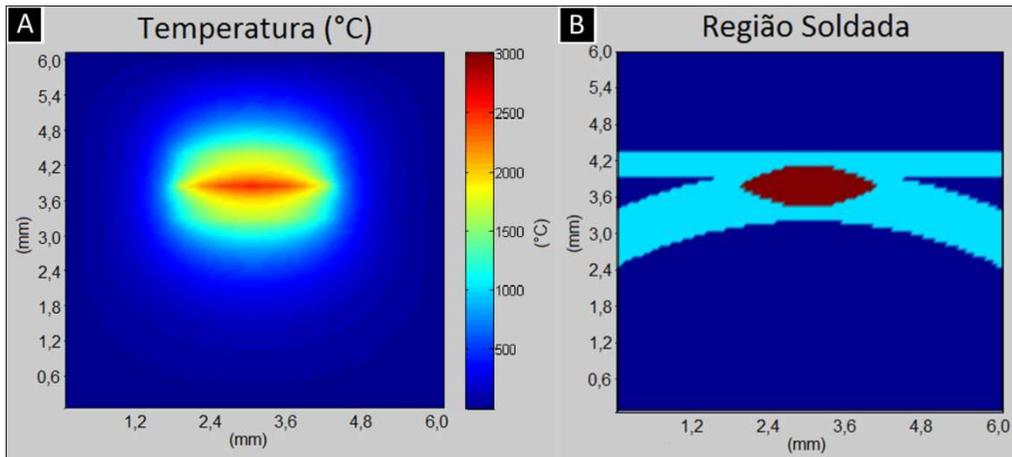


Figura 41: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMI07, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMI07.

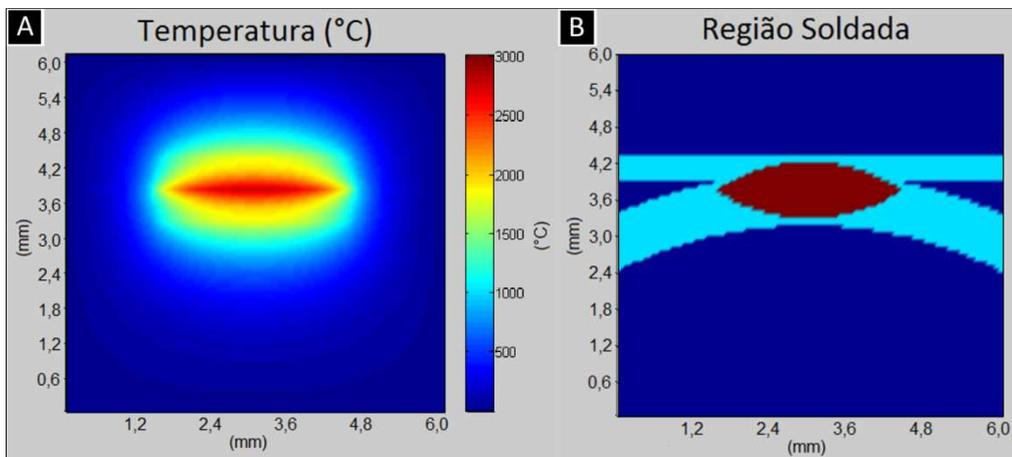


Figura 42: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do SRMA72, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do SRMA72.

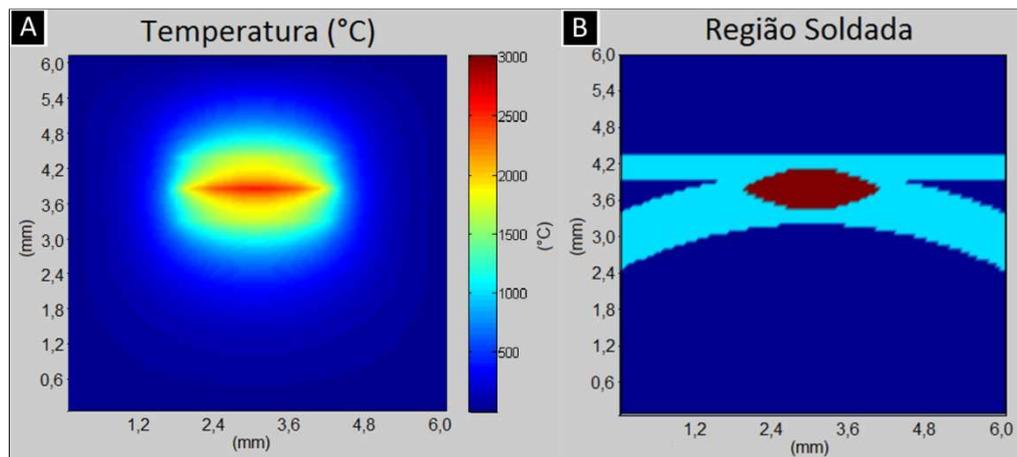


Figura 43: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do RCMI26, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do RCMI26.

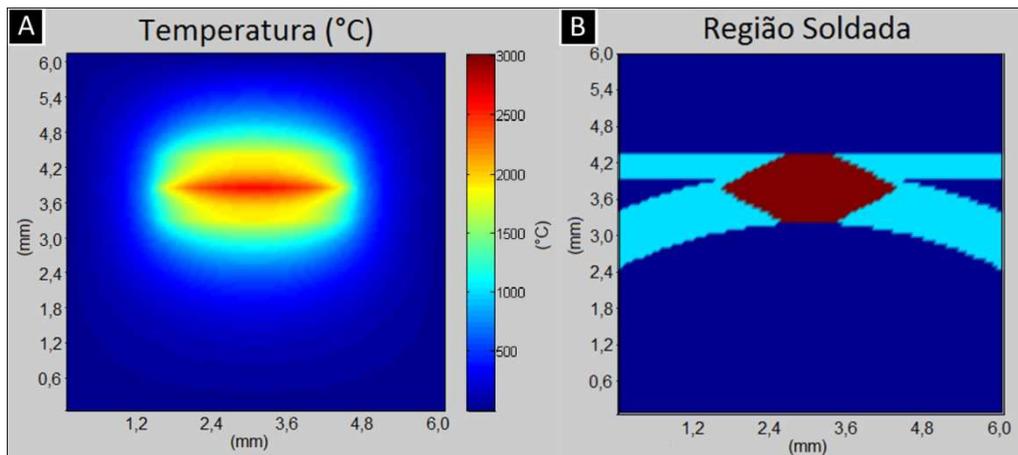


Figura 44: A - Distribuição de temperatura (°C) com os parâmetros do RCMA36, B – Área Fundida (em vermelho) formando a lente de solda, utilizando a distribuição de temperatura do RCMA36.

5.2.2 Simulado x experimental

Com o procedimento de simulação realizado para todas as 20 macrografias descritas Tabela 8 e na Tabela 9 e a geometria simulada da região soldada de todas elas foram comparadas com as respectivas imagens micrográficas.

A área da região vermelha (simulado) na Figura 41B e demais, foi comparada com as áreas que foram obtidas das macrografias utilizando o ImageJ® (experimental). A Figura 45 apresenta essa comparação para os corpos de prova soldados com eletrodos sem revestimento. Os dados experimentais (em verde) apresentam uma barra de erro devido à incerteza da medição. Pode-se observar que os valores das áreas encontrados na simulação se apresentam próximos dos obtidos experimentalmente.

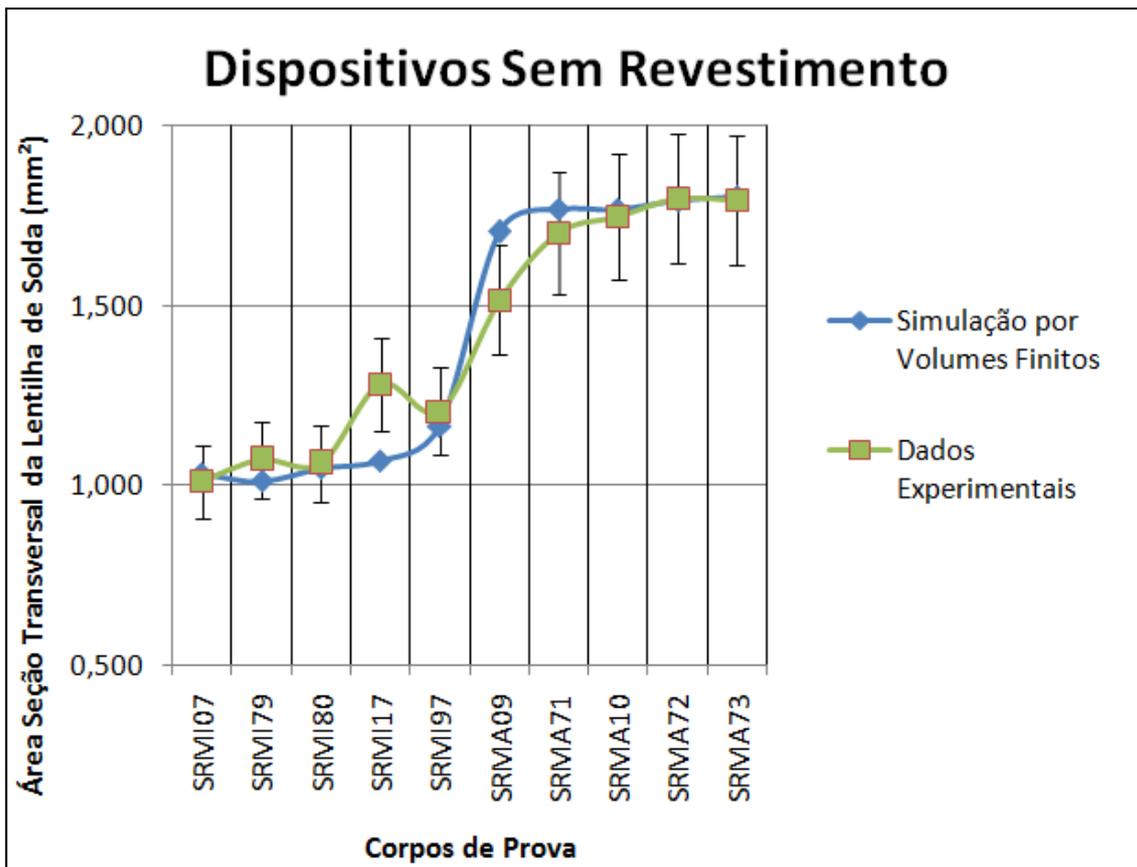


Figura 45: Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas macrografias em eletrodos e mandris sem revestimento.

O mesmo procedimento foi feito para os eletrodos de soldagem com revestimento de Cromo. A Figura 46 apresenta essa comparação. Como no gráfico anterior, os dados experimentais (em verde) apresentam uma barra de erro devido à incerteza da medição. Pode-se observar que neste caso os valores das áreas encontrados na simulação também se apresentam próximos dos obtidos experimentalmente.

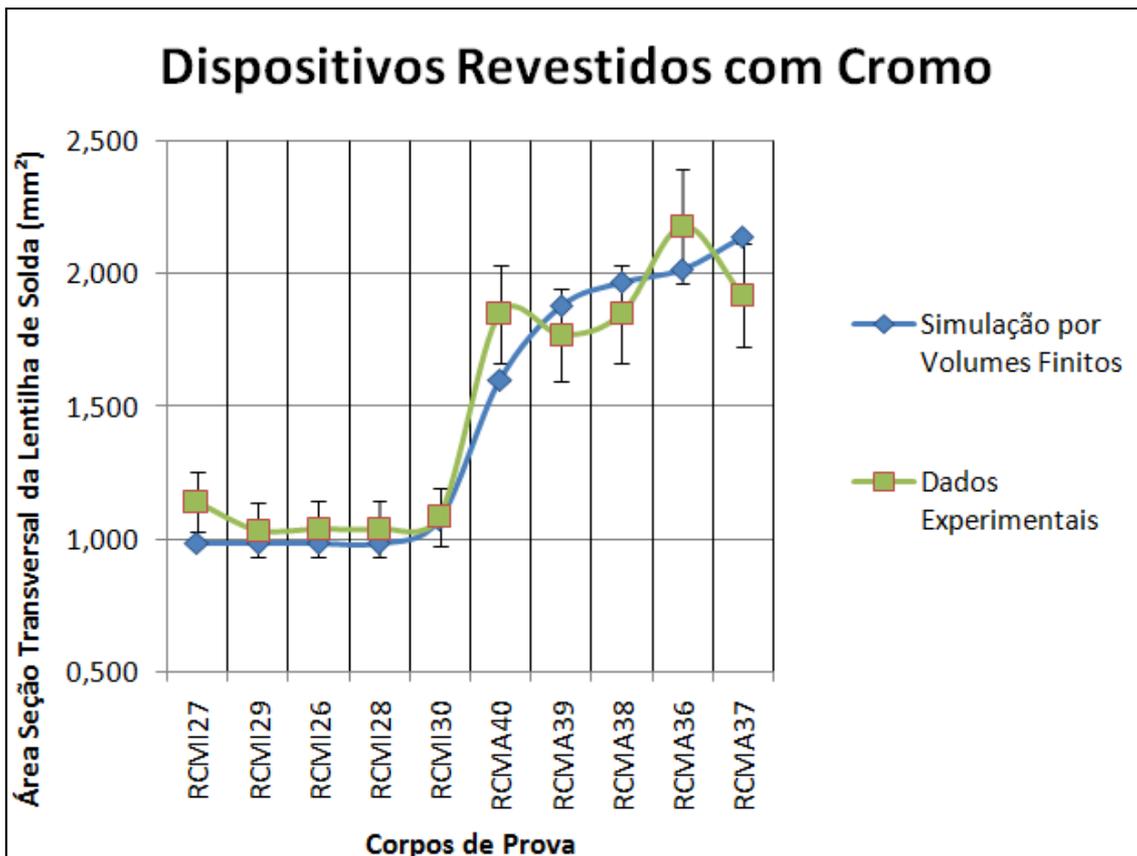


Figura 46: Resultados da Simulação em comparação as áreas obtidas nas macrografias em eletrodos e mandris com revestimento de cromo duro.

5.2.3 Temperatura Na Região De Contato

Em outra parte da simulação computacional (Figura 41A) foi possível visualizar a distribuição de temperatura na região termicamente afetada da solda. Essa distribuição foi utilizada para analisar a temperatura na área de contato com o eletrodo e mandril para avaliar possíveis danos aos mesmos. As temperaturas nos contatos com os eletrodos de soldagem sem revestimento foram informadas na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados das temperaturas de superfícies do eletrodo e mandril sem revestimento, obtidos por simulação computacional.

Tipo de Potência	Número Sequencial do CP	Temperatura na Superfície do eletrodo (°C)	Temperatura na Superfície do mandril (°C)
Mínima	SRMI07	1716	1562
	SRMI17	1753	1602
	SRMI79	1716	1563
	SRMI80	1740	1589
	SRMI97	1786	1638
Máxima	SRMA09	1812	1658
	SRMA10	1833	1684
	SRMA71	1831	1681
	SRMA72	1843	1694
	SRMA73	1845	1697

Também foram obtidas as temperaturas na superfície do eletrodo e mandris revestidos de cromo. Essas temperaturas estão descritas na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados das temperaturas de superfícies do eletrodo e mandril com revestimento de cromo, obtidos por simulação computacional.

Tipo de Potência	Número Sequencial do CP	Temperatura na Superfície do eletrodo (°C)	Temperatura na Superfície do mandril (°C)
Mínima	RCMI26	1746	1594
	RCMI27	1737	1583
	RCMI28	1746	1594
	RCMI29	1745	1592
	RCMI30	1784	1634
Máxima	RCMA36	1854	1763
	RCMA37	1860	1779
	RCMA38	1852	1756
	RCMA39	1820	1750
	RCMA40	1830	1692

Analisando a Tabela 14 e a Tabela 15, a temperatura no ponto de energia mínima foi aproximadamente à mesma para eletrodos revestidos e sem revestimento. Na superfície do eletrodo sem revestimento a temperatura alcançou a média de 1742°C enquanto nos eletrodos revestidos de cromo

chegou a 1751°C. Já no mandril de soldagem sem revestimento a temperatura alcançou a média de 1590°C e no revestido 1599°C. Essa temperatura um pouco maior se explica pela adição da resistência de camada de revestimento, devido à condutividade elétrica do cromo, Equação 5, que gera um aquecimento maior na superfície da superfície cromada.

No ponto de energia máxima, os valores de temperatura aumentaram praticamente na mesma proporção. O eletrodo sem revestimento alcançou a uma temperatura média de 1832°C, já o eletrodo revestido alcançou a temperatura média de 1843°C. O mandril de soldagem sem revestimento chegou à média de 1682°C e o revestido chegou a 1748°C. Houve um aumento maior na temperatura no mandril do que ao comparado ao ponto de energia mínima, porém nesse caso não havia somente a influência da camada de revestimento: a soldagem foi realizada com níveis de potência maiores para uma ampliação da faixa de trabalho, e conseqüente aumento do tamanho da lente.

A temperatura na superfície do eletrodo chegou à temperatura esperada de fusão do cobre em ambos os casos. Mas isso não fez com que o cobre se fundisse. Isso se explica pela quantidade de energia necessária para troca de fase do cobre sólido para líquido. A temperatura foi alcançada mais a troca térmica do cobre com o ambiente dissipou a temperatura para o ambiente e a região não conseguiu absorver a energia térmica suficiente para troca de fase.

Já como e no caso do mandril de soldagem, não existe uma região de dissipação com o ambiente grande para dissipar esse calor. Por isso esse aumento maior de temperatura na superfície do mandril de soldagem revestido, que além do revestimento, resistiu a uma potência de soldagem maior do que resistiu o mandril sem revestimento. De qualquer maneira, a temperatura de fusão do cobre não foi atingida, e não houve desprendimento de material do mandril de soldagem.

A corrosão ocorre quando há desprendimento de material do eletrodo no corpo de prova. Nos casos testados não houve corrosão, conforme Tabela 9 e Tabela 12, então pode se dizer que o aumento de energia, ilustrado na Figura 39, foi

possível porque o cromo protegeu o eletrodo e mandril. Em suma, o revestimento de cromo nos eletrodos permite a utilização de uma energia maior na região da solda sem que ocorra corrosão.

6 CONCLUSÕES

Os resultados que foram obtidos nos experimentos e na simulação presentes neste trabalho podem, de maneira relevante, auxiliar a compreender de maneira mais aprofundada o processo de soldagem a ponto em ligas de zircônio de estruturas de combustíveis nucleares.

Comparando as faixas de trabalho dos eletrodos sem revestimento com os eletrodos cromados, os últimos, obtiveram um aumento de 42% na largura da faixa.

Esse aumento na faixa de trabalho se deu principalmente no ponto de energia máxima, pois a camada de cromo no eletrodo protege-o do desgaste do calor, assim diminui a corrosão devida aderência de cobre na amostra, podendo assim realizar soldagens com uma energia de soldagem maior do que era soldado com os eletrodos sem revestimento. Esse aumento de energia no ponto máximo fez com que a área média da seção transversal da lente de solda nesse ponto aumentasse de 1,774 mm² para 2,010 mm², um aumento de 11,7% na área transversal da lente de solda.

A Simulação Computacional que foi realizada para o processo de solda a ponto por resistência elétrica, se mostrou uma ferramenta poderosa para identificar os campos de temperatura durante o processo de soldagem. Analisando o ciclo térmico resultante da simulação foi possível identificar um pequeno aumento de

temperatura na região de contato dos eletrodos para os eletrodos com revestimento de cromo. Isso é explicado pela resistência devido à camada de revestimento que acentua o aquecimento nesta região.

A comparação entre área da seção transversal da lente de solda obtida experimentalmente com a simulada teve um desvio pequeno e assim pode ser usado no futuro como uma ferramenta para predição de tamanho de lente, caso haja a necessidade de troca do material da amostra ou modificação dos parâmetros de soldagem.

A inclusão de uma camada de cromo apresentou-se como uma maneira de proteção dos eletrodos. Também permitiu uma ampliação na faixa de trabalho.

7 TRABALHOS FUTUROS

Os eletrodos comumente usados para a soldagem de ligas de zircônio têm uma vida útil muito curta, em torno de 400 pontos. Trabalhos futuros poderão comparar a vida útil dos eletrodos sem revestimento e com revestimento de cromo devido à proteção concedida pelo cromo ao eletrodo. Também pode ser avaliada a aplicação deste tipo de revestimento a eletrodos de soldagem de aços carbonos, na linha automobilística, ou aços inoxidáveis que é utilizado em outros tipos de combustíveis nucleares.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Agashe, S.; Zhang, H. **Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding**. Welding Journal, Jul. 2003, p. 179 S – 183S.

[2] Eagar, T. W. **Resistance Welding: A fast, Inexpensive and Deceptively Simple Process**. 3rd International Conference on Trends in Welding Research. Gatlinburg, Tennessee, USA: June 1992, p 341 – 351.

[3] Metals Handbook (1983). Vol. 6: **Welding, Brazing and Soldering**. Ninth Edition. AMS: American Society for Metal. Metal Park, Ohio 44073, U.S.A.

[4] Machado, I. G. (1996). **Soldagem & Técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre, 477p.

[5] German Institute for Standardisation. **DIN 1910: Welding; concepts, classification of welding processes**. 1997.

[6] Baldim, A. C. **Influência da Energia de Soldagem do Processo RSW sobre as Propriedades Magnéticas e Tensões Residuais no Aço AISI 444**. Soldagem e Inspeção. São Paulo, Vol. 23, Nº:1 p 43-51, 2018

[7] Ziedas, S; Tatini, I. **Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem**. São Paulo: SENAI, 1957.

[8] Joanes, S. D. **Uma Metodologia para Otimização de Parâmetros de Soldagem Através de Solda por Resistência Aplicada em Chapas de Aço InterstitialFree – IF**, CEFET/RJ, 2011.

[9] Branco, H. L. O. **Análise do desgaste de capas de eletrodos de solda ponto e sua influência na qualidade da soldagem de chapas automotivas galvanizadas**. Soldagem e Inspeção São Paulo, Vol. 17, Nº. 4, p.347-355, Out/Dez 2012

- [10] Aures, J. E. V., “**Estudo da Formação, Geometria, e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, 2006.
- [11] Kuper, A.B., et al. **Diffusion in ordered and disordered Copper – Zinc**. American Physical Society, College Park, Maryland, 1956;104:1536 – 1541.
- [12] AWS (1998). **Welding Handbook. Vol. 2: Welding Process**, 8º ed. InternationalStandard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeuneRd., P.O. Box 351040, Miami, FL 33135.
- [13] Braunovic, M.; Konchits, V.V.; Myshkin N. K. **Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology**. 2006. Taylor & Francis Group, LLC
- [14] Houlcroft, P. T. (1979). **Welding process tecnologia**. (ed) Cambridge University Press, New York, E.U.A., 313 p.
- [15] Furlanetto, V. **Proposta e validação experimental de um modelo para máquina de solda a ponto CA**. USP, 2005. 88 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.,
- [16] Nakamura, M., **Constriction resistance of conducting spots by the boundary element method**, IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, CHMT, 16, 339–344, 1993.
- [17] Holm, R., **Electrical Contacts**, Springer, New York, 1979.
- [18] Timsit, R. S., **Electrical contact resistance: Fundamental principles, In Electrical Contacts:Principles and Applications**, Slade, P. G., Ed., Marcel Dekker, New York, pp. 1–88, 1999.
- [19] Nakamura, M. and Minowa, I., **Film resistance and constriction effect of current in a contact interface**, IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 12, 109–114, 1989.
- [20] Tan, W.; Zhou, Y; Kerr, H. W. e Lawson, S. (2004) “**A study of dynamic resistance during small scale resistance spot welding of thin Ni sheets**”. J. Phys. D: Appl. Phys. 37, pp. 1998–2008.
- [21] Gruenzel, R. **Solda por Resistência com Média Freqüência: Benefícios e Campos deAplicação**. Congresso Nacional de Soldagem, 30. 2004, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro: ABS, 2004. p.1-13.
- [22] Nascimento, V. C., **Seleção De Parâmetros De Soldagem A Ponto Por Resistência, Baseado Na Medição Da Resistência Elétrica Entre Chapas**,Dissertação De Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

- [23] **Máquina de Solda Estacionária.** Weldtronic. Disponível em:
<<http://weldtronic.com.br/maquina-de-solda-estacionaria>>. Acesso em 04 de setembro de 2018.
- [24] Branco, H. L. O. **Avaliação de Capas de Eletrodos Utilizadas na Soldagem por Resistência de Chapas Galvanizadas Automotivas.** Dissertação De Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [25] **Robô de solda,** Soluções Industriais. Disponível em:
<<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/metal-mecanica-e-usinagem/gsk-do-brasil-/produtos/maquinas-ferramenta/robo-de-solda>>. Acesso em 04 de setembro de 2018.
- [26] Intermachinery Comércio Ltda. **I Seminário de Solda a Ponto.** São Paulo: 2003,CD-ROM.
- [27]**Apostila de Solda Bam. Tecnologia em Solda por Resistência.**BAM SOLDAS. Disponível em
<<http://www.bamsoldas.com.br/informativos/cursodesolda.pdf>>.Acessada em 25 de janeiro de 2018.
- [28] Craggs, J., **NippertPresentation.** 2002, CD-ROM.
- [29] Santos, F.B. **Estudo da Eficiência do Processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica Utilizado na Indústria Automobilística**Dissertação De Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.
- [30] Wainer, E., Brandi, S. D., de Mello, F. D. H., (1992). **SOLDAGEM, processos e metalurgia.**(ed) Editora Edgard Blucher Ltda. pp 217 – 242.
- [31] Holliday, R., Parker, J. D. e Williams, N. T. (1995). “**Electrode deformation when spot welding coated steels.**” *Welding in the World.* Vol. 15, Nº 3, pp. 160-164.
- [32] RWMA (1989). **Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturing Association.**U.S.A., 4th Ed., Nov., 443 p.
- [33] Gedeon, S. A., Sorensen, C. D., Ulrich, K. T. e Eagar, T. W. (1987). **Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds.***Welding Journal.* December, pp. 378-s – 385-s.
- [34] Reu Schweisstechnik GmbH – **Grundlagen der Widerstandsschweisstechnik.**Stuttgart, 1997
- [35] Chang, H. S. e Cho, H. S. (1990). “**A Study on the Shunt Effect in Resistance Spot Welding.**” *Welding Journal,* August, Vol. 69, Nº 8, pp. 308-s – 317-s.
- [36] Vargas, J. E. **Estudo da formação, geometria e Resistência do ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística.** 2006. 164f.

Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2006.

[37] Podržaj, P.; Kariž, Z. **The Influence of Welding Current Shape on Expulsion Occurrence during Resistance Spot Welding**. Conference on the Joining of Materials & International Conference on Education in Welding, 12. 2005, Helsingør. Anais Denamark: 2005. p.1-5.

[38] Fonseca, E. O. T.; Bracarense, A. Q. **Desenvolvimento de um Sistema para Monitoração da Resistência Dinâmica e da Força na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica**. Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 25., 1999, Belo Horizonte, Anais Belo Horizonte: ABS, 1999. p. 1-10.

[39] Kaiser, J. G. ; Dunn, G. J. ; Eagar, T. W. **The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding**. AWS Welding Research, 1982, USA. Anais USA: Supplement to the Welding Journal, 1982.

[40] Parma, R. S. (1995). **Welding Processes and Technology**.(ed) Khanna Publishers. Reprinter, pp. 322-358.

[41] Rivet, R. M. (1984). **“Simple monitoring devices for resistance welding.”** The Welding Institute Research Bulletin, March, pp. 74 – 78.

[42] Silva, M.B.F.D. **Balanço Mineral - Zircônio**.BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2001, pp. 19.

[43] ASTM, I., **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Metals HandBook, 1990.

[44] Verlinden, B. et al., **Thermo-mechanical processing of metallic materials**, Elsevier, 2007.

[45] Murty, K.L. E Charit, I., **Texture development and anisotropic deformation of zircalloys**, Progress in Nuclear Energy, v. 48, n. 4, pp. 325-359, 2006.

[46] Lelièvre, G., **Etude du rôle des précipités intermétalliques dans l'absorption d'hydrogène lors de la corrosion aqueuse d'alliages de zirconium**, 1998, Tese de D.Sc. Information Scientifique et Technique du CNRS, Université Joseph Fourier, Grenoble, França, 1998.

[47] Sen, D. et al., **Investigation on precipitation in Zircaloy-2 fuel cladding tube**, Journal of alloys and compounds, v. 308, n. 1, pp. 250-258, 2000.

[48] Ribeiro, R.M., **Interação Hidrogênio-Microestrutura em Ligas a Base de Zr-Nb para Aplicação em Reatores Nucleares**, 2014, Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

[49] Andrews, D. R. e Broomhead, J. (1975). **Quality Assurance for Resistance Spot Welding**. Welding Journal, June, Vol. 54, Nº 6, pp. 431 – 435.

- [50] Satonaka, S. e Matsuyama, K. (2000). **Review on Inspection Techniques for Spot Welds**. Welding in the World, Vol. 44, N° 3, pp. 29 – 36.
- [51] Needham, J. C. (1983). **Measurement of True Resistance at High Alternating Current (for resistance spot and seam welding, and for cables)**. The Welding Institute (TWI), Report n° 210/1983, April, 22p.
- [52] Callister, W. D. JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. LTC.7ª Ed. Rio de Janeiro. 2008.
- [53] Stocco, Danilo. **Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 2010.
- [54] Intermachinery. **Manual de Soldagem por Resistência a Ponto**, 41 p. 2002
- [55] Pamanes, Miguel Fernando Delgado. **Evaluación del Deterioro de los Electrodo al Incrementar el Número de Pulsos del Tiempo de Soldadura en Aceros IF y HSLA Galvanizados y la Afectación de las Propiedades Mecánicas en los Puntos de Soldadura**. Soldagem & Inspeção. 2016;21(4):469-482
- [56] Srinivasaraju, P (2013). **Temperature Distribution using RSW Process on Coupled Analysis Weld Nugget**. IJDETR Vol.02, Issue.19, Pages: 2342-2346
- [57] Molenda, Carlos Henrique de Andrade. **Simulação Numérica do Crescimento da Lente de Solda Obtida pelo Processo de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica no Aço Inox AISI 304**. Soldag. insp. Sao Paulo, Vol. 15, No. 4, p.307-316, Out/Dez 2010
- [58] **Copper-Cobalt-Beryllium alloy**. MatWeb Material Property Data. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84db99f39a0c4640a3536f9f13293cde>>. Acesso em 20 de janeiro de 2018.
- [59] **Chromium**. MatWeb Material Property Data. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=25ce9b7f40364cf79d54ed0db5c8e41f>>. Acesso em 20 de janeiro de 2018.
- [60] **Zircaloy-4 Zirconium Alloy**. MatWeb Material Property Data. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e36a9590eb5945de94d89a35097b7faa>>. Acesso em 20 de janeiro de 2018.
- [61] Xavier, Carlos Roberto; Delgado Junior, Horácio Guimarães ; Castro, José Adilson De ; Ferreira, Alexandre Furtado . **Numerical Predictions for the Thermal History, Microstructure and Hardness Distributions at the HAZ during Welding of Low Alloy Steels**. Materials Research, v. 19, p. 520-533, 2016.

[62] Patankar, Suhas V. (1980). **Numerical heat transfer and fluid flow (14. printing. ed.)**. Bristol, PA: Taylor & Francis.

ANEXO 1 – TABELA DE DADOS DOS CPS.

CP nº	Corrente [kA]	Força [N]	Tipo Energia	Tipo de Revestimento	Corrosão (Resultado)	Metalografia (Área)	Situação
1	2,79	484	MIN	CROMO		0,96	Lente Pequena
2	2,72	486	MIN	CROMO		1,05	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
3	2,88	506	MIN	CROMO	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
4	2,71	516	MIN	SEM	Aprovado		Utilizado na Faixa
5	2,96	523	MIN	SEM		0,77	Lente Pequena
6	2,95	521	MIN	SEM		0,85	Lente Pequena
7	2,99	521	MIN	SEM		1,01	Utilizado na Faixa
8	3,04	518	MIN	SEM	Aprovado		Utilizado na Faixa
9	3,71	389	MAX	SEM		1,56	Utilizado na Faixa
10	3,82	383	MAX	SEM		1,76	Utilizado na Faixa
11	3,82	387	MAX	SEM		1,80	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
12	3,62	395	MAX	SEM	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
13	3,97	389	MAX	SEM	Reprovado		Reprovado
14	3,74	390	MAX	SEM	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
15	3,71	391	MAX	SEM		1,50	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
16	3,85	403	MAX	SEM		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes
17	3,08	497	MIN	SEM		1,35	Utilizado na Faixa
18	3,13	505	MIN	CROMO		1,38	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
19	2,84	500	MIN	CROMO		1,06	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
20	2,88	507	MIN	CROMO		1,20	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
21	4,52	378	MAX	CROMO	Reprovado		Reprovado
22	4,01	395	MAX	CROMO	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
23	4,14	374	MAX	CROMO		1,95	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
24	4,32	399	MAX	CROMO		2,05	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
25	4,51	393	MAX	CROMO		2,13	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
26	2,88	505	MIN	CROMO		1,22	Utilizado na Faixa
27	2,85	502	MIN	CROMO		1,18	Utilizado na Faixa
28	2,88	505	MIN	CROMO		1,22	Utilizado na Faixa
29	2,88	509	MIN	CROMO		1,17	Utilizado na Faixa
30	2,99	509	MIN	CROMO		1,12	Utilizado na Faixa
31	2,94	509	MIN	CROMO	Aprovado		Utilizado na Faixa
32	2,95	512	MIN	CROMO	Aprovado		Utilizado na Faixa
33	2,91	513	MIN	CROMO		1,2	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
34	3,07	511	MIN	CROMO		1,32	Superior a faixa
35	3,02	513	MIN	CROMO		1,29	Superior a faixa
36	4,42	388	MAX	CROMO		2,04	Utilizado na Faixa
37	4,55	385	MAX	CROMO		2,03	Utilizado na Faixa
38	4,38	394	MAX	CROMO		1,95	Utilizado na Faixa
39	4,34	394	MAX	CROMO		2,03	Utilizado na Faixa
40	4,1	401	MAX	CROMO		2,00	Utilizado na Faixa
41	4,14	392	MAX	CROMO	Aprovado		Utilizado na Faixa
42	4,26	391	MAX	CROMO	Aprovado		Utilizado na Faixa
43	4,2	387	MAX	CROMO	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
44	4,32	390	MAX	CROMO		1,97	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
45	4,32	387	MAX	CROMO		1,9	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
46	2,85	518	MIN	SEM		0,93	Lente Pequena
47	2,87	526	MIN	SEM		0,69	Descartado, possível erro de corte
48	2,87	517	MIN	SEM		0,95	Lente Pequena
49	3,25	514	MIN	SEM	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
50	2,8	524	MIN	SEM	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes

CP nº	Corrente [kA]	Força [N]	Tipo Energia	Tipo de Revestimento	Corrosão (Resultado)	Metalografia (Area)	Situação
51	2,88	523	MIN	SEM	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
52	2,84	528	MIN	SEM		0,90	Lente Pequena
53	2,82	526	MIN	SEM		0,91	Lente Pequena
54	3,94	398	MAX	SEM		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
55	3,98	395	MAX	SEM		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
56	3,93	393	MAX	SEM		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
57	3,96	396	MAX	SEM		1,92	Superior ao resultado de corrosão - Não utilizado
58	3,95	401	MAX	SEM		1,92	Superior ao resultado de corrosão - Não utilizado
59	3,24	502	MIN	CROMO	Aprovado		Superior a faixa
60	2,88	506	MIN	CROMO	Aprovado		Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
61	4,14	374	MAX	CROMO		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes
62	4,32	399	MAX	CROMO		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes
63	4,51	393	MAX	CROMO		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
64	4,21	364	MAX	CROMO		2,03	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
65	4,16	369	MAX	CROMO		1,95	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
66	4,11	359	MAX	CROMO		1,9	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
67	3,97	358	MAX	CROMO		1,86	Inferior a faixa
68	3,77	365	MAX	CROMO		1,72	Inferior a faixa
69	3,87	362	MAX	CROMO		1,75	Inferior a faixa
70	3,79	391	MAX	SEM	Aprovado		Utilizado na Faixa
71	3,83	398	MAX	SEM		1,79	Utilizado na Faixa
72	3,88	391	MAX	SEM		1,82	Utilizado na Faixa
73	3,89	390	MAX	SEM		1,94	Utilizado na Faixa
74	2,79	508	MIN	SEM		0,81	Lente Pequena
75	2,95	503	MIN	SEM		0,95	Lente Pequena
76	2,75	508	MIN	SEM		0,64	Lente Pequena
77	2,67	509	MIN	SEM		0,71	Lente Pequena
78	2,77	506	MIN	SEM		0,86	Lente Pequena
79	2,96	483	MIN	SEM		1,13	Utilizado na Faixa
80	3,03	483	MIN	SEM		1,11	Utilizado na Faixa
81	2,72	499	MIN	SEM		0,92	Lente Pequena
82	2,77	501	MIN	SEM		0,95	Lente Pequena
83	3,2	505	MIN	SEM		1,3	Superior a faixa
84	3,25	520	MIN	CROMO		1,42	Superior a faixa
85	3,18	515	MIN	CROMO		1,3	Superior a faixa
86	3,35	521	MIN	CROMO		-	Superior a faixa - Não contabilizado área
87	3,3	519	MIN	CROMO		-	Superior a faixa - Não contabilizado área
88	3,21	517	MIN	CROMO		-	Superior a faixa - Não contabilizado área
89	3,1	526	MIN	CROMO		1,22	Superior a faixa
90	3,18	521	MIN	CROMO		-	Superior a faixa - Não contabilizado área
91	3,23	519	MAX	CROMO		-	Superior a faixa - Não contabilizado área
92	3,88	387	MAX	SEM		1,83	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
93	3,94	387	MAX	SEM		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes
94	3,96	392	MAX	SEM		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
95	3,78	386	MAX	SEM	Aprovado		Utilizado na Faixa
96	3,86	385	MAX	SEM		1,75	Possível, mas não utilizado por já ter quantidade de CP suficientes
97	3,18	498	MIN	SEM		1,29	Utilizado na Faixa
98	4,02	362	MAX	SEM		-	Superior ao resultado de corrosão - Não contabilizado área
99	3,91	353	MAX	SEM		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes
100	3,81	388	MAX	SEM		-	Não contabilizado área por já ter quantidade de CP suficientes