

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA DE CHAPAS DE AÇO REVESTIDAS COM COBRE, NIQUEL E OURO
EM ALUMÍNIO.**

por

Paulo Vinicius Faria

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2012.

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA DE CHAPAS DE AÇO REVESTIDAS COM COBRE, NIQUEL E OURO
EM CHAPAS DE ALUMÍNIO**

por

Paulo Vinicius Faria
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: **Processos de fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez.....PROMEC / UFRGS

Prof. Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro.....PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim.....DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Dezembro de 2012

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as dádivas recebidas.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Mazzaferro*, pela aplicação de sua experiência e conhecimentos e dedicação fornecidos que me auxiliaram na elaboração dessa dissertação;

À *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* que me disponibilizou estudo público gratuito e de qualidade durante estes anos de curso de Engenharia Mecânica;

A todos os profissionais com quem trabalhei e pela experiência que me passaram;

A minha esposa, Aline Schutz Moreira, por seu carinho e incentivo;

Agradeço aos meus pais, Paulo Roberto Faria e Maria Sá Faria, pela dedicação, orientação e amor;

E aos meus familiares, amigos e colegas, por toda a força e incentivo que me deram ao longo do curso.

FARIA, P. V. (2012), “INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE CHAPAS DE AÇO REVESTIDAS COM COBRE, NIQUEL E OURO EM CHAPAS DE ALUMÍNIO”. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RESUMO

Devido à crescente utilização de componentes eletrônicos nos veículos automotores, as exigências mecânicas nesses itens estão cada vez maiores. Nos primeiros veículos a eletrônica embarcada era inexistente, em meados do século passado, passou a ser pequena e utilizada somente para funções de funcionamento e pouco importantes para a segurança, e caso ocorresse alguma falha não havia risco de vida. Nos automóveis desenvolvidos nas últimas décadas, os componentes eletrônicos estão sendo utilizados em aplicações como controle de injeção de combustível, sistemas de tração e freios, direções elétricas e acionamento de *air bags*, que estão diretamente relacionadas à segurança.

Os requisitos de qualidade desses itens elevaram-se consideravelmente exigindo operação em temperaturas extremas e grandes acelerações. O processo de união mais eficiente para satisfazer aos requisitos mecânicos ainda é o de soldagem, mas há dificuldade em realizar as uniões sem danificar o componente ou prejudicar as propriedades elétricas em peças finas, da ordem de décimos de milímetros na espessura, com diferentes camadas de revestimento.

Este trabalho analisa o processo de soldagem em capacitores, utilizando uma fonte de soldagem por resistência do tipo inversora, estudando os parâmetros de operação necessários para realizar a união de uma chapa de aço com 0,6 mm de espessura recoberta com três camadas de diferentes materiais: cobre, níquel e superfície externa de ouro. Este componente deve ser soldado a uma peça de alumínio. A influência da corrente de soldagem, pressão dos eletrodos, tempo de aplicação da corrente e tempo de retenção sobre a qualidade da união, avaliada pela resistência à tração alcançada e capacidade de realizar a união sem dano aos componentes ou ocorrência de falhas na superfície, foi analisada utilizando projeto de experimentos (DOE). Os resultados experimentais comprovam a eficiência do processo para utilização neste tipo de componentes garantindo a qualidade da junta e do componente para o desempenho de sua função.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por resistência elétrica; Soldagem de materiais dissimilares, DOE.

FARIA, P. V. (2012) "**INFLUENCE OF PARAMETERS IN THE ELECTRICAL RESISTANCE WELDING OF STEEL PLATES COATED WITH COPPER, NICKEL AND GOLD IN ALUMINUM PLATES**". - Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ABSTRACT

Due to the increasing use of electronics in vehicles, the mechanical demands on these items are increasing. In the first vehicles onboard electronics was nonexistent in the middle of the last century, came to be used only for small, operating functions and unimportant to safety, and when there was a failure there was life threatening. In cars developed in recent decades, the electronic components are being used in applications such as fuel injection control, drive systems and brakes, directions and drive electric air bags, which are directly related to safety.

The quality requirements of these items rose considerably demanding operation at extreme temperatures and high accelerations. The joining process more efficient to meet the mechanical requirements is still welding, but there is difficulty in performing the joints without damaging the component or interfere with the electrical properties of thin pieces, exhibiting tenths of a millimeter in thickness of different coating layers.

This study examines the welding process in capacitors, using a inverter resistance welding power source, studying the operation parameters required to perform the joining of a steel plate 0.6 mm thick coated with three layers of different materials: a copper layer, a nickel layer and an external gold layer. This component must be welded to an aluminum plate. The influence of welding current, electrode pressure, time of current application and retention time on the quality of the union, as assessed by tensile resistance and ability to perform achieved union without damage to components or occurrence of any failures, was analyzed using design of experiments (DOE). The experimental results demonstrate the efficiency of the welding process in such components assuring the quality to perform its function.

KEYWORDS: Resistance welding, dissimilar weld joints, DOE.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	2
2.1	Processos de soldagem	2
2.1.1	Fundamentos do processo de soldagem por resistência elétrica.....	2
2.2	Fontes utilizadas para soldagem por resistência elétrica	3
2.2.1	Fontes de soldagem do tipo descarga capacitiva	4
2.2.1.1	Ciclo de soldagem de fontes do tipo descarga capacitiva	5
2.2.2	Fontes de soldagem inversoras de media frequência.....	6
2.2.2.1	Ciclo de soldagem em fontes inversoras	6
2.3	Eletrodos	9
2.3.1	Geometria dos eletrodos	11
2.3.2	Materiais dos eletrodos	12
2.3.3	Refrigeração dos eletrodos	13
2.4	Geração de calor em soldagem a ponto por resistência.....	14
2.5	Parâmetros de soldagem a ponto por resistência	16
2.6	Efeitos dos parâmetros de soldagem na geração de calor	18
2.6.1	Efeito da Corrente de soldagem.....	19
2.6.2	Efeito da Força do eletrodo	20
2.6.3	Efeitos do parâmetro de tempo no ciclo de soldagem	21
2.6.4	Efeito da resistência elétrica de contato	23
2.6.5	Outros fatores que influenciam na geração de calor.....	24
2.6.6	Dissipação do calor.....	25
2.6.7	Influência da composição química do metal base	25
2.7	Problemas operacionais na soldagem a ponto	25
2.7.1	Materiais e espessuras das chapas dissimilares	26
2.7.2	Efeito Shunt	26
2.7.3	Indentação.....	27
2.7.4	Desalinhamento do eletrodo	27
2.8	Controle da qualidade da solda.....	28
2.8.1	Métodos para avaliar a qualidade da solda	29

2.8.1.1	Inspeção Visual	29
2.8.1.2	Ensaio não destrutivos	30
2.8.1.3	Ensaio destrutivos	30
2.8.1.3.1	Ensaio de cisalhamento	30
2.8.1.3.2	Ensaio de tração axial	33
2.8.1.3.3	Ensaio de torção	33
2.8.1.3.4	Teste de arrancamento	33
2.8.1.4	Análise metalográfica	34
2.9	Metalurgia da soldagem.....	34
2.9.1	União de materiais dissimilares.....	34
2.9.2	Soldagem entre, aço, níquel e ouro em alumínio.	34
2.10	Geração de <i>Whiskers</i>	35
2.11	A remoção do chumbo nos metais base.....	36
2.12	Excesso de solda.....	36
2.13	Método Taguchi / projeto robusto	37
2.13.1	Desenvolvimento do Projeto Robusto	38
2.13.2	Projeto dos Parâmetros	39
2.13.4	Arranjo Ortogonal	41
2.14	Experimentação e análise	42
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
3.1	Corpos de prova.....	45
3.2	Equipamento de soldagem.....	48
3.2.1	Eletrodo de solda superior	49
3.2.2	Eletrodo de solda inferior	50
3.2.3	Temperatura de arrefecimento.....	50
3.2.4	Fixação da peça	50
3.3	Avaliação da qualidade dos componentes soldados.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Variáveis de análise	53
4.2	Definição do processo	53
4.3	Definição dos parâmetros de processo	53

4.4	Análise da influência dos parâmetros sobre a resistência a tração axial	56
4.5	Análise da influência dos parâmetros sobre a ocorrência de oxidação	58
4.6	Análise dos parâmetros em relação ao aparecimento de <i>Whiskers</i>	59
4.7	Parâmetros de soldagem	60
4.8	Análise da influência das espessuras das camadas de revestimento.	60
4.9	Avaliação do botão de solda.....	70
5	CONCLUSÕES	73
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

Figura 4.3 – Resultados obtidos para o número de pontos de oxidação resultante da operação de soldagem. a) avaliação dos parâmetros de soldagem, b) avaliação das interações entre os parâmetros.....	59
Figura 4.4 – Resultados obtidos com relação à resistência a tração. a) resistência em função da espessura das camadas de revestimento, b) interação entre os efeitos.....	63
Figura 4.5 – Avaliação da estabilidade das camadas em relação a resistência a tração axial a) em relação as espessuras das camadas e b) a correlação entre as espessuras e materiais.....	65
Figura 4.6 – Resultados obtidos com relação ao número de pontos de oxidação. a) pontos de oxidação versus espessura das camadas de revestimento, b) interação entre os efeitos. .	66
Figura 4.7 – Dispersão dos dados em relação à formação de pontos de Oxidação.....	68
Figura 4.8 – Aspecto superficial das chapas antes de serem soldadas. a) Chapa com a configuração (A) 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre, b) Chapa com a configuração (I) 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.....	68
Figura 4.9 – Impurezas e imperfeições na superfície das chapas antes de serem soldadas. a) Chapa com a configuração (A): 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre; b) Chapa com a configuração (I): 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.	69
Figura 4.10 – Verificação espessuras das chapas após a soldagem. a) Chapa com a configuração (A) 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre b) Chapa com a configuração (I) 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.....	70
Figura 4.11 – Resultado das análises do corpo de prova em microscopia eletrônica de varredura. a) vista da região da solda após a ruptura; b) região do metal sem solda; c) anel externo da região da solda; d) anel interno da região da solda; e) região interna do ponto sem fusão.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos materiais da RWMA [Intermachinery, 2002]	13
Tabela 2.3 – Matriz ortogonal L8.....	42
Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos.....	54
Tabela 4.2 – Resultados obtidos para cada corpo de prova.....	55
Tabela 4.3 – Melhores parâmetros para a condição de soldagem estudada.	60
Tabela 4.4 – Experimentos para definição das camadas da chapa de aço.....	61
Tabela 4.5 – Resultados dos experimentos realizados	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Corrente Alternada
AWS	American Welding Society
DC	Corrente Continua
DPA	Destructive Physical Analysis
DOE	Desing Of Experiments
IACS	International Annealed Copper Standart
NEMI	National Eletronics Manufacturing Initiave
OFAT	One Factor At the Time
RSW	Resistence Spot Welding
RPW	Resistence projection Welding
RSEW	Resustence Spot Welding
RWMA	Resistence Welding Manufacturing Association
RoHS	Restriction of Certain Hazardous Substances
SAE	Society of Automotive Engineers
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

LISTA DE SÍMBOLOS

(Unidades no sistema internacional)

Símbolo	Significado	Unidade
Q	Energia de soldagem	J
I	Corrente de soldagem	A
t	Tempo de soldagem	s
R	Resistência elétrica total	Ω
r	Rendimento térmico	
J	Constante de Joule	4,184 J
S	Sinal	
Rs	Ruido	
yi	Característica da qualidade	
n	Número de repetições	

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da quantidade de componentes eletrônicos nos veículos e sua importância, as exigências mecânicas a que esses itens são submetidos são cada vez mais severas. Nos primeiros veículos a eletrônica embarcada era pouco ou quase inexistente e utilizada somente para funções que não afetavam a segurança dos passageiros e funcionamento do veículo. Com o advento de novas tecnologias como injeção eletrônica, sistemas de freio controlado por computador de bordo, controle de tração, direção eletrônica, *air bag*, travas automáticas de portas, piloto automático, sensores de chuva e de estacionamento, nos automóveis mais modernos os componentes eletrônicos estão sendo utilizados em larga escala. Um componente fundamental para o acionamento automático de todos os sistemas mencionados é o capacitor.

Com a importância desses itens para garantir o pleno funcionamento do veículo e a segurança dos passageiros, aumentou consideravelmente o rigor nas especificações de fabricação. Atualmente esses componentes devem ser capazes de operar a temperaturas extremas de -55 até 150 °C, suportar acelerações de até 40 G, devendo ainda atender às necessidades elétricas e apresentar dimensões reduzidas.

Com base nesses requisitos, o processo de união considerado mais eficiente para garantir resistência à fadiga e às grandes variações de temperatura é a soldagem. Um dos grandes problemas para o desenvolvimento desses componentes é como executar a operação de soldagem sem danificar os contatos ou prejudicar as propriedades elétricas em peças finas. As chapas a serem soldadas possuem espessura da ordem de décimos de milímetros com revestimentos superficiais que visam evitar falhas e garantir características elétricas desejáveis.

Neste trabalho foi estudado a soldagem de materiais dissimilares utilizados na fabricação de capacitores eletrolíticos. É analisada a união de uma chapa de aço com 0,6 mm de espessura a uma chapa de alumínio com espessura de 0,2 mm. Além da dificuldade natural advinda da soldagem de materiais distintos, a chapa de aço é revestida com três camadas de diferentes materiais, a primeira camada é de cobre, a segunda de níquel e a camada externa contém ouro. São objetos deste estudo a verificação da possibilidade de realização da junta através do processo de soldagem por resistência elétrica, a obtenção de parâmetros de soldagem, a avaliação da relação entre as espessuras das camadas de revestimento que permita atender às especificações do produto e análise das características da região de solda.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Processos de soldagem

2.1.1 Fundamentos do processo de soldagem por resistência elétrica

A soldagem por resistência pertence ao grupo de processos em que o calor é gerado pela resistência à passagem de corrente elétrica enquanto as chapas estão em contato. Este método é muito utilizado para soldar chapas sobrepostas, podendo estas ter diferentes espessuras. Os processos de soldagem por resistência elétrica mais utilizados são solda a ponto (RSW), solda por projeção (RPW) e solda por costura (RSEW) [Welding Handbook 1987].

No processo de Soldagem a ponto por resistência (RSW), as peças sobrepostas a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra por meio de eletrodos movimentados por forças externas (mecânica, pneumática, hidráulica ou uma combinação 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 do material base à passagem da corrente gera uma quantidade de calor na superfície de contato entre as peças, proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente. Esta corrente 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 botão de solda [Metals Handbook, 1983].

Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida sobre o metal base 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 dos botões de solda gerados são limitados pelo diâmetro e contorno da face do eletrodo [Metals Handbook, 1983].

As variáveis de processo consideradas mais importantes são: a corrente elétrica, a resistência elétrica do sistema e o tempo de soldagem. Na literatura o parâmetro que tem a maior influência sobre a qualidade da solda é a corrente [Machado, 1996], pois está elevada ao quadrado na equação de equilíbrio entre a energia de soldagem e os demais parâmetros. O tempo de soldagem também é muito importante e a resistência é uma variável dependente de outros fatores como, por exemplo, a área de contato da região da solda, o material a ser soldado, os eletrodos, a impedância do equipamento assim como todo o sistema de transmissão de energia do equipamento. Existem outros fatores que podem interferir na

qualidade da solda, entre eles é possível citar o acabamento superficial, se a peça for extremamente polida haverá uma área de contato maior e haverá dificuldade na formação do ponto de solda, e se a superfície for muito rugosa pode ocorrer de ter pontos que gerem uma resistência elétrica muito elevada e não permitirão a passagem da corrente pelas chapas na região de contato determinada entre os eletrodos. Outro fator que interfere significativamente é a limpeza das faces, já que se forem formados óxidos, houver a presença de materiais isolantes ou escórias, haverá dificuldade ou impossibilidade de passagem de corrente.

As principais vantagens da soldagem a ponto por resistência podem-se citar a elevada resistência a vibrações mecânicas se comparado aos processos de soldagem que tem um tempo mais elevado de solda, dispensa operações posteriores de acabamento, pois este processo não produz escória ou salpicos, quando a solda é executada com os parâmetros corretos, a alta velocidade e adaptabilidade para automatização em produção e é independente da habilidade do operador.

O processo também apresenta algumas limitações, entre elas, podem ser soldados entre si metais de naturezas diferentes quando suscetíveis a formar uma liga ou quando se introduz entre eles um material intermediário que pode ligar-se nos metais base. Os custos de equipamento são geralmente mais altos do que os custos da maioria dos equipamentos de soldagem a arco e as soldas a ponto têm baixos limites de resistência à tração e à fadiga por causa do entalhe formado entre as chapas.

2.2 Fontes utilizadas para soldagem por resistência elétrica

A seleção do equipamento de soldagem por resistência deve levar em consideração o projeto da junta, os materiais a serem soldados, requisitos de qualidade e normas de produção, além de considerações econômicas.

Todas as fontes de soldagem por resistência elétrica apresentam basicamente três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito elétrico e o sistema de controle [Wainer, et. al., 1992].

O sistema mecânico é composto de sistemas hidráulicos, pneumáticos e/ou mecânicos que são responsáveis pela aplicação da força nos eletrodos para segurar a peça. Este sistema deve controlar a velocidade de aproximação do eletrodo que deve ser rápida, mas controlada, de modo que as faces do eletrodo não sejam deformadas a partir de repetidos choques. Características mecânicas de fontes de soldagem a ponto por resistência, tais como: rigidez,

atrito entre os componentes móveis, e movimento de massa, tem influências complexas sobre o processo e soldagem por resistência e qualidade da solda [Tan, et.al, 2004].

O circuito elétrico é 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. Este circuito tem por objetivo fornecer a corrente aos eletrodos.

O sistema de controle é responsável pelo controle do processo de soldagem e fornece as seguintes funções principais: iniciar ou cessar a passagem de corrente para o transformador da máquina, controlar a magnitude da corrente a aplicar e liberar o mecanismo de força do eletrodo no tempo adequado.

Esses três componentes (mecânico, elétrico e controle) regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência: a força do eletrodo, a intensidade e o tempo de passagem da corrente de soldagem [Wainer, et. al.,1992].

2.2.1 Fontes de soldagem do tipo descarga capacitiva

As fontes de soldagem do tipo descarga capacitiva são compostas um por um banco de capacitores que tem a função de armazenar energia em um curto período de tempo. Esse tempo é determinado pelos capacitores, sendo que quanto maior a capacitância há para ser descarregada do banco, mais tempo é necessário para que isto ocorra. Nas máquinas capacitivas, o controle de energia de soldagem é feito através da capacidade de descarga dos capacitores, considerando a sua carga máxima. As variáveis controláveis nessas máquinas são o tempo de contato antes da descarga, o tempo de retenção após a descarga, a resistência do circuito elétrico, a temperatura de resfriamento dos eletrodos e a pressão do cabeçote de soldagem.

A resistência elétrica na interface entre as peças se situa geralmente no intervalo de 50 a 500 $\mu\Omega$ - mas pode ser tão baixa quanto 20 $\mu\Omega$ para o alumínio, sendo necessárias correntes com intensidade entre 5000 e 100.000 A para que ocorra fusão. A fusão também depende da condutividade térmica do metal envolvido, a qual é relativamente pequena para o aço e alta para o alumínio, por exemplo. As tensões empregadas variam de 1 a 20 V – muito raramente alcançam 30 V – com o tempo de aplicação da corrente variando desde menos de 0,01 s para folhas (chapas muito finas) até vários segundos para peças mais espessas [Machado, 1996].

Conforme Karagoulis, 1994, este processo é ideal para soldar chapas finas, com até 3 mm de espessura. Maiores espessuras de chapas podem ser soldadas, mas máquinas especiais devem ser utilizadas.

2.2.1.1 Ciclo de soldagem de fontes do tipo descarga capacitiva

Em um equipamento de descarga capacitiva, cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, como mostrado na figura 2.1. Sendo a frequência da rede 60 Hz, 1 período terá a duração de: $1/60 = 0,0167s$.

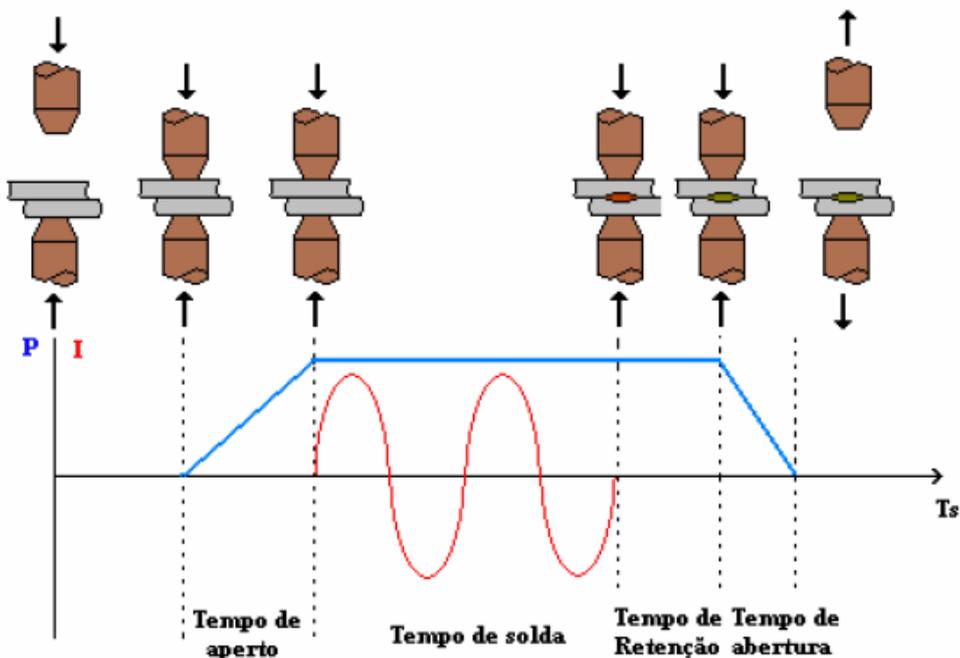


Figura 2.1 – Ciclo de soldagem em máquinas tipo descarga capacitiva [adaptado de Branco 2004].

Diferentes materiais podem ser soldados por este processo: aços baixa liga e baixo carbono, inoxidáveis, alumínio e suas ligas entre outros. Titânio, cobre e suas ligas, magnésio e alguns metais refratários também podem ser soldados [TWI, 2005].

Existe uma diversidade de formas dos pontos resultantes de operações de soldagem por resistência: solda a ponto simples, solda múltipla, solda em série, solda em paralelo e soldas indiretas. Um corte transversal de uma típica solda a ponto é mostrado na figura 2.2.

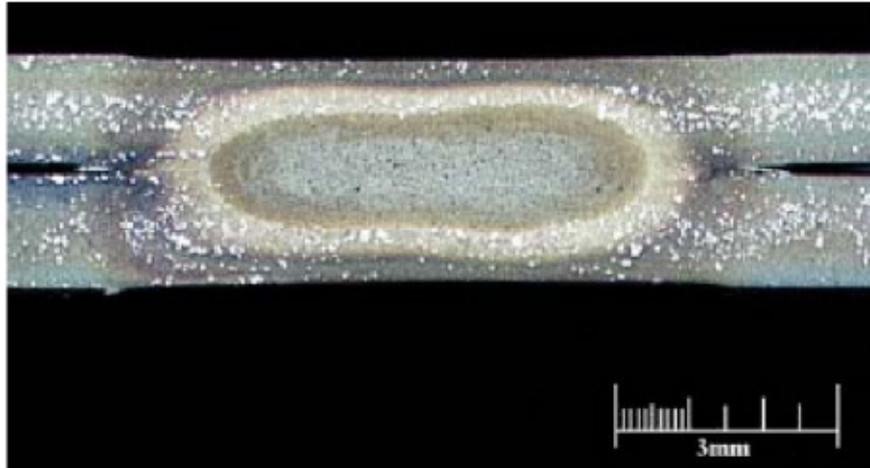


Figura 2.2. Corte transversal demonstrando o aspecto de uma junta de solda a ponto por resistência [EWI, 2002].

2.2.2 Fontes de soldagem inversoras de media frequência

As fontes inversoras de soldagem possuem um sistema de transformação da corrente de alternada para contínua, no qual é possível controlar a energia de soldagem com maior precisão e com mais recursos, pois neste equipamento o tempo de soldagem é programável. Esse se tornou o maior avanço neste tipo de soldagem nos últimos anos, pois uma grande preocupação que ocorria antes era o tempo de soldagem ser excessivamente longo. Contudo, o sistema possui uma inércia na rampa de subida que impossibilita a colocação de altas correntes em tempos muito curtos, como por exemplo, 25 kA em 4 ms.

Por ser um processo controlado eletronicamente, todo o monitoramento dos parâmetros da soldagem pode ser feito de forma simplificada durante a operação. Desta forma é possível avaliar a condição da solda instantaneamente, sem necessidade de testes destrutivos das peças para confirmar a eficiência da solda.

2.2.2.1 Ciclo de soldagem em fontes inversoras

Os sistemas de controle da fonte são responsáveis pela aplicação e pela estabilidade da corrente de soldagem. Em algumas fontes esse controle é feito através de dispositivos chamados tiristores, que atuam no ângulo de fase da tensão de alimentação, ora proporcionando a condução de corrente elétrica, ora interrompendo totalmente seu fluxo. Uma desvantagem desse sistema é que nos períodos de condução a corrente faz com que a temperatura da união suba muito rapidamente, necessitando que os períodos de não condução

sejam grandes, para que na média os valores de corrente real estejam próximos dos valores programados.

Outra forma de controle da corrente é através de dispositivos chamados de inversores. Os inversores permitem um controle mais preciso da corrente, pois são capazes de intervir em seu curso em intervalos muito menores que os sistemas de controle tiristorizados. Como comparação, pode-se dizer que nos sistemas convencionais as interações são feitas a cada 8,33 ms, enquanto que sistemas inversores podem operar interações de correção mais rapidamente, ou seja, a cada 1 ms [Kim, 2009].

Na figura 2.3 pode se observar a diferença entre os dois tipos de equipamentos, em (a) um equipamento por soldagem por descarga capacitiva tiristorizado e em (b) um sistema de soldagem utilizando inversor.

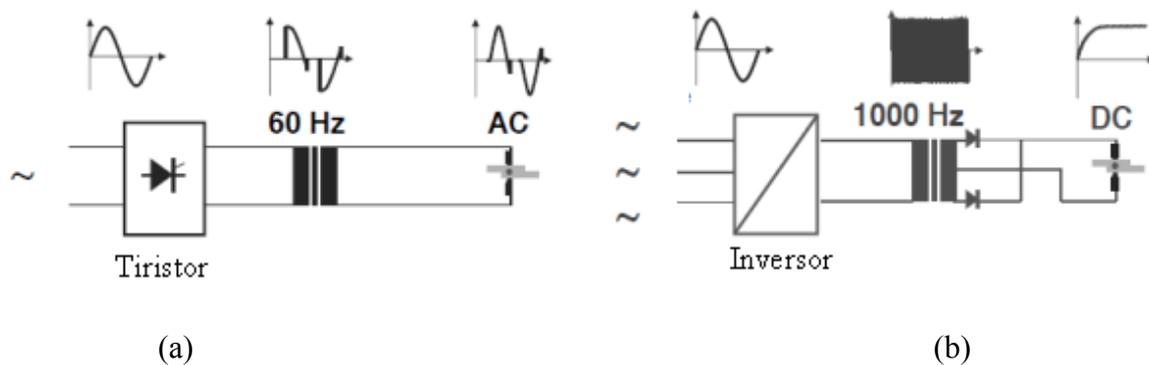


Figura 2.3 – a) controlador de soldagem utilizando tiristor, b) Controlador de soldagem utilizando inversor [adaptado de Kim 2003]

Basicamente, os inversores são divididos em quatro blocos:

O primeiro bloco é um retificador, que converte a tensão alternada senoidal da entrada da rede de 60Hz em uma onda contínua retificada.

O segundo bloco tem a função de receber a tensão retificada e fazê-la pulsar novamente, transformando-a em corrente alternada, porém com frequência de 1000 Hz nos equipamentos de media frequência podendo chegar a 4000 Hz.

O sinal é então levado a um transformador especial, o terceiro bloco, que fará o rebaixamento da tensão, com uma capacidade de fornecimento de corrente suficiente para a execução da soldagem.

Por fim, no quarto e ultimo bloco, a tensão alternada sai do transformador já rebaixada e passa novamente por um elemento retificador, que transformará esse sinal em uma forma

pulsada e retangular com frequência de 1 kHz [Kim, 2009], conforme demonstrado na figura 2.4.

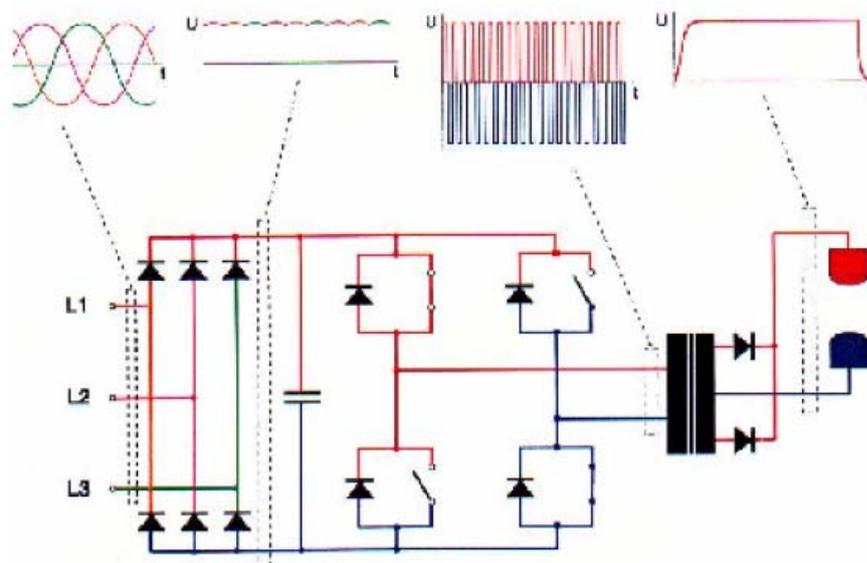


Figura 2.4. Esquema elétrico de um inversor de soldagem e formas de ondas resultantes. [Wolzniak, 2003].

Porém a maior vantagem no controle da emissão da energia pode ser vista na figura 2.5, quando são comparadas as formas de controle de corrente elétrica entre ambos. O sistema inversor pode controlar a largura do pulso que será enviado aos eletrodos. Este pulso pode ter a largura máxima de 1 ms (corrente totalmente contínua) variando até uma largura mínima nula, de maneira totalmente linear.

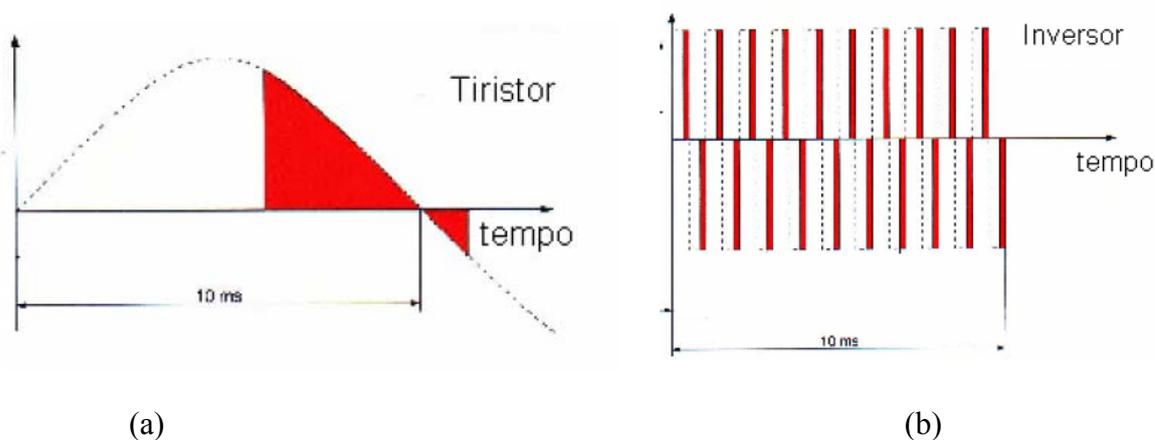


Figura 2.5. Comparação entre os sistemas (a) tiristorizado por ângulo de fase e (b) inversor. [Wolzniak, 2003].

O controle de tensão e de corrente elétrica no eletrodo de solda através de inversores, permite que ocorra o aquecimento gradativo das chapas, até que se atinja o ponto de fusão dos materiais, e por fim à formação do botão de solda. A energia gerada é mais significativamente concentrada, permitindo a adoção de tempos de soldagem menores, além de ampliar a capacidade de soldagem para diversos tipos de materiais e revestimentos.

Um exemplo de como acontece o aumento do calor na região da formação do ponto de solda, é mostrado na figura 2.6, que compara as correntes produzidas pelo controle de corrente através do tiristor e do controle por inversor.

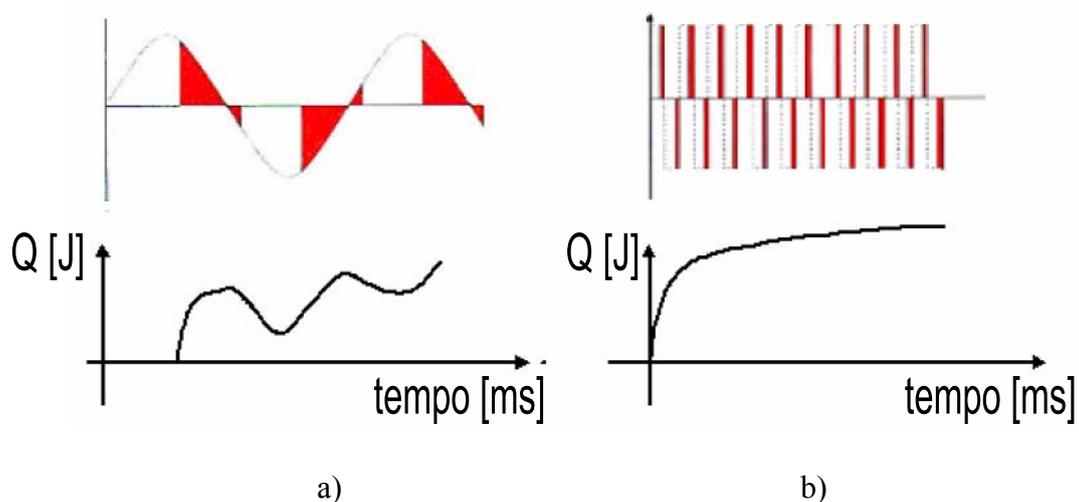


Figura 2.6. Aumento de calor na região de fusão dos pontos de solda em a) Tiristor e b) Inversor [Wolzniak, 2003].

2.3 Eletrodos

Os eletrodos são a parte física mais importante do equipamento de soldagem por resistência elétrica. O metal base na grande maioria dos casos é o cobre por ser um bom condutor elétrico, condutor térmico, por ter uma baixa resistência elétrica de contato e um custo acessível. A efetividade do processo depende em uma considerável medida das condições de trabalho, esforços mecânicos e da vida do eletrodo.

A vida do eletrodo é geralmente definida como o número de soldas que podem ser feitas, sem a necessidade de afiar a ponta do eletrodo, antes da dimensão do botão de solda diminuir, atingindo níveis inaceitáveis. Uma baixa vida do eletrodo pode limitar a taxa de produção devido à necessidade de frequentes afiações do eletrodo e/ou operações de troca dos eletrodos [Holliday, et. al., 1995].

O propósito do eletrodo é conduzir a corrente de soldagem para a peça de trabalho, aplicar força para unir 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, sob severas condições de trabalho.

Os eletrodos desempenham um papel vital na geração de calor porque eles conduzem a corrente de soldagem até o material. Durante a operação de soldagem, altas correntes elétricas, grandes forças compressivas e altas temperaturas (900°C) são atingidas (figura 2.7) na superfície de contato do eletrodo/chapa [RWMA, 1989]. Grande parte do desgaste do eletrodo ocorre devido à alta temperatura de trabalho e à permanência na mesma [Machado, 1996]. Essa permanência é consequência de excesso no tempo de soldagem. Roswell [1976] demonstrou que para um mesmo tipo de aço e com os mesmos parâmetros, maior vida do eletrodo é atingida para pequenos tempos de soldagem (4 ciclos) do que para tempos maiores (8 ciclos). Algumas indústrias utilizam a técnica de comando programado na qual a soldagem é interrompida em função de um número de pontos de solda pré-determinado e a cada interrupção a corrente é aumentada. Isto se explica pelo desgaste do eletrodo que ocorre após certo número de pontos de solda, o diâmetro da face do eletrodo aumenta e a densidade de corrente é menor, logo se necessita maior corrente para compensar este desgaste.

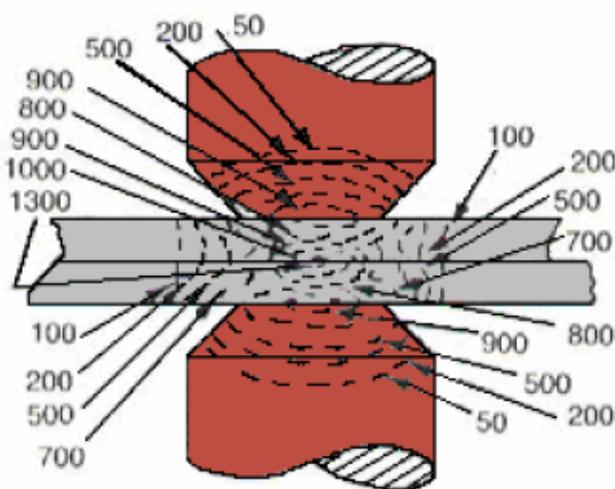


Figura 2.7. – Temperaturas instantâneas estimadas de soldagem a ponto em °C no instante de finalização da solda [RWMA 1989, modificado].

As propriedades elétricas de cobres de alta condutividade (“C copper”) foram padronizadas em 1913 pela “International Electrotechnical Commission”, a qual definiu o padrão “International Annealed Copper Standard” (IACS).

Os eletrodos devem ser projetados para suportar densidades de corrente entre 800 e 10.000 A/cm² e pressões entre 70 e 400 MPa [Wainer, et. al., 1992].

2.3.1 Geometria dos eletrodos

Um eletrodo para soldagem por resistência (figura 2.8) possui 4 regiões características:

A – Face: é a parte que mantém contato com a peça de trabalho. Na soldagem é a parte mais importante do eletrodo pois determina o valor da densidade de corrente a aplicar durante a realização do ponto de solda, assim como também determina a pressão a ser utilizada para atingir a força necessária para realização da solda.

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

C – Conexão: forma de fixação no porta eletrodo ou suporte do eletrodo.

D – Cavidade para refrigeração: é a parte oca interna do eletrodo que está conectada 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 grande para não diminuir a resistência mecânica do eletrodo [AWS, 1998].

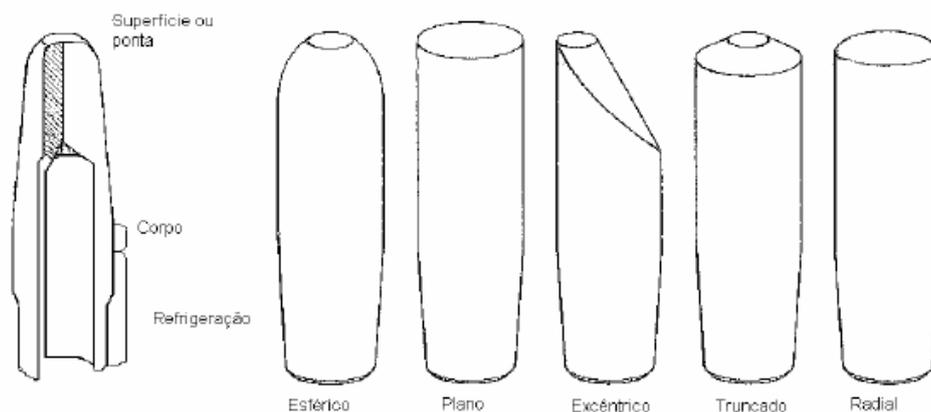


Figura 2.8 - Tipos de eletrodos mais utilizados em soldagem a ponto [adaptado de Metals Handbook 1983].

Para a realização do ponto de solda, corrente deve ser fornecida através do eletrodo. A intensidade de corrente a circular e o calor gerado pela corrente nas superfícies de contato das peças é função direta do diâmetro do eletrodo. A densidade de corrente 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, maior quantidade de corrente será aplicada em uma área menor, maior calor será gerado e afundamento do eletrodo na chapa (indentação) pode acontecer. Se o diâmetro do eletrodo é maior a densidade de corrente será menor, pouco calor será gerado, a pressão do eletrodo diminuirá e a solda pode não ser possível, podendo ocorrer expulsão de metal. Logo o diâmetro da face do eletrodo é fundamental para a obtenção de características adequadas da união resultante.

Em geral, eletrodos cônicos truncados apresentam maior tempo de vida, sendo os mais comuns em soldagem de chapas galvanizadas [Gedeon, 1984], embora os esféricos possam ser favorecidos quando o alinhamento é difícil [Powell, 1996].

2.3.2 Materiais dos eletrodos

O material dos eletrodos deve possuir as seguintes propriedades [Machado, 1996]:

- 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 aperfeiçoar 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 da dureza, a condutividade elétrica é geralmente diminuída. Uma combinação entre condutividade elétrica e térmica, junto com adequada dureza e resistência às altas temperaturas de operação são os requisitos essenciais para um adequado material do eletrodo [Holliday et al., 1995].

O Cobre, material de construção do 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 extremas a capa do eletrodo sofre deformação plástica, ocorrendo formação de grãos grosseiros. O Cobre endurecido por dispersão apresenta crescimento desses grãos.

Os materiais recomendados pela Resistance Welding Manufacturing Association - RWMA para fabricação de eletrodos apresentam as melhores combinações de resistência, desgaste mecânico, condutividade elétrica e térmica [Machado, 1996]. Esta entidade classifica os eletrodos, pela composição química e propriedades mecânicas, segundo a tabela 2.1, em:

Tabela 2.1 – Propriedades físicas dos materiais da RWMA [Intermachinery, 2002]

Classe RWMA	Rockwell B Mínima	Condutibilidade (% IACS mínima)	Material
1	65	80	Cobre-Cádmio
2	75	75	Cobre-Cromo
3	90	45	Cobre-Cobalto-Berílio

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

Classe 2: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e condutividades elétrica e térmica mais baixas 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 à soldagem de uma ampla faixa de metais e condições;

Classe 3: É composta por materiais com propriedades mecânicas mais altas e menores condutividades térmica e elétrica, quando comparadas com aquelas dos eletrodos da Classe 1 e 2 [Metals Handbook, 1983].

2.3.3 Refrigeração dos eletrodos

A refrigeração do eletrodo é importante para evitar o superaquecimento na face de contato alterando as propriedades de condutividade elétrica. A distância do final do furo de refrigeração à face do eletrodo é denominada “espessura da face”. Para determinado nível de extração de calor devido ao líquido de refrigeração, corrente e ciclos de soldagem, existe uma “espessura crítica” para a qual a temperatura do eletrodo é mínima [Machado, 1996]. Na figura 2.9. demonstrasse o sistema de refrigeração de um eletrodo.

Para uma ótima refrigeração dos eletrodos recomenda-se que o fluxo de água seja no mínimo de 4 l/min para efetuar soldagem de chapas de aço sem revestimento e com espessura de até 3 mm. O fluxo de água deverá ser maior, cerca de 6 a 7 l/min, caso as chapas sejam de aço revestido e/ou grande espessura. O tubo interno de alimentação do sistema de refrigeração deve ser disposto de tal forma a assegurar que a água entre pela parte oposta à face de trabalho dos eletrodos [Powell, et al., 1996].

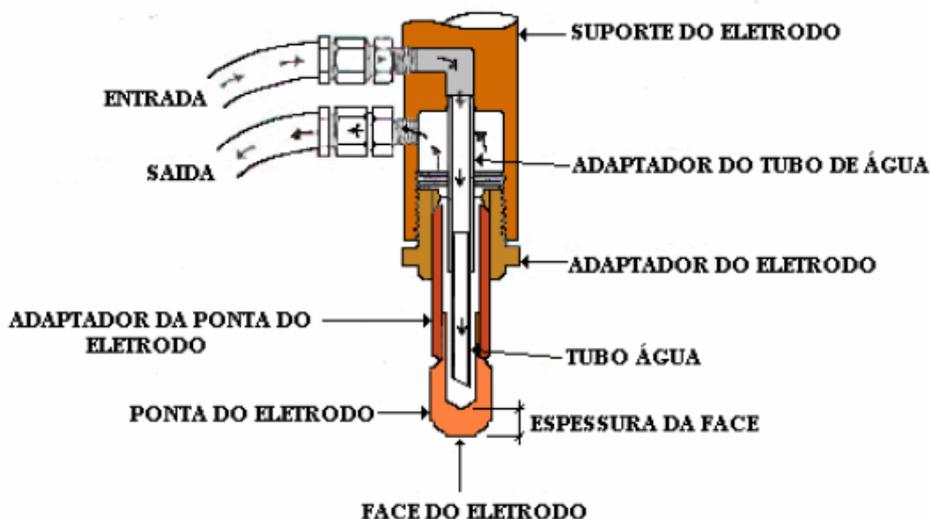


Figura 2.9 – Sistema de refrigeração do eletrodo [Intermachinery 2002, modificado]

Um nível adequado de temperatura de entrada da água no sistema de refrigeração, deverá ser de 20 °C e na saída de 30 °C. Para manter estes níveis de temperatura, o fornecimento de água de refrigeração para os eletrodos deve ser independente do sistema de arrefecimento do transformador. Circuitos de água separados devem ser usados tanto para os eletrodos superiores quanto para os inferiores [Powell, et. al., 1996]. Para que os eletrodos tenham uma elevada vida útil é recomendado que a velocidade de soldagem esteja na faixa de 20 a 30 pontos/min. [Intermachinery, 2002]

Yeung [1999] observou que, para pequenos tempos de aquecimento, nenhuma alteração ocorria na temperatura máxima atingida nos eletrodos. E que pela redução do fluxo de refrigeração de 3,79 l/min até 2,24 l/min ou pela diminuição da espessura da face de 9,00 para 6,35 mm também não ocorreram aquecimentos significativos.

2.4 Geração de calor em soldagem a ponto por resistência

O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto, incluindo a peça de trabalho sendo soldada, é uma associação de resistências em série e o seu valor 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 [Metals Handbook, 1983].

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

1. Corrente elétrica;

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

Na soldagem por resistência, o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e o tempo. Parte do calor gerado é utilizado para produzir a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o material de base e eletrodo. A magnitude destas perdas é geralmente desconhecida. Na equação 1 é demonstrada as variáveis que afetam a energia da soldagem.

$$Q = \frac{r}{J} \int_0^t I^2 R dt \quad (1)$$

Onde:

Q é a energia de soldagem [J]

I é a corrente de soldagem [A]

t é o tempo de aplicação da corrente de soldagem [s]

R é a resistência elétrica total [Ω]

r é o rendimento térmico

J é a constante de Joule (4,185 J)

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. [AWS, 1998]

A figura 2.10 mostra os efeitos compostos de geração de calor e dissipação nas peças de trabalho e eletrodos, exemplificando que pode haver 7 resistências conectadas em série:

- 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;
- 2 e 6: resistência de contato entre o eletrodo e o metal base. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal base 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, mas a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutividade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles são usualmente refrigerados a água;
- 3 e 5: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;

- 4: resistência do metal base da interface no local onde a solda deve ser formada. É o ponto de maior resistência elétrica e, portanto, o ponto de maior geração de calor. O calor é gerado em todos esses locais. Entretanto, tal calor é requerido apenas nas interfaces dos metais base e o calor gerado nos outros locais devem ser minimizados. Já que a maior resistência está localizada na interface, o calor é mais rapidamente desenvolvido nesse local [AWS, 1998].

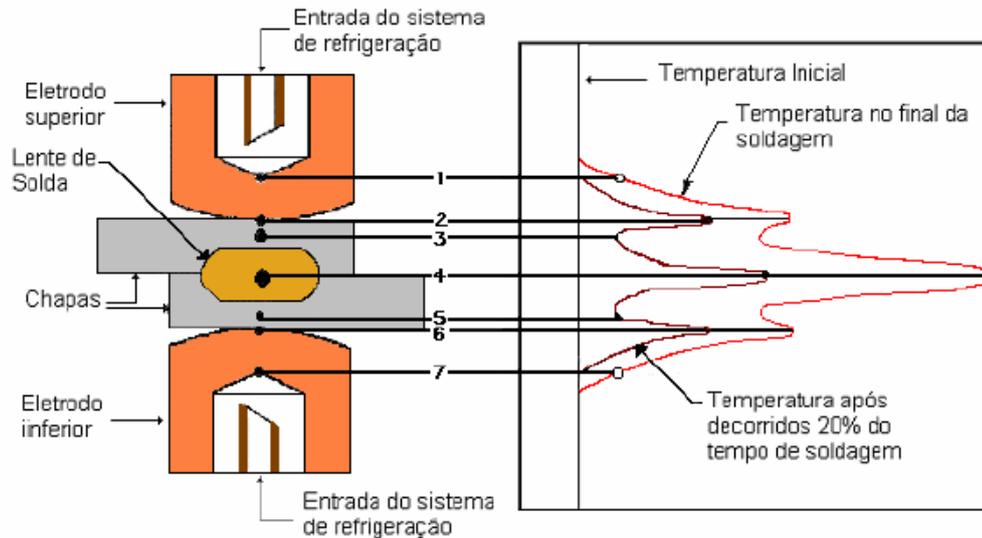


Figura 2.10 – Pontos principais de calor nos eletrodos e gradiente de temperatura após 20% do tempo de soldagem e no final do processo [Metals Handbook 1983, modificado].

Após cerca de 20% do tempo de soldagem ter transcorrido, o gradiente térmico é representado pela curva à esquerda na figura 2.10. A curva à direita representa o gradiente térmico no final do tempo de soldagem [AWS, 1998]. Quando as condições de soldagem são adequadamente controladas, a temperatura de soldagem é primeiramente alcançada na interface entre as chapas (posição 4).

Durante o período de aquecimento, a região fundida cresce e se torna contínua para formar o botão de solda [AWS, 1998].

2.5 Parâmetros de soldagem a ponto por resistência

Os parâmetros de soldagem são as variáveis que afetam na qualidade da solda. Com determinado valor e uma adequada combinação entre elas permitem a obtenção de um ponto de solda, efetivando a união dos materiais. Os valores definidos desses parâmetros são os responsáveis por uma boa ou má qualidade da solda.

Em soldagem a ponto por resistência existem três parâmetros principais a corrente de soldagem, a força do eletrodo e o tempo 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).

A corrente de soldagem é fornecida pela rede de alimentação, passando pelo circuito primário do transformador, pelo circuito secundário chegando até a peça de trabalho. Tanto a corrente alternada (AC), quanto à corrente contínua (DC) é utilizada para produzir a solda [AWS, 1998].

Ocasionalmente são encontrados na literatura de soldagem conceitos relativos somente a tensão e corrente com forma senoidal, o que diz muito pouco em relação à real condição elétrica em soldagem por resistência. Na maioria dos artigos, por exemplo, não está claro que valores RMS de corrente e tensão são utilizados nos cálculos [Weber, G.,1994].

A medição de corrente pode ser feita através de toróides (bobinas) ou de sensores de efeito Hall. O toróide é o mais usado e permite medir a tensão induzida pelo campo magnético variável que envolve os condutores de corrente. Este tipo de dispositivo só pode ser usado para medir corrente AC. O 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 e conseqüentemente também nos valores medidos da corrente. Estudos mostram que este erro pode ser de até 5% da medição quando o toróide não está fixo na fonte de soldagem [Gedeon, et. al., 1987].

A tensão medida no secundário é muito pequena, estando assim sujeita à interferência por ruídos. O pulso de voltagem pode ser medido através da peça de trabalho [Gedeon, et. al., 1987].

A força do eletrodo é a força necessária para juntar, segurar e unir as peças de trabalho, exercendo pressão antes, durante e depois do fornecimento da corrente. Esta força também serve para forjar os metais quando eles se encontram no estado plástico. Este parâmetro está subdividido em: pré-pressão (compressão ou aperto), pressão de soldagem e pós-pressão (retenção).

O tempo de soldagem é a duração de fornecimento da corrente de soldagem para a realização do ponto. Deve-se ter em conta que se tempos de soldagem muito curtos são aplicados a corrente de soldagem tem de ser muito alta para poder atingir o calor necessário para fundir o material a soldar.

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

Medições de resistência estática indicam que a resistência de contato depende do revestimento da superfície e da força nos pontos de contato. É sabido que a resistência de contato entre duas superfícies lisas não tem valor tão alto como com as superfícies com materiais estranhos e que a diminuição da força dos eletrodos aumenta a resistência [Kaiser, et. al., 1982].

Segundo Houlcroft [1979] a resistência depende da resistividade e da geometria do condutor. Desde que a resistividade do material da peça de trabalho é fixa. É usual criar um local de alta resistência providenciando um caminho restrito à passagem da corrente entre as partes a serem soldadas, um procedimento conhecido como concentração de corrente.

2.6 Efeitos dos parâmetros de soldagem na geração de calor

O procedimento usual de obtenção de uma condição de aquecimento desejada, consiste em pré-selecionar a corrente de soldagem, pressão aplicada na peça de trabalho e o tempo de soldagem para uma aplicação particular, levando em consideração as propriedades do material das peças a serem soldadas e a geometria da ponta do eletrodo [Chang, et al., 1990]. As combinações desses parâmetros formam um ciclo de soldagem que pode durar de 1 ms em chapas muito finas até vários segundos em chapas mais grossas. Este ciclo de soldagem está dividido em 4 partes características, como mostrado na figura 2.11, mas existem ciclos com impulsos múltiplos para determinadas condições e propriedades do tipo de material a soldar, como o que será utilizado neste trabalho. Estes parâmetros serão definidos assim como os seus efeitos no ciclo de soldagem.

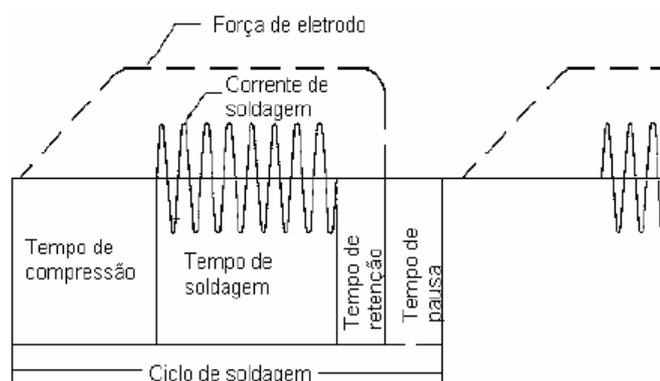


Figura 2.11 – Ciclo de solda básico em solda a ponto [adaptado de AWS 1998].

2.6.1 Efeito da Corrente de soldagem

Na equação 1, a corrente tem um efeito mais significativo na geração de calor do que a resistência ou o tempo. 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 fontes de corrente alternada. Variações de impedância são causadas por mudanças na geometria do circuito ou pela introdução de massas magnéticas no circuito fechado secundário da fonte. Fontes de corrente contínua não são significativamente afetadas por massas metálicas magnéticas no circuito secundário e são pouco afetadas pela geometria do circuito [RMWA, 1989].

A condutividade térmica dos metais possui efeito sobre a eficiência da corrente. No caso do aço, ela representa cerca de 12% da condutividade do Cu; portanto, se uma corrente de soldagem suficiente for usada na soldagem de aço com eletrodos à base de Cu, o calor gerado ao longo da interface entre as chapas (ponto 4 na figura 2.6) será conduzido para longe da zona de solda mais lentamente do que o calor gerado nas pontas dos eletrodos (pontos 2 e 6 na figura 2.6) o qual é conduzido para sua direção longitudinal (pontos 1 e 7 na figura 2.6). Assim, a interface entre as chapas atinge primeiramente a temperatura de fusão e uma solda é produzida neste local [Metals Handbook, 1983].

As variações na magnitude da corrente podem afetar a densidade de corrente na interface da solda. Existe um limite inferior para a densidade de corrente abaixo do qual a fusão não ocorre. Calor suficiente deve ser gerado para compensar as perdas, por condução, para o metal base adjacente, os eletrodos e o meio ambiente. Existe, também, um limite superior para a densidade de corrente de soldagem. Se esta for muito alta, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica enquanto a zona de solda atinge

a temperatura de fusão e os eletrodos penetram profundamente nas chapas. As superfícies externas dos eletrodos podem também ser aquecidas a ponto de fundir a o eletrodo a peça. Isto realmente ocorre quando a corrente é alta o suficiente para produzir expulsão de material de zona fundida. O resultado é uma baixa vida útil do eletrodo e soldas com baixa qualidade [RMWA, 1989].

A resistência máxima das soldas é obtida pela soldagem com densidade de corrente logo abaixo do valor no qual ocorre expulsão [Metals Handbook, 1983]. A figura 2.12 mostra um gráfico de soldabilidade e os níveis inferior e superior da corrente entre os quais a solda é realizada.

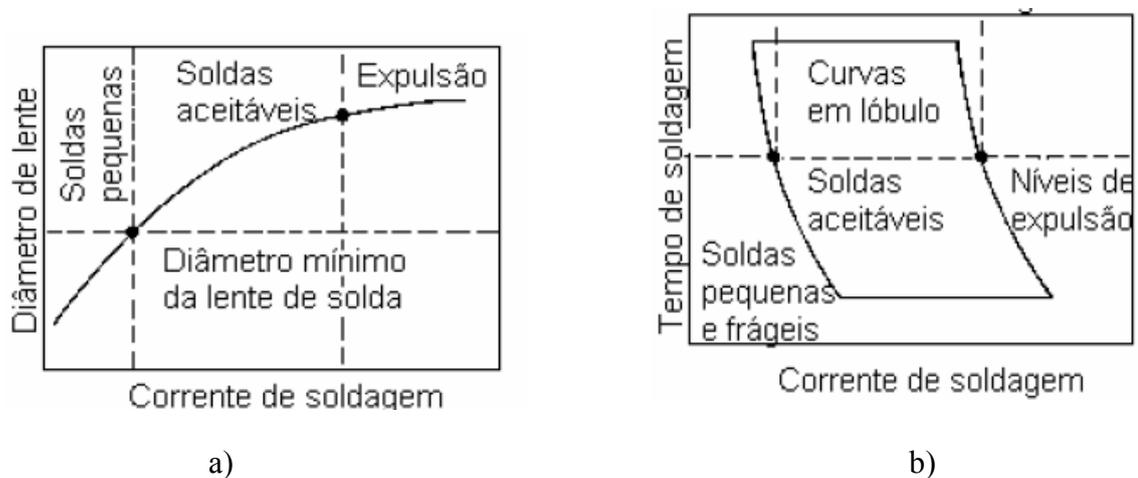


Figura 2.12 - Curva de soldabilidade. a) em relação ao diâmetro do ponto (lente) de solda e b) em relação com o tempo de soldagem. [Metals Handbook 1983, modificado].

2.6.2 Efeito da Força do eletrodo

As superfícies metálicas, mesmo as mais polidas ou com acabamento cuidadoso, apresentam rugosidade em escala atômica da ordem de $0,05 \mu\text{m}$. Isto impede que as superfícies como um todo, se aproximem efetivamente. Além dessas irregularidades das superfícies existem ainda as camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, etc., o que impede a ligação metal/metal [Marques, 1991].

Todos esses defeitos e impurezas na superfície da chapa diminuem a área pela qual a corrente deve passar aumentando a densidade de corrente e dando lugar a um aquecimento rápido do material o que causa uma variação do processo, da configuração do botão de solda e da qualidade da solda. Para melhorar o contato entre estas superfícies se aplica força antes, durante e após o processo de soldagem.

A força do eletrodo usualmente é medida e expressa como um valor estático, mas é uma força dinâmica em operação e é afetada pelo atrito e inércia das partes em movimento do equipamento de soldagem [Metal Handbook, 1983].

As peças a serem soldadas devem ser firmemente fixadas no local para permitir a passagem da corrente. Um incremento da força do eletrodo diminui a resistência de contato do metal de trabalho, e assim, reduz a geração de calor entre as superfícies de contato da peça [Metal Handbook, 1983]. Para aumentar o calor até um nível suficiente, corrente ou tempo de soldagem devem ser aumentados para compensar a diminuição na resistência [AWS, 1998].

A força do eletrodo deve ser compatível com a corrente de soldagem e o metal base deve estar em razoável contato sem uma excessiva força do eletrodo [Metal Handbook, 1983]. Na maioria das aplicações, o material do eletrodo é menos duro do que as chapas. Conseqüentemente, uma aplicação adequada da força do eletrodo produzirá melhor contato nas interfaces eletrodo/chapa do que na interface chapa/chapa [AWS, 1998].

2.6.3 Efeitos do parâmetro de tempo no ciclo de soldagem

Durante a operação de soldagem, um tempo mínimo é requerido para atingir a temperatura de fusão, dependendo da densidade de corrente. A taxa de geração de calor deve ser tal que possibilite a obtenção de soldas com resistência mecânica adequada [AWS, 1998]. O tempo de soldagem, no ciclo de soldagem, está dividido em intervalos de tempo que influenciam o processo.

O primeiro tempo aplicado no processo é o tempo de compressão das peças. Esse tempo tem a função de garantir o correto posicionamento das peças. Esse é o intervalo de tempo do processo entre a aplicação inicial da força do eletrodo na chapa metálica é o início da aplicação da corrente [Parmar, 1995]. O tempo de compressão se divide em duas etapas, o tempo de aproximação e tempo de aplicação da pressão de assentamento. O tempo de aproximação 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 dos eletrodos encostarem nas chapas. E o tempo de assentamento que é o tempo que o conjunto que faz o contato das peças demora desde do posicionamento inicial até a aplicação da pressão de trabalho. O tempo de compressão é utilizado para garantir que o metal base tenha sido submetido ao valor de força de eletrodo determinada. Se a corrente de soldagem for aplicada antes que esta força seja atingida, haverá expulsão de metal fundido e a solda será de má qualidade. Se a corrente for aplicada 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 aplicada após o início do ciclo de pressão de soldagem, a solda poderá até ter 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. Muitos defeitos da solda podem ser atribuídos à soldagem com curto tempo de compressão [Rivett, 1984].

O tempo de soldagem é o tempo de aplicação da corrente máxima que fornece o calor necessário para efetivar a união entre as chapas. Alguns autores definem o tempo de soldagem somente como o tempo de aplicação da corrente de soldagem, já outros autores o definem como o tempo de aplicação da corrente de soldagem incluindo um tempo de subida (*upslope*) mais um tempo de descida (*downslope*) e em alguns casos até com um pulso de corrente de pós-aquecimento.

“*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 sobre-aquecimento e expulsão do metal no início da corrente de soldagem, quando a resistência da interface do metal base ainda é alta [AWS, 1998].

O tempo de corrente aplicada é o intervalo de tempo, relativamente curto, de aplicação da corrente máxima de soldagem. Da equação 1 é possível observar 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. Este conceito será considerado na hora de analisar os resultados.

Este tempo é controlado por sistemas eletrônicos, mecânicos, manuais ou pneumáticos. Para máquinas de energia armazenada, tipo magnética ou de capacitor, o tempo de soldagem é determinado pela constante elétrica do sistema [AWS, 1998].

Um outro limitante da aplicação prolongada da corrente é que o aquecimento se transfere ao longo da espessura da chapa. Com o aquecimento do material de base, a resistência elétrica nestas regiões aumenta e mais calor é gerado. Os pontos 3 e 5 se tornarão plásticos, permitindo a deformação da chapa e provocando o afundamento dos eletrodos dando lugar à indentação. Mesmo sem a deformação, haverá um crescimento exagerado da botão da solda e da zona afetada pelo calor (ZAC).

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 [AWS, 1998].

O “*Downslope*” é a diminuição gradual da corrente no final do tempo de soldagem. Este tempo é utilizado para controlar a solidificação do botão de solda e para evitar a trincas em metais que são endurecidos por têmpera ou sujeitos à fissuração em quente [AWS, 1998].

O tempo de retenção é o tempo durante o qual os eletrodos continuam na sua posição mantendo-se a aplicação da força na peça de trabalho, após cessar o pulso a corrente ter sido aplicado. Durante este tempo o botão de solda se solidifica e é esfriado até atingir sua adequada resistência mecânica [AWS, 1998].

Se os eletrodos forem removidos da solda rapidamente após a corrente de soldagem ter cessado pode acontecer empenamento da região de soldagem em chapas finas. Com chapas espessas, o tempo deve ser o suficiente para esfriar e solidificar o botão de solda sob pressão. 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 [AWS, 1998].

Durante o processo pode ser importante ter um tempo para refrigerar o eletrodo ou evitar a sobrecarga de trabalho do equipamento, esse é o tempo durante o qual o eletrodo é separado da peça de trabalho, a qual é movimentada até a próxima posição de soldagem. Este termo é geralmente aplicado quando o ciclo de solda é repetitivo [Parmar, 1995].

Dentro do ciclo de soldagem, diferentes configurações de pulsos de corrente podem ser utilizadas. Isto deve ser feito dependendo do projeto, especificamente do material base a utilizar. No caso de chapas galvanizadas, um primeiro pulso pode ser adicionado no ciclo de soldagem com a ideia de fundir o zinco do revestimento antes da corrente de soldagem (corrente máxima) ser aplicada e conseguir um melhor contato entre as superfícies das chapas. Este primeiro pulso pode ser definido como tempo de queima do zinco e combina alto valor de corrente com um tempo de aplicação muito curto. Após o tempo de queima do zinco terminar, um pequeno tempo de pausa será aplicado com o intuito de deixar esfriar a chapa antes de aplicar a corrente de solda. Essas operações podem acontecer em milésimos de segundo, dependendo do processo de fabricação. [Intermachinery, 2002].

2.6.4 Efeito da resistência elétrica de contato

Existe uma relação entre a resistência elétrica de contato, corrente mínima de soldagem e vida útil do eletrodo. 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 mesma densidade de corrente, exigindo, desta forma, correntes de soldagem mais baixas.

Na soldagem por resistência de aços com revestimento de Zn por imersão a quente, a resistência de contato é consideravelmente menor do que em aços não revestidos por causa da alta condutividade elétrica do revestimento de zinco, sua relativa maciez e baixo ponto de fusão. As últimas características conferem um melhor contato elétrico e, portanto uma resistência elétrica inferior é criada entre as superfícies.

2.6.5 Outros fatores que influenciam na geração de calor

Mesmo que os parâmetros do equipamento estejam fixados em uma desejada condição há geralmente considerável variação na qualidade da solda. Isto ocorre devido à variação na corrente de soldagem causado pela mudança na condição de superfície da peça de trabalho, diâmetro da ponta do eletrodo e na impedância no circuito de solda [Chang et al., 1990], além de outros fatores como a limpeza superficial, os eletrodos.

A existência de corpos estranhos na superfície do material base, tais como, poeira, óxidos, óleos e graxas, fazem com que a resistência elétrica de contato entre a superfície da chapa e a face do eletrodo aumente. Se a resistência elétrica neste ponto for muito alta, na realização da solda, a temperatura nesta região aumentará tão rapidamente como na superfície de contato entre chapas. Nessas circunstâncias, os corpos estranhos se fundem ou são consumidos de diferentes formas e tempos ocasionando variações da resistência elétrica, o que pode resultar em variações na qualidade da solda assim com incrustações no eletrodo deteriorando-o.

A área da face do eletrodo é diretamente relacionado a densidade de corrente de soldagem. Com a deformação do eletrodo pelo uso o diâmetro da face aumenta, a pressão do eletrodo diminui e as resistências de contato também aumentam gerando mais calor na peça. Uma taxa de geração de calor maior será formada se a força do eletrodo for baixa já que a resistência elétrica de contato e a força de eletrodo variam inversamente [AWS, 1998].

No processo de soldagem o calor também é gerado na superfície de contato entre a ponta do eletrodo e a chapa. Esse calor e as soldas repetitivas fazem com que possam se formar incrustações que são deposições de material entre o cobre do eletrodo e o material base. Quando o material base soldado tem revestimento (Zinco, Alumínio ou outro tipo de revestimento) as incrustações acontecem mais rapidamente. Por exemplo, deposições de latão

na ponta do eletrodo, por sua menor condutividade elétrica e térmica, provocam rápido aquecimento do eletrodo ocasionando um desgaste prematuro do mesmo com as consequentes falhas nas dimensões do ponto de solda e na qualidade da solda.

2.6.6 Dissipação do calor

Durante a soldagem, o calor é perdido por condução para o metal base adjacente e para os eletrodos como mostrado na figura 2.7. A dissipação de calor se produz em taxas variáveis durante a aplicação da corrente assim como também após a corrente ter sido aplicada, até que a solda esfrie completamente.

Quando o material a ser soldado tem alta condutividade é necessária a compensação com o uso de alta corrente na soldagem, para produzir uma solda satisfatória e compensar as perdas de calor. A soldagem a ponto nestes materiais se torna muito difícil. Pode-se citar como exemplo a soldagem de chapas de alumínio revestidas com cobre ou alumínio com ouro ou prata.

Os eletrodos, ao permanecerem em contato com o material após a aplicação da corrente de soldagem ter cessado, auxiliam no arrefecimento do botão de solda. A taxa de dissipação de calor no metal base circundante decresce com tempos de soldagem mais longos porque um volume maior de metal base terá sido aquecido [AWS, 1998].

2.6.7 Influência da composição química do metal base

A resistividade elétrica de um metal influencia diretamente no aquecimento por resistência elétrica durante soldagem. Em metais de alta condutividade térmica tais como prata e cobre, pouco calor é desenvolvido mesmo sob altas densidades de corrente. A pequena quantidade de calor gerado é rapidamente transmitida para dentro do material circundante e para os eletrodos.

A composição de um metal determina seu calor específico, temperatura de fusão, calor latente de fusão e condutividade térmica. Estas propriedades governam a quantidade de calor requerida para fundir o metal e produzir uma solda.

Alguns elementos de liga ou combinações destes podem fornecer propriedades desejáveis à solda em aços baixo-carbono e aços baixa-liga de alta resistência. O fósforo, o enxofre, o titânio, o nitrogênio e o oxigênio, quando em excesso, favorecem a ruptura interfacial da solda quando esta é submetida ao ensaio de arrancamento. [AWS, 1998].

2.7 Problemas operacionais na soldagem a ponto

2.7.1 Materiais e espessuras das chapas dissimilares

Materiais dissimilares apresentam difícil soldabilidade em função de suas diferentes propriedades: condutividade, temperaturas de fusão, faixas de deformação plástica e pelas ligas que podem formar no botão de solda. O uso de um eletrodo com uma menor área e menor condutividade elétrica e térmica em contato com o material de maior condutividade tende a melhorar o balanço de calor. É conveniente fazer testes de soldabilidade preliminares para determinar a qualidade da solda obtida para um determinado projeto [RMWA, 1989].

2.7.2 Efeito Shunt

Em situações práticas, uma solda é feita após outra e, dessa forma, a solda adjacente afeta a qualidade da solda subsequente devido ao efeito de desvio da corrente que flui através de ponto de solda existente. Este efeito é o chamado efeito Shunt e é uma fonte de variação de qualidade [Chang, et. al., 1990].

Na figura 2.13 o metal entre os eletrodos se transforma em um divisor de corrente; O fluxo esperado pela corrente é passar pelo ponto que tenha a menor resistência elétrica. Quando se solda por resistência, vários pontos próximos parte da corrente passa pelo caminho “A” enquanto que o restante da corrente passa pelo caminho “B”. Se a distância de “A” é muito grande a resistência comparada com “B” será muito alta e o efeito Shunt será desprezível. Se a distância de “A” for pequena, uma apreciável porção da corrente total será desviada. Outro fator a se levar em consideração é que se no ponto “B” aumenta a temperatura, a sua resistência também aumenta adicionando o efeito de desvio para o caminho A [RMWA, 1989].

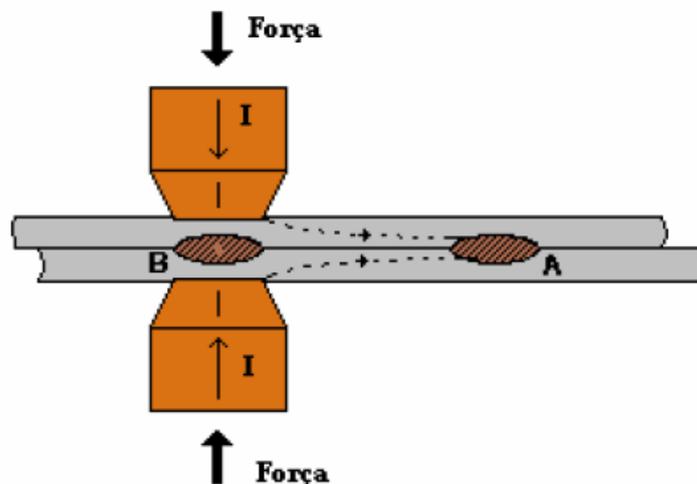


Figura 2.13 – Esquema do efeito Shunt [RMWA 1989, modificado]

2.7.3 Indentação

Ocorre quando a resistência à compressão do material em contato com o eletrodo diminui à medida que a fusão acontece, permitindo deste modo que a face do eletrodo deforme plasticamente a superfície da chapa do metal base. Esta indentação pode ser grande quando um eletrodo de área superficial pequena for empregado com pressão e densidade de corrente excessivamente altas. Além de prejudicar o aspecto da superfície das chapas, a indentação excessiva pode diminuir a resistência mecânica da solda.

Wu [1968] mostra no seu trabalho uma relação linear entre a corrente de soldagem e a indentação do eletrodo. A indentação varia com o material a soldar e a dureza da solda se incrementa com a indentação, em um nível aceitável, até a expulsão do material fundido acontecer. Wu sugere ainda a possibilidade de usar a indentação com um sentido de controle de solda a ponto o que poderia indicar ao operador a dureza do ponto de solda relacionada a uma dada especificação.

A indentação assimétrica, que usualmente produz uma aresta semicircular na periferia da solda, é causada ou pelo deslocamento lateral do eletrodo em relação à superfície ou por um eletrodo com o contorno da face simétrico que se aproxima da superfície de trabalho em ângulo. Deve ser observado que o eixo do eletrodo não tem que ser normal à superfície de trabalho caso a superfície da ponta do eletrodo tiver um contorno que propicie esta posição [AWS,1998].

2.7.4 Desalinhamento do eletrodo

Idealmente, os eletrodos devem estar alinhados durante a soldagem já que o desalinhamento produz características indesejáveis do processo, refletindo na qualidade da solda. O desalinhamento, seja axial ou angular, pode causar formas irregulares e medidas reduzidas do ponto de solda resultado de assimétricas distribuições da aplicação da força do eletrodo e da passagem de corrente. Um desalinhamento pode resultar de uma deflexão sob uma força aplicada durante o processo ou de montagem incorreta das pinças. Tal desalinhamento é geralmente ignorado na prática, mas ocasiona uma redução na área de contato o que afeta na densidade de corrente e uma errada distribuição de pressão devido à deflexão induzida [Tang et al., 2003].

Karagoulis [1994] afirma que com um desalinhamento de 40% do eixo dos eletrodos a área de contato diminui aproximadamente 50% da área total da face do eletrodo. Isto leva a uma maior densidade de corrente.

Quando o alinhamento de eletrodos é um problema, eletrodos esféricos são tipicamente recomendados [Gedeon 1984].

2.8 Controle da qualidade da solda

Uma prática geral no controle da qualidade em soldagem a ponto por resistência elétrica é baseada na análise das propriedades do ponto de solda e na uniformidade e consistência dos resultados. Um critério utilizado nos testes com uma dada amostragem é que os resultados aceitáveis estejam dentro de uma variação de 10% de tolerância em relação à média. [Metals Handbook. 1991].

Tipicamente, a resistência de uma junta produzida por solda a ponto é geralmente relacionada às características físicas e geométricas devido a medida do botão de solda, da ZAC, da indentação e das propriedades do material. De qualquer forma as medidas do botão de solda têm sido extensivamente relacionadas com a resistência da junta [Zhou, et. al., 2003].

Existe uma diversidade de medidas recomendadas pelos autores consideradas como dimensão ótima do ponto de solda, a forma mais utilizada   considerar o diâmetro do ponto como demonstrada na equa o 2, como aproxima o inicial.

$$D = 5\sqrt{t} \quad (2)$$

Sendo t = espessura da chapa. Segundo Zhou [2003] e AWS [1998] o maior diâmetro útil do ponto de solda   difícil de especificar em termos gerais. Outra referencia encontrada cita que cada usuário pode estabelecer seus limites de acordo com os requisitos do projeto e a experiência prática [Intermachinery, 2002].

A mínima profundidade (indenta o)   geralmente aceita como 20% da espessura da chapa mais fina. Se for menor que este valor, a solda   dita de “fria” por motivo do calor gerado na zona de solda ser muito baixo. O máximo valor da profundidade não deve ultrapassar o 80% da chapa mais fina. Grandes profundidades de indenta o resultam em expulsão e rápido desgaste do eletrodo [AWS, 1998]. J  Wu [1968] afirma que indenta o entre 5% – 10% da espessura da chapa garantem uma boa resistência mecânica d solda. Zhou, [2003] utilizando simula o computacional observou que a medida da ZAC tem um papel importante na análise da resistência da solda devido a altas concentra o de tensões dentro e ao redor da ZAC. Espessura da chapa (produzindo maior ponto de solda), resistência do metal base, além da ZAC, são os parâmetros críticos para determinar a qualidade de um ponto de solda.

2.8.1 Métodos para avaliar a qualidade da solda

Uma solda por resistência pode ser examinada usando procedimentos de ensaios destrutivos e não destrutivos. As dificuldades inerentes aos ensaios não destrutivos, como inspeção por ultrassom ou RX em peças pequenas e com pontos de solda tão próximos, são amplamente conhecidas. Além disso, um procedimento de amostragem segundo o qual um número determinado de corpos de prova testados por destruição não garante que todas as soldas tenham a qualidade desejada, uma vez que as condições de soldagem podem variar de uma solda para outra por muitas razões [Andrews, 1975].

Estes testes são ensaios mecânicos utilizados para se obter informações quantitativas sobre o comportamento mecânico de pontos de solda.

Satonara [2000] 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.

Dentro da ideia de monitorar o processo de solda a ponto, sensores são dispostos ou montados sobre a máquina de solda. A corrente é monitorada por um toróide (bobina) e a tensão através da diferença de potencial na ponta dos eletrodos, nas pinças ou porta-eletrodos e na carcaça da máquina perto do transformador [Needham, 1983].

Needham [1983] mostra que a medição da tensão na ponta dos eletrodos proporciona menores distorções nos sinais elétricos adquiridos.

Uma outra técnica de monitoração é a de filmagem. Cho [2003] fez filmagem com câmera digital de alta velocidade observando os efeitos dos parâmetros do processo na formação e desenvolvimento do botão de solda.

O estudo da transferência metálica em solda utilizando o método *synchronized Shadowgraphy* proposto por Balsamo [2000], é um exemplo das técnicas criadas para melhorar a qualidade da solda.

2.8.1.1 Inspeção Visual

A superfície de um ponto de solda deve ser uniforme na forma, relativamente plana e 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 a ocorrência de funcionamento fora do especificado do equipamento. Entretanto, a aparência superficial não é sempre um indicador confiável da qualidade da solda já que o desvio de corrente e outras causas de aquecimento insuficiente ou penetração inadequada, usualmente, não deixam efeitos visíveis nas chapas.

O aquecimento inerente aos processos de soldagem, além de prejudicar o aspecto da superfície, podem dar a impressão de que a solda é de baixa qualidade. Um caso típico é a descoloração em torno da solda, evidente em aços inoxidáveis ou com camadas de revestimento, que não pode ser eliminado.

2.8.1.2 Ensaio não destrutivos

Um ensaio que tem sido cada vez mais utilizado para inspeção de soldas é o ensaio ultra-sônico. Nesse ensaio a qualidade da solda é avaliada pela observação da forma da onda sonora, que foi previamente aplicada, quando esta retorna ao se deparar com algum obstáculo. A desvantagem deste tipo de ensaio é a complexidade das formas de ondas resultantes com consequente dificuldade de interpretação dos resultados, o que pode demandar muito tempo, sendo incompatível em uma linha de montagem. E os botões de solda precisam ter uma distância mínima de 0,8 mm e um diâmetro mínimo de 2 mm para gerar gráficos e respostas confiáveis. (Stocco, 2010). Raios infravermelhos e emissões acústicas são outras técnicas que podem ser utilizadas, mas ainda são caras e demandam muito tempo.

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que se baseia na absorção da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante [Nascimento, 2012].

Atualmente têm sido desenvolvidas técnicas de acompanhamento on-line do processo através do monitoramento em tempo real de parâmetros como a corrente e tensão de soldagem, resistência dinâmica e força do eletrodo, além do monitoramento do crescimento e da formação do botão de solda, que permitem associar variações inesperadas a defeitos.

2.8.1.3 Ensaios destrutivos

Nestes ensaios a qualidade da solda é determinada pelas informações obtidas sobre um grupo de amostras aleatórias na quais são realizados ensaios para avaliação da resistência do ponto.

2.8.1.3.1 Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento consiste na aplicação de forças de separação das duas peças unidas conforme ilustrado na Figura 2.14. Estas forças são opostas e agem em uma direção paralela à superfície da peça.

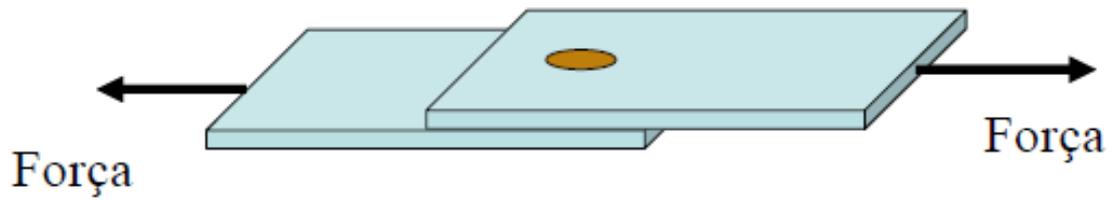


Figura 2.14 – Ensaio de cisalhamento

O corpo-de-prova é carregado até que ocorra ruptura em uma máquina de ensaio de tração. As dimensões do corpo-de-prova para este teste são especificados pela norma AWS/SAE 8.9M [2002]

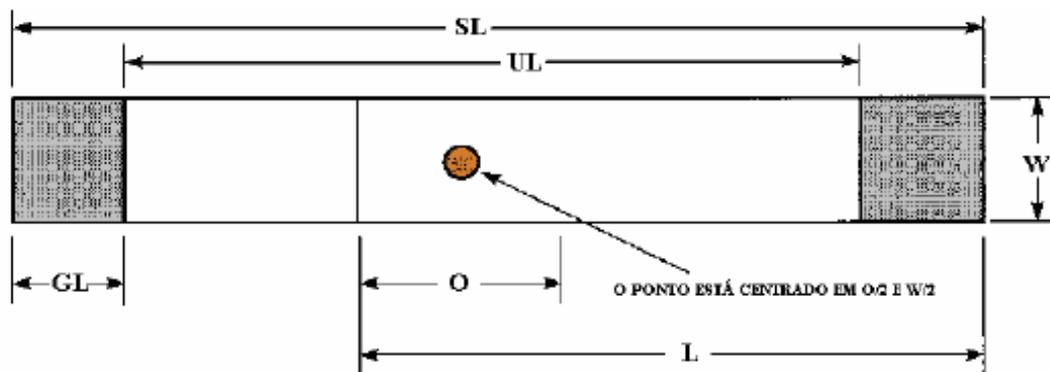


Figura 2.15 – Dimensões padrões da SAE para avaliar pontos de solda [AWS/SAE D8.9:2002, modificado]

São apresentadas na Tabela 2.2. 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 que, em chapas de até 2 mm de espessura deve apresentar arrancamento do botão de solda de uma das chapas.

Tabela 2.2 - Dimensões dos corpos-de-prova para teste de tensão cisalhante [AWS/SAE D8.9:2002, modificado]

Espessura da chapa (mm)	Comprimento da chapa (L) (mm)	Largura (W) (mm)	Superposição (O) (mm)	Comprimento total (SL) (mm)	Comprimento livre (UL) (mm)	Comprimento a segurar (GL) (mm)
0,60 – 1,29	105	45	35	175	95	40
1,30 a 3,00	138	60	45	230	105	62.5

A junta soldada, quando submetida a tensões cisalhantes, pode falhar, o que é relacionado à baixa resistência do botão de solda, ou pelo rompimento do metal base adjacente ao botão, o que é associado com alta resistência da solda (Figura 2.16). Exige-se, em geral, um diâmetro de botão de solda inicial conforme a equação 2 para que a falha por rompimento do metal base não ocorra. Entretanto esse diâmetro pode ser diferente da aproximação inicial, dependendo da finalidade a que a junta soldada se destina [Intermachinery, 2002].

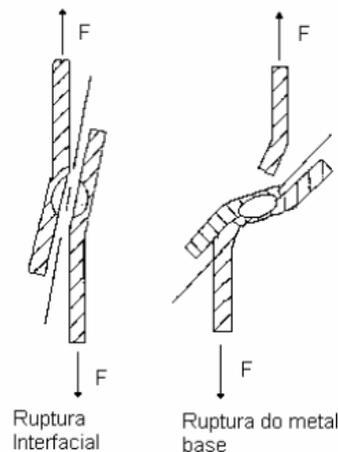


Figura 2.16 - Tipos de falha em ensaios de resistência ao cisalhamento como função da rotação do corpo-de-prova [adaptado de AWS 1998].

A resistência ao cisalhamento das soldas aumenta rapidamente no intervalo entre os níveis de corrente de soldagem mínima e aqueles que provocam expulsão de material. Resultados mostram que a resistência ao cisalhamento ainda é mantida em correntes acima do limite de expulsão de modo que soldas aceitáveis em termos de resistência ainda são obtidas. Entretanto, a expulsão é indesejável por uma série de razões, entre elas a segurança do operador e o risco de incêndio. Também deve ser evitada porque acredita-se que ela reduz a vida da ponta do eletrodo e isto é de importância fundamental quando se solda aços com revestimento metálico. É recomendado, portanto, soldar numa corrente um menor daquela que provoca expulsão de material [Intermachinery, 2002].

A dureza da zona de fusão exerce algum efeito na resistência ao cisalhamento, mas ela contribui ainda mais para a falha na solda quando esta é submetida a impacto ou vibração. Para esta situação, uma dureza excessiva pode resultar em falhas devido a trincas e fadiga. Em alguns casos é empregado um intervalo de pós solda com a finalidade de evitar um esfriamento muito rápido do material onde as trincas podem aparecer [Intermachinery, 2002].

2.8.1.3.2 Ensaio de tração axial

Neste ensaio a solda é carregada na direção normal à superfície do material. O procedimento adotado a nível industrial pode ser visto na figura 2.17. O corpo-de-prova é dividido em três regiões iguais e suas bordas são dobradas a 90° em um dispositivo adequado formando um “U”. Este corpo-de-prova é soldado a um outro corpo-de-prova com a mesma forma, formando uma estrutura em forma de “H” e o conjunto assim formado é, então, tracionado axialmente.

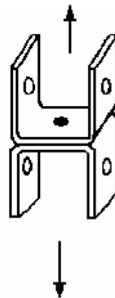


Figura 2.17 - Formato do corpo-de-prova utilizado no ensaio de tração axial [Intermachinery, 2002].

2.8.1.3.3 Ensaio de torção

O procedimento utilizado é o mesmo descrito para o ensaio de cisalhamento, sendo que o corpo-de-prova é levado a um dispositivo adequado para sofrer torção. Após a ruptura, o ponto de solda fica aderido a uma das chapas e recebe o nome de botão de solda, cujo diâmetro é medido por um paquímetro.

2.8.1.3.4 Teste de arrancamento

É o tipo de teste mecânico mais comumente usado em soldas a ponto. Ele é usado para determinar a soldabilidade a ponto em todas as espécies automobilísticas. Existem várias razões para o amplo uso deste teste: (a) facilidade de execução, (b) baixo custo, (c) utilização em chão de fábrica como um teste de controle de qualidade.

Neste teste, após os corpos-de-prova terem sido soldados, eles são levados a um dispositivo de fixação e com auxílio de uma ferramenta apropriada, são dobrados fazendo-se o arrancamento do botão, como pode ser observado na Figura 2.18(a). Em seguida mede-se com um paquímetro o diâmetro do botão de solda em duas direções perpendiculares. A qualidade da solda é avaliada pelo diâmetro do botão de solda que ficará aderido a uma das partes após separação [Powell, et. al., 1996].

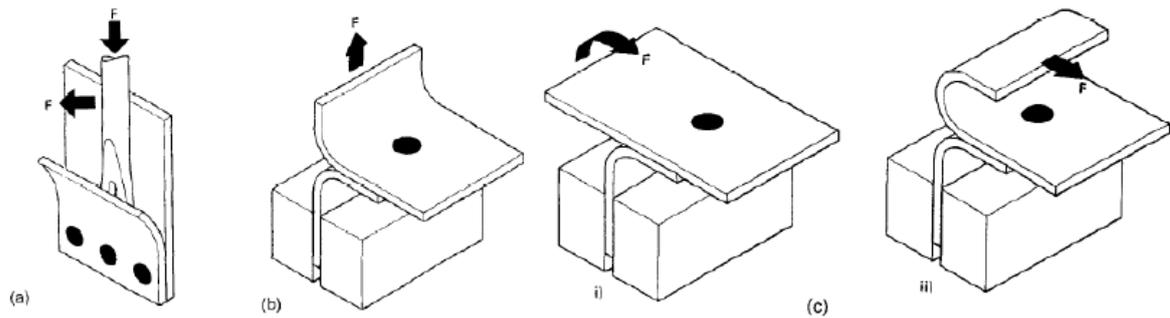


Figura 2.18 – Rotina de testes para arrancamento: a) Com chave tipo pé de cabra, b) Teste mecânico e c) Teste tipo descascamento [Powell, et al 1996, modificado].

2.8.1.4 Análise metalográfica

A análise metalográfica também pode ser utilizada para medir o diâmetro do botão de solda. O corpo-de prova é submetido ao teste de torção e o botão de solda é lixado e polido e levado ao microscópio para a determinação de seu diâmetro [Intermachinery, 2002].

2.9 Metalurgia da soldagem

2.9.1 União de materiais dissimilares

Os materiais compostos representam uma classe emergente de materiais cujo conjunto peculiar de propriedades lhes confere o status de fortes candidatos à substituição, a médio-longo prazo, de diversas ligas e materiais tradicionalmente utilizados em aplicações estruturais a média e alta temperatura, bem como em aplicações não estruturais em que as propriedades elétricas, térmicas, magnéticas e a resistência à corrosão destes compostos são fundamentais [Djanarthany, 2001 e Stoloff, 2000].

2.9.2 Soldagem entre, aço, níquel e ouro em alumínio.

Jones [1997] realizou um estudo sobre a soldagem de um fio de aço recoberto com níquel e uma camada fina de ouro, entre 40 a 50 μm a uma chapa de alumínio. As peças foram unidas através de solda por resistência a ponto, sendo possível realizar a união dos materiais de forma satisfatória. Após a realização dos experimentos ele afirma que o pesquisador deve estar ciente dos riscos provenientes da geração de compostos intermetálicos de alumínio com ouro, mas deve arriscar e usar peças fabricadas usando esta técnica de união. A união entre esses materiais é inovadora, e por se tratar de um estudo com poucas

referências, existem muitas variáveis desconhecidas, que devem ser testadas e avaliadas com muito critério.

As conclusões do trabalho de Jones [1997], indicam que o revestimento de ouro sob o fio de aço soldado ao alumínio foi completamente removido, ocorrendo à união entre o fio e a chapa de alumínio. Durante a soldagem o ouro combinou-se ao alumínio deformado em torno da solda, formando o composto intermetálico $AuAl_3$, uma fase que observada em microscópio ótico apresentou uma coloração roxa.

O método utilizado por Jones para avaliar a qualidade da solda foi o de microscopia acústica em paralelo com DPA (*Destructive Physical Analysis*), segundo o autor este são considerados os métodos mais indicados para garantir os níveis de confiabilidade requeridos.

2.10 Geração de *Whiskers*

Whiskers são filamentos que crescem espontaneamente a partir de superfícies de estanho. O crescimento começa após um período de incubação que varia de segundos a anos. O típico *whisker* de forma gama tem diâmetros entre 1 a 5 micrômetros com comprimentos variáveis, podendo chegar a 5 milímetros. As taxas de crescimento do *whiskers* de estanho, sob condições normais, variam em torno de 30 a 3 μm por ano [Galyon, 2003].

Os *Whiskers* são bons condutores de eletricidade e devido à pequena distância entre as trilhas de circuitos eletrônicos, geram danos se desprenderem da sua base, ou encostarem em outro componente podendo em alguns casos tornar o sistema inoperativo ou com o acionamento de forma imprevista. Ligas de estanho têm sido amplamente utilizados na indústria eletrônica, e problemas de *whiskers* são sempre uma preocupação e um problema. A relatos de *whiskers* relacionados à falhas eletrônicas devido ao estanho puro, sem qualquer teor de chumbo. [Galyon, 2003]

No passado, chumbo (Pb) era adicionado ao estanho (Sn) reduzindo o aparecimento dos *whiskers*. No entanto, em 1 de julho de 2006, a União Européia impôs a redução de substâncias perigosas (RoHS), que exige a remoção de chumbo de componentes eletrônicos, expondo assim uma nova geração de equipamentos eletrônicos à possibilidade de grandes taxas de falha em serviços de campo. A preocupação com problemas relacionados com a ocorrência de *whiskers* levou a NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative) a desenvolver diversos projetos relacionados ao assunto, com o objetivo de melhor

compreender o problema e recomendar as medidas adequadas à sua solução, [Galyon 2003, Galyon e Palmer 2004].

2.11 A remoção do chumbo nos metais base

As ligas compostas por chumbo e estanho são as que apresentam os melhores desempenhos a menores custos. Porém, são inadequadas dos pontos de vista ambiental e de saúde pública, em virtude da toxicidade do Pb.

A intoxicação pelo Pb pode ocorrer por exposição ocupacional, pela utilização de soldas e em atividades industriais, por ingestão, inalação ou contato. Níveis elevados de Pb são capazes de causar diversas moléstias, como saturnismo e danos nos sistemas cardiovascular, nervoso, reprodutivo, hematológico e renal, [Lauricella, 2010].

Segundo Moreira e Moreira [2004], o chumbo produz efeitos em muitos processos bioquímicos, incluindo a síntese da heme, o sistema hematopoético e a homeostase do cálcio. Os ossos são os maiores depósitos de chumbo do organismo. A encefalopatia é um dos desvios tóxicos mais sérios provocados pelo chumbo, levando a disfunções psicológicas e neurocomportamentais. A consequência do chumbo sobre o coração é indireta, pelo sistema nervoso autônomo e não diretamente sobre o miocárdio. O chumbo causa nefropatia com disfunção tubular renal reversível (crianças sob exposição aguda) e nefropatia intersticial irreversível (trabalhadores expostos ocupacionalmente). A gota saturnínica resulta da diminuição da função tubular, pois o chumbo interfere na excreção dos sais de ácido úrico. Nos homens os efeitos do chumbo no sistema reprodutivo limitam-se à morfologia do esperma e à sua contagem. Nas mulheres, o chumbo pode causar danos fetais, pois atravessa a barreira placentária, aumentando o risco de nascimento prematuro e de peso e altura reduzidos ao nascer. Os efeitos gastrintestinais ocorrem em indivíduos ocupacionalmente expostos ou com exposição aguda a níveis elevados de chumbo, sendo que a cólica é uma manifestação precoce dessa intoxicação. A anemia apenas é evidente se os níveis de Pb-S mantiverem-se elevados por períodos prolongados.

2.12 Excesso de solda

Tão importante quanto a corrente em si, a densidade de corrente na região de passagem de corrente na chapa também deve ser observada. Os limites superior e inferior 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 [Podrzaj e Kariz, 2005]. Machado [1996] sugere como regra prática, para que o processo possa ocorrer no menor tempo possível e produzir pontos com a mais alta resistência mecânica, que se deve determinar a densidade de corrente máxima (D) exatamente anterior aquela que provocaria expulsão, a qual pode ser estimada pela equação 3 deduzida empiricamente:

$$D = 192 + 480 \times e^{-t} \quad (3)$$

Onde t é a espessura da chapa mais fina em milímetros. Ou seja, ao se calcular a densidade de corrente limite, é possível a partir do diâmetro de ponto desejado calcular a corrente máxima ou a partir da corrente, achar o diâmetro mínimo do ponto que permita uma boa resistência mecânica com a menor quantidade de respingos de solda.

2.13 Método Taguchi / projeto robusto

A técnica denominada Projeto Robusto, desenvolvida por Taguchi, é uma ferramenta poderosa para encontrar parâmetros adequados de produtos ou processos em pouco tempo. Ela visa determinar as variáveis (denominadas de fatores) que mais influenciam a variabilidade do processo ou produto. O controle destes fatores garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho [Ross, 1991].

O método Taguchi pertence a uma classe de abordagens que visam assegurar a qualidade através do projeto, neste caso através da identificação e controle de variáveis críticas (ou ruídos) que fazem ocorrer desvios na qualidade do produto e/ou processo [Vieira, 1996].

O projeto robusto pode ser definido como um conjunto de conceitos, estratégias e métodos que utiliza o conhecimento existente de engenharia para realizar os seguintes benefícios:

- Melhoria da Qualidade;
- Minimização do custo;
- Minimização do tempo de desenvolvimento.

Segundo Ross [1991], para se alcançar a robustez, esforços de controle de qualidade devem começar na fase de projeto de produto e continuar durante as fases de engenharia de produção e fabricação.

2.13.1 Desenvolvimento do Projeto Robusto

Os níveis (valores) de fatores controláveis (parâmetros do projeto) são selecionados para minimizar os efeitos de fatores perturbadores nas características funcionais do produto, ou seja, determinam-se os níveis dos diferentes parâmetros que dão ao produto as suas qualidades funcionais e que minimizam a perda de qualidade. Em outras palavras, procura-se estabelecer os níveis dos parâmetros do produto de modo que a característica de qualidade deste torne-se insensível ou robusta às fontes de variação (fatores de ruído), mantendo o valor médio da resposta sobre o valor objetivo de maneira consistente, obtendo alto desempenho e baixo custo, simultaneamente [Ross, 1991; Vieira, 1996].

O projeto de experimentos (DOE, *design of experiments*) é um método estatístico que ajuda a identificar os fatores que podem influenciar variáveis específicas de um produto ou processo em desenvolvimento ou em produção. Ele também desempenha um papel importante na otimização de produtos ou processos.

O aspecto mais importante dessa técnica é que ela fornece uma estrutura estatística para alterar sistematicamente todos os fatores importantes que estão sendo avaliados, em vez de alterar um fator de cada vez como descrito por Domenech [2004]. A análise dos dados experimentais deve fornecer as condições “ideais” para o produto ou processo, realçando os fatores que influenciam os resultados e revelando a presença de interações entre os fatores.

O planejamento fatorial de um experimento é um procedimento em que são variados sistematicamente os fatores controláveis de entrada, de modo que possam ser avaliadas as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações [Domenech, 2004]. O uso potencial de planejamento fatorial de dois níveis parte da hipótese de linearidade entre os efeitos dos fatores. Naturalmente, não é necessário uma linearidade perfeita, e o sistema 2^k funcionará muito bem mesmo quando a hipótese de linearidade se verificar apenas aproximadamente. De fato, observa-se que quando se acrescenta um termo de interação a um modelo de efeitos principais, introduz-se curvatura na superfície de resposta. Como o planejamento 2^k suportará um modelo de efeitos principais mais interações, alguma proteção contra a curvatura já é inerente ao planejamento.

2.13.2 Projeto dos Parâmetros

A resposta do produto considerada para o propósito de melhorar os processo produtivo em um delineamento de experimento robusto é chamada de característica de qualidade. Vários parâmetros podem influenciar a característica de qualidade ou resposta do produto. Estes parâmetros classificam-se dentro de três classes, os fatores de sinal, os fatores de ruído e os fatores de controle.

Os fatores de sinal (M) é o grupo de parâmetros para o usuário ou operador expressar o valor pretendido para a resposta do produto. Os fatores de sinal são selecionados pelo engenheiro de projeto baseado no conhecimento da engenharia do produto que está se desenvolvendo.

Certos parâmetros não podem ser controlados pelo projetista, sendo estes parâmetros chamados de fatores de ruído (X).

Os fatores de controle (Z) são parâmetros que o projetista pode especificar livremente. De fato, é responsabilidade do projetista determinar o melhor valor destes parâmetros. Cada fator de controle pode ter múltiplos valores, chamados níveis.

Quando se muda os níveis de certos fatores de controle, o custo de fabricação não muda. Identificar respostas importantes, fatores de sinal, fatores de ruído e fatores de controle em um projeto específico são questões importantes. Em um Delineamento de Projeto Robusto é também importante reconhecer quais fatores de controle mudam o custo de fabricação. A melhor situação, dos parâmetros que não afetam o custo de fabricação, é determinada através do projeto do parâmetro.

A razão entre o sinal (S) e o ruído (R) é a função objetiva empregada no Método Taguchi. O uso da razão S/R obtendo o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, tem a vantagem deste ajuste também ser válido para outro valor médio do parâmetro.

a) Sinal/ Ruído

Os parâmetros de controle que contribuem na redução de variação (aperfeiçoamento da qualidade) podem ser rapidamente identificados observando o quanto de variação aparece como resposta. A metodologia Taguchi idealiza uma transformação dos dados da repetição em outro valor, que representa a variação da medição existente. Designa-se a transformação como relação sinal-ruído (S/R) ou função objetiva. A função objetiva para ser maximizada, nas resoluções dos problemas estatísticos de projeto de processo/produto, tem que ser

escolhida corretamente. As diversas relações S/R disponíveis, de acordo com o tipo de característica são: menor é melhor (mM), maior é melhor (MM) e nominal é melhor (NM). Cada característica tem a equação específica para o cálculo da taxa S/R [Ross, 1991].

Para este trabalho foram utilizadas as seguintes características:

- Problema do tipo Menor é melhor, usado quando se deseja minimizar os resultados, conforme descrito pela equação 4:

$$S / R_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

onde n é igual ao número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído), y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

Como exemplo de menor é melhor pode-se citar o número de defeitos de uma peça, os índices de convexidade e respingos durante uma soldagem.

- Problema do tipo Maior é melhor. Usado quando se deseja maximizar os resultados, sendo determinada pela equação 5:

$$S / R_L = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right) \quad (5)$$

Como exemplo de aplicação da função maior é melhor pode-se citar o rendimento de um equipamento, as taxas de fusão e deposição, o índice de penetração, a diluição e a qualidade do cordão de solda na soldagem.

Assim, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que maximizam o S/R apropriado para cada análise estatística específica.

b) Parâmetros de Controle e de Ruído

A Metodologia Taguchi distingue os parâmetros em dois grupos principais: parâmetros de controle e de ruído. Parâmetros de controle são aqueles estabelecidos pelo fabricante e que não podem ser diretamente modificados pelo consumidor. Parâmetros de ruído são aqueles sobre os quais o fabricante não possui controle direto, mas que variam de acordo com o ambiente e hábito do consumidor.

Parâmetros de ruído podem ser classificados em três categorias:

1. Ruídos externos são aqueles relacionados aos fatores ambientais como temperatura ambiente, umidade, pressão ou pessoas. Ruídos externos provocam variações externamente ao produto;

2. Ruídos internos estão relacionados com a função e com o tempo, tais como deterioração, desgaste, desaparecimento gradual da cor, encolhimento e ressecamento; ruídos internos causam variação no interior do produto;

3. Ruído do produto manifesta-se como variação de peça para peça. São ocasionados durante a fabricação, mudando uma determinada característica entre dois ou mais produtos.

2.13.4 Arranjo Ortogonal

O arranjo ortogonal (AO) facilita e reduz o número de experimentos. As colunas da matriz representam os fatores a serem estudados e as linhas os experimentos que serão realizados. Na matriz ortogonal, colunas podem ser deixadas vazias (que correspondem às variáveis a serem estudadas) sem prejuízo na análise. Linhas vazias, que corresponde deixar de realizar algum experimento, prejudica a ortogonalidade e compromete a análise e a confiabilidade dos experimentos [Vieira, 1996].

A seleção do arranjo ortogonal a ser utilizada depende: do número de fatores e interações de interesse e do número de níveis para estes fatores de interesse. Estes dois itens determinam os graus totais de liberdade exigidos para todos os experimentos. Os graus de liberdade para cada fator consistem no número de níveis menos um, conforme a equação 6.

$$v_A = \kappa_A - 1 \quad (6)$$

Onde κ é o número de níveis do fator A e v , o grau de liberdade do fator A). O número de graus de liberdade para uma interação é o produto dos graus de liberdade dos fatores nessa interação conforme a equação 7.

$$v_{AXB} = v_A v_B \quad (7)$$

Por equação é deduzido que os graus de liberdade mínimos exigidos em série de experimentos consistem na somatória de todos os graus de liberdade de fator e interação.

O número na designação do arranjo indica o número de graus de ensaios contidos no mesmo, sendo o número de graus de liberdade disponíveis num certo arranjo equivalente ao número de ensaios menos um (o arranjo L8 possui 7 graus de liberdade disponíveis) [Ross, 1991].

Por exemplo, a Tabela 2.3 é chamada de arranjo de distribuição ortogonal L8 (27) ou simplesmente de arranjo ortogonal L8.

Tabela 2.3 – Matriz ortogonal L8.

Projeto Robusto							
Experimento	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

O número à esquerda de cada fila é chamado de número do experimento ou número da distribuição, e vai de 1 a 8. Os alinhamentos verticais são chamados de colunas do arranjo ortogonal, e todas as colunas contêm quatro vezes os numerais 1 e 2. Quando cada uma das duas colunas consiste de numerais 1 e 2 e as quatro combinações (11), (12), (21) e (22) aparecem com a mesma freqüência, diz-se que estas duas colunas estão balanceadas ou são ortogonais. Existem outros arranjos ortogonais como o arranjo ortogonal L8. Entre os arranjos ortogonais mais freqüentemente usados estão o L9, L16, L18, L27 e L32. Para os propósitos deste trabalho foi utilizado o arranjo ortogonal L16.

2.14 Experimentação e análise

A metodologia do Delineamento Robusto permite ao engenheiro gerar as informações necessárias para tomar decisões com pouco esforço experimental. O mensuramento da qualidade durante o projeto e desenvolvimento e a experimentação eficiente para encontrar informações confiáveis sobre os parâmetros de projeto são duas importantes questões para serem desenvolvidas no Delineamento Robusto [Vieira, 1996].

Diversos autores com pequenas alterações nos termos e/ou nas etapas a serem seguidas, mostram como se realiza o delineamento de experimentos pelo método Taguchi. [Pan et al, 2005; Antony et al, 1999; Vieira, 1996; Ross, 1991; Montgomery, 1984;] De forma sucinta as principais etapas são definir o objetivo, identificar as variáveis significativas, definir os ruídos aceitáveis, realizar o experimento e fazer a confirmação.

A definição da meta é importante para saber quais são os limites desejáveis. Procura-se nesta etapa determinar os fatores mais importantes que afetam as características da qualidade (ou respostas) e conseqüentemente reduzir a variabilidade nas respostas.

Após identificado o objetivo do experimento é então selecionada as características de qualidade, nesta etapa são definidas as respostas apropriadas para o experimento. As respostas de interesse mostram as características que se quer obter do produto/processo analisado.

A Identificação dos fatores de controle e S/R é a seleção de fatores que podem influenciar as características da qualidade bem como a seleção dos níveis dos fatores que podem ser controlados sob condições normais de produção. A seleção de fatores ruídos. Fatores ruídos são aqueles que causam variação no desempenho funcional do produto/processo. O Fator sinal é aquele que afeta somente a média do processo/produto

Seleção apropriada do arranjo ortogonal (AO) deve ser de acordo com o número de fatores e seus níveis que encaixe perfeitamente com o pretendido para o estudo, com economia de tempo, trabalho e número de ensaios.

Na etapa de preparação experimental são elaboradas as matrizes de projeto codificadas e decodificadas para o experimento e análise dos resultados respectivamente. Na metodologia Taguchi o objetivo sempre é reduzir a variabilidade nas respostas. O S/R é uma medida do desempenho da variabilidade do produto/ processo na presença dos fatores ruídos. A idéia é maximizar o S/R e, desse modo, minimizar os efeitos dos fatores ruídos. Essa etapa é de a análise estatística e interpretação dos resultados

A ultima etapa é da confirmação experimental, em que alguns ensaios são feitos para a condição ótima e comparados com os resultados previstos por Taguchi, para concluir se são satisfatórios e válidos, [Gomes, 2006]

Com base no DOE (*design of experiments*) que é uma metodologia de experimentação, onde todas as variáveis controladas são modificadas simultaneamente. É feita a medição dos resultados nas variáveis de saída com o objetivo de manter um modelo empírico da relação $y=f(x)$. A sequência aleatória de ensaios para a utilização do DOE evita a influência de variáveis não controladas que poderiam introduzir vícios nas conclusões [Domenech, 2004]. Esta ferramenta apresenta grande vantagem, pois todas as variáveis controladas são modificadas simultaneamente ao contrário do método OFAT (One Factor at the Time) onde é analisada uma variável de cada vez. Este procedimento aumenta a chance de obtenção de resultados mais representativos, já que uma variável sendo estudada isoladamente talvez não mostre o

efeito que realmente tenha no resultado final do processo, do que quando ela é estudada simultaneamente com as outras variáveis.

Os elementos que compõem a metodologia são: os fatores controlados, que são as variáveis que podem ser modificadas durante os experimentos para determinar a influência nas saídas; os fatores não controlados, que são as variáveis que deveriam permanecer constantes durante os experimentos, mas de alguma forma variam alterando as saídas; e as respostas que são as saídas que deverão ser otimizadas. Além do modelo que consiste na equação que relaciona as respostas com as variáveis do processo. O exemplo da metodologia esta descrita na figura 2.19.

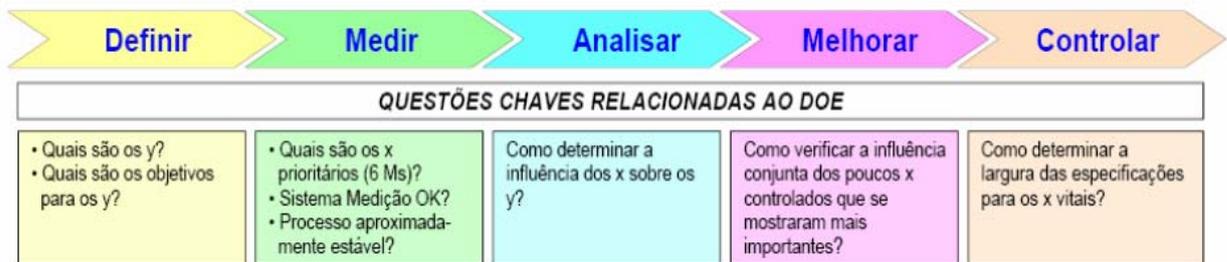


Figura 2.19 – Etapas do DOE [Domenech, 2004].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A soldagem de materiais dissimilares foi estudada tomando por base a aplicação em um produto em desenvolvimento para a indústria eletrônica: um capacitor eletrolítico, onde uma das chapas contém revestimento superficial formado por camadas de diferentes materiais. O corpo do capacitor é composto por uma carcaça de alumínio com espessura de 0,2 mm produzida através do processo de extrusão. O alumínio é da serie 1200 com percentual mínimo de 99,7% Alumínio.

3.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram as próprias peças que compõem o capacitor. A chapa a ser soldada ao corpo do capacitor é de aço ABNT 1010 com 0,6 mm de espessura, recoberta através do processo de *clad* por uma camada de cobre, que é revestida de níquel por eletrodeposição e, na camada mais externa, recoberta com uma fina camada de ouro com espessuras de 0,5 a 1 μm . Na figura 3.1 é mostrado um desenho esquemático desta chapa.

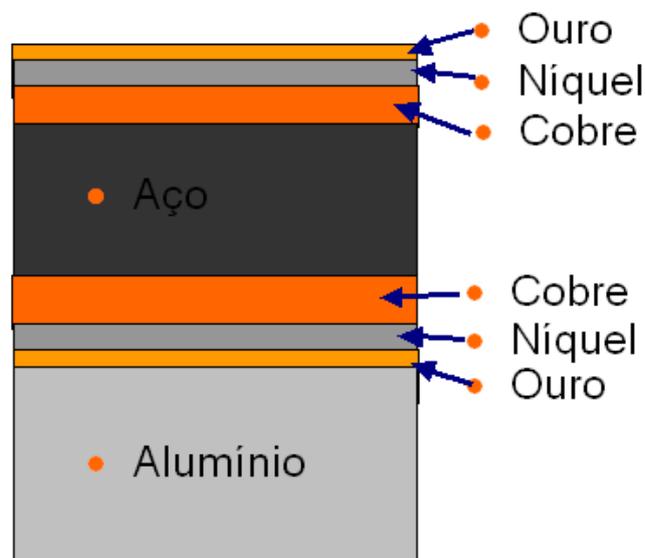


Figura 3.1 – Desenho esquemático das camadas da chapa de aço a ser soldada no capacitor (alumínio).

A chapa de aço recoberta soldada ao corpo do capacitor tem o objetivo de garantir a obtenção de um componente com alta condutividade elétrica associada à alta resistência mecânica. O componente soldado resultante deve ser capaz de suportar acelerações da ordem de 40 G, apresentar capacitância de 6000 μF e poder ser submetido à diferenças de potencial

de 25 V. Para efeito comparativo, um capacitor convencional resiste a, no máximo, 20 G para as mesmas propriedades elétricas.

O uso de materiais diferentes para revestimento da chapa soldada visa evitar a ocorrência de *whiskers*, a que todas as peças que contem estanho sem chumbo estão sujeitas e que consiste na geração de pequenos filamentos de estanho na ordem de 500 μm que podem produzir curto-circuitos nas placas eletrônicas, conforme descrito no item 2.10. A utilização de chapas de aço revestidas possibilita reduzir a geração desses filamentos.

A alma da chapa é de aço para garantir maior rigidez e suportar os esforços mecânicos, o níquel é um elemento que facilita a união entre o cobre e o ouro, além de apresentar características elétricas desejáveis e evitar o problema de *whiskers*. O cobre é utilizado por ser um excelente condutor elétrico, garantindo elevada densidade de corrente elétrica por um curto espaço de tempo. O corpo do capacitor é feito de alumínio devido à condutividade elétrica aliada a suas propriedades mecânicas.

A principal vantagem deste capacitor é a possibilidade de redução de falhas em circuitos eletrônicos, pois deve suportar acelerações, impactos, temperatura de operação de até 150° C, sem geração de *whiskers* e, se comparado a outros componentes com as mesmas propriedades capacitivas, será mais compacto e confiável.

Produtos com essas propriedades possuem inúmeras aplicações, como por exemplo, *air bags*, sistemas de freio, direções eletrônicas, controle de injeção eletrônica sobre o próprio motor (pois suporta a vibração do motor), máquinas agrícolas, projetos aeroespaciais e em outras situações nas quais se necessita de uma placa eletrônica em locais que sofrem acelerações constantes ou em sistemas eletrônicos que não podem falhar. Na figura 3.2 é possível ver o produto soldado e o detalhe da projeção.

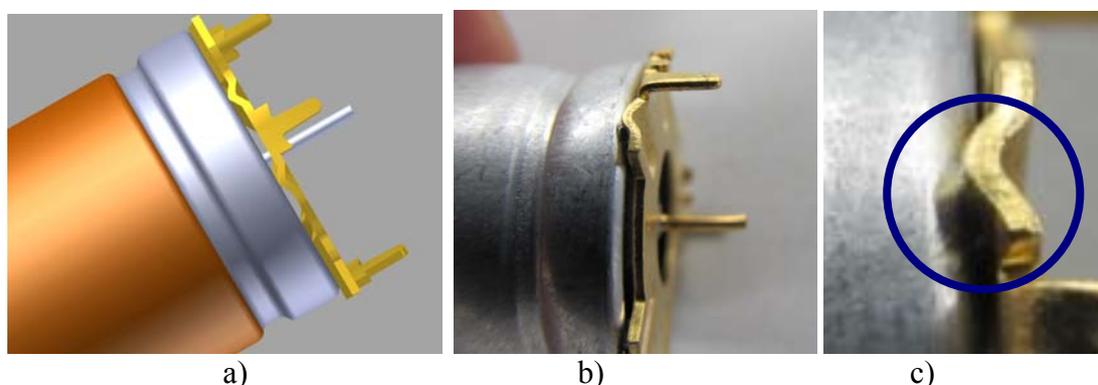


Figura 3.2 – Visualização das peças soldadas. a) projeto preliminar da peça, b) peça soldada, c) detalhe do ponto de solda

O projeto da união prevê a soldagem de 6 pontos de contato (projeções) distribuídos em pares com um ângulo de 120° em relação ao centro do capacitor. A altura das projeções é de 0,5 mm, e foi definida através de testes preliminares. A chapa com as projeções é mostrada na figura 3.3.



Figura 3.3 – Visualização da chapa a ser soldada

Como a solda envolve uma chapa de aço recoberta com camadas de outros materiais, antes do início das soldas verificou-se se as espessuras destas camadas estão de acordo com a especificação inicial de projeto, definidas com base no trabalho de Jones [1997], porém com o acréscimo de uma camada intermediária de cobre entre o aço e o níquel. A espessura da camada de cobre foi dimensionada para atender às necessidades elétricas do produto, devendo ser superior a $3 \mu\text{m}$. No caso dessas amostras as chapas possuem uma camada de ouro de 0,5 a $1 \mu\text{m}$. A camada de níquel tem espessura entre 2 e $3 \mu\text{m}$ e a camada de cobre de 3 a $4 \mu\text{m}$, como é mostrado na figura 3.4.

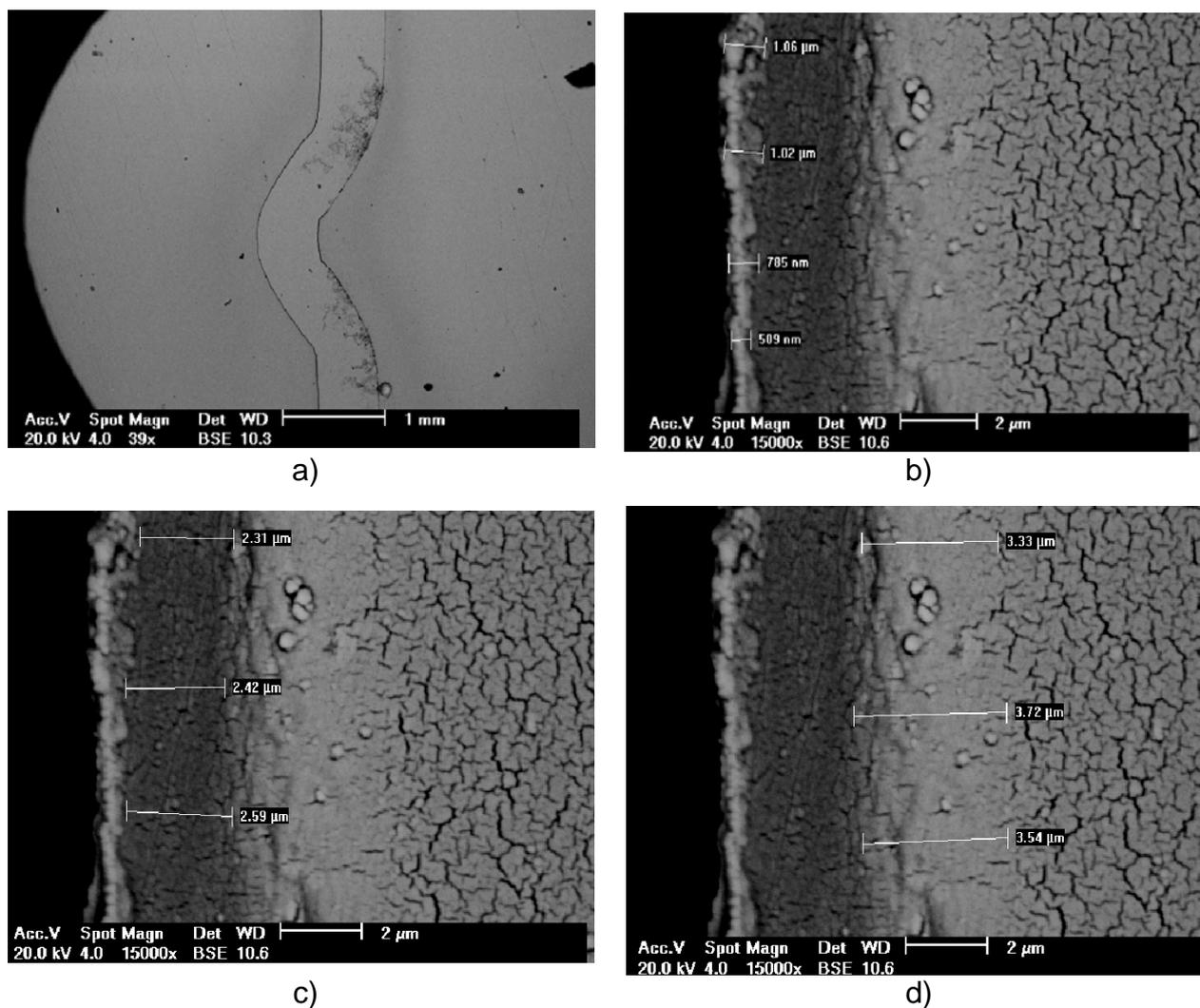


Figura 3.4 – Verificação das camadas de solda. a) Perfil da chapa, b) espessura da camada de ouro, c) espessura da camada de Níquel, d) espessura da camada de cobre.

3.2 Equipamento de soldagem

Para realizar os experimentos foi utilizado um equipamento de soldagem por resistência elétrica composto por uma fonte de potência de 80 kA um transformador de media frequência, um conjunto de prensa pneumática com força disponível para aplicação máxima de 1100 N, sistema de refrigeração a água nos eletrodos, eletrodos de cobre e sistema de monitoramento MG3 da Miyachi. A figura 3.5 mostra o equipamento montado na bancada de testes.



Figura 3.5 – Bancada de testes.

3.2.1 Eletrodo de solda superior

O eletrodo superior entra diretamente em contato com a chapa de aço. Para o material do eletrodo superior foi escolhido o tipo cobre-cromo-zircônio. Esse material foi definido após estudos e testes realizados nos quais os critérios de seleção foram: o material deveria apresentar menor saturação, menor custo, e permitir maior passagem de corrente elétrica. A literatura disponível sobre esse material recomenda para as aplicações em aço uma liga condutiva, porém foram avaliadas também ligas em que geram maior concentração de calor na zona soldada. Foram testados quatro materiais, o cobre eletrolítico e três ligas especiais CuCrZr composto por 80%, 15% e 4%, respectivamente, CuCr 80%, 20% e CuCrBe 85%, 12% e 3%. Dentre estes materiais, o que apresentou melhores resultados e maior estabilidade de processo nos testes preliminares foi o CuCrZr e foi este o selecionado para a realização dos experimentos.

3.2.2 Eletrodo de solda inferior

O material do eletrodo inferior foi cobre eletrolítico com mais de 98% de cobre na sua formulação. O material do eletrodo foi definido após estudos e testes realizados nos quais os critérios de seleção foram os mesmos utilizados para o eletrodo superior.

Os artigos disponíveis sobre esse material não o recomendam para as aplicações em aço, entretanto o eletrodo inferior mantém contato direto com o corpo do capacitor de alumínio. A área de contato está na outra extremidade do corpo, logo a corrente circulará por todo o corpo de alumínio e pela chapa de aço. No ponto de contato entre as chapas de aço e alumínio é que se deve gerar a maior resistência elétrica para que ocorra maior aquecimento com consequente união dos materiais. A utilização de eletrodos de material mais resistivo que o alumínio como o CuCrZr, CuCr ou CuCrBe poderia produzir duas regiões com mais elevadas temperaturas: uma no contato do alumínio com a chapa e outra na região de contato do eletrodo com o fundo da caneca de alumínio.

Dentre os materiais testados, aquele que teve menor durabilidade foi o CuCrBe seguido pelo CuCr. Dentre as três ligas especiais testadas, o de melhor desempenho foi o CuCrZr, porém nenhum deles apresentou melhores resultados que o Cobre eletrolítico.

3.2.3 Temperatura de arrefecimento

Para a definição dos melhores parâmetros, foi observada outra variável muito importante que é a temperatura dos eletrodos. No instante da solda as peças atingem temperaturas elevadas aquecendo os eletrodos. Para garantir a qualidade e estabilidade da solda é necessário que os eletrodos estejam sempre à mesma temperatura, pois a resistência elétrica dos eletrodos varia com a temperatura.

Machado [1996] afirma que para a soldagem de chapas de aço poderia ser usada água à temperatura ambiente com vazão de 4 litros por minuto para arrefecimento dos eletrodos, contudo esses parâmetros não foram suficientes no presente estudo. Foi realizado um experimento simples com os mesmos parâmetros e materiais apenas variando a temperatura de resfriamento dos eletrodos e se observou que a temperatura da água que garante as melhores propriedades e estabilidade do processo é de 10 °C com vazão de 4 l/min.

3.2.4 Fixação da peça

Para realizar a união de forma estável e controlada é fundamental que as amostras estejam sempre na mesma posição. Para garantir essa posição foi criado um dispositivo que

garante a posição das peças sobre o eletrodo tendo toda a sua face alinhada e perpendicular ao eixo dos cilindros.

3.3 Avaliação da qualidade dos componentes soldados

Os critérios mais importantes a serem avaliados após a soldagem são a resistência à separação das chapas, o aparecimento de pontos na qual a camada protetora é removida podendo causar a corrosão prematura do componente, e a ocorrência de expulsão de material capaz de gerar curto circuitos nos componentes eletrônicos. As inspeções dos pontos de oxidação e de expulsão de material foram realizadas de forma visual, e a avaliação da resistência à separação é realizada em um dispositivo desenvolvido para fazer esta análise, como mostra a figura 3.6. O funcionamento deste dispositivo é simples, a chapa é fixada usando três pontos de apoio e um sistema pneumático com controle da força de atuação empurra o capacitor no sentido axial ate o seu desprendimento da chapa, registrando a carga aplicada em um ensaio de tração.

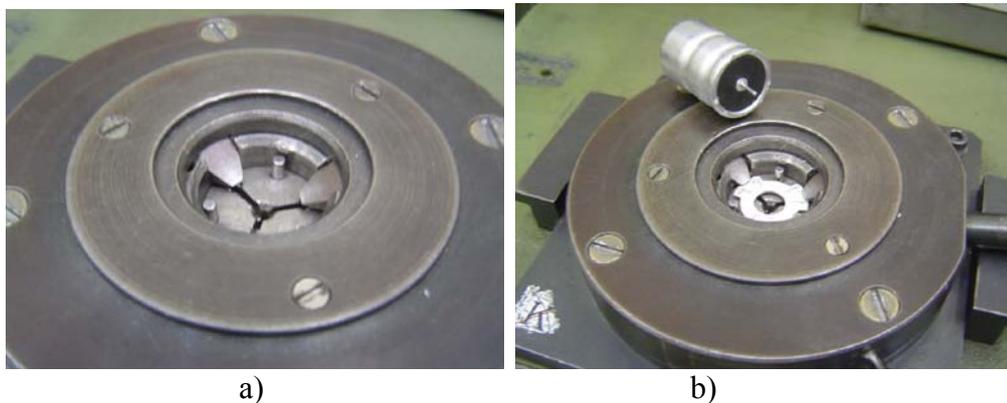


Figura 3.6 – Dispositivo de medição da resistência a tração das soldas. a) dispositivo acionado sem a chapa soldada, b) demonstração do dispositivo acionado.

O valor da carga de tração é definido no exato momento em que a chapa rompe o primeiro ponto de solda.

A verificação de pontos que podem gerar oxidação é realizada visualmente, através de uma lente de aumento de dez vezes. É através da contagem da quantidade de pontos no local que houver uma marca na chapa em que ocorreu a remoção da camada superficial, sendo considerado como falha.

A análise de geração de *whiskers* que podem produzir curto circuitos é feita por inspeção visual, com o uso de um microscópio, avaliando uma área de 1 mm quadrado, por

regra é definido que filamentos inferiores a 50 μm , não são nocivos aos circuitos. Assim foram contabilizados apenas os filamentos maiores que 50 μm , sendo os demais desprezados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Variáveis de análise

As variáveis que devem ser analisadas são a resistência à tração e pontos de fragilização da camada protetora contra oxidação. O aparecimento de *whiskers* precisou ser analisado criteriosamente, para conferir se a solução proposta de utilização de materiais que evitam o surgimento desse filamento foi efetiva.

4.2 Definição do processo

Com base nos estudos realizados por Jones [1997] sobre a união de ouro com alumínio, iniciou-se a definição do processo de fabricação desse componente. Para avaliar a qualidade da solda do capacitor com a chapa proposta foi necessário definir inicialmente o conceito de soldagem e os equipamentos necessários para efetuar a soldagem de forma eficaz. Após alguns testes em corpos de prova foi possível confirmar que o processo de soldagem por resistência elétrica era capaz de atender aos requisitos de qualidade utilizando uma fonte de solda com inversor, contudo os parâmetros de soldagem estavam mal definidos.

4.3 Definição dos parâmetros de processo

Usando a metodologia do DOE é necessário definir os níveis de cada uma das variáveis a serem avaliadas. Conforme o item 2.4 as principais variáveis de processo são a corrente, a pressão e o tempo de soldagem, porém é importante também verificar qual é a influência do tempo de retenção sobre a qualidade da junta resultante. Neste tipo de operação, já que a propensão a oxidação é um critério de qualidade, este tempo é importante por manter a peça protegida depois da soldagem.

Nos testes preliminares foi verificado que correntes variando entre 16 e 18 kA permitiam obter componentes sem defeitos visíveis, assim, estes foram os limites utilizados para definição dos parâmetros do processo. Da mesma forma, foi selecionado o intervalo de tempo entre 5 e 7 ms, de pressão entre 0,28 e 0,34 MPa e do tempo de retenção entre 100 e 400 ms. Para a definição da sequência de testes e experimentos foi utilizado um software comercial.

Foi aplicado um planejamento fatorial fracionado em dois níveis, onde cada fator (ou parâmetro) assume um valor máximo e um mínimo. Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se (“nF = 8”) $2k-1$ experimentos e cinco replicações, onde k é o número de

fatores independentes analisados, obtendo-se um total de 40 ensaios. Os valores adotados para os níveis máximos e mínimos encontram-se na Tabela 4.1. A seqüência de realização dos botões de solda obedeceu a uma ordem aleatória.

Após testes preliminares com as variáveis de processo foi proposto um DOE para avaliar qual a influência dos parâmetros e quais os requisitos necessários para atender aos critérios de qualidade mínimos para este produto.

Definiu-se que os quatro principais itens a serem controlados no processo seriam o tempo de soldagem, o tempo de retenção, a pressão e a corrente de soldagem. Os equipamentos utilizados nos experimentos e as variáveis dependentes, como os eletrodos e a temperatura de afecimento do processo de soldagem foram fixados e mantidos constantes em todos os testes.

A temperatura e a vazão da água para arrefecimento dos eletrodos foi mantida constante em 10 °C e 4 l/min. Para evitar o acúmulo de resíduos da caneca de alumínio durante a soldagem, foi utilizado como material do eletrodo cobre eletrolítico com mais de 98% de cobre.

O tempo total de processo foi de 4 segundos por peça sendo que o ciclo de trabalho do sistema é de 0,175%

A chapa utilizada para o experimento teve a configuração indicada na figura 3.1.

A seqüência de testes foi realizada com a distribuição descrita na tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos.

Experimento	Pressão (MPa)	Corrente (kA)	Tempo de soldagem (ms)	Tempo de Retenção (ms)
A	0,28	16	5	100
B	0,34	16	5	400
C	0,28	18	5	400
D	0,34	18	5	100
E	0,28	16	7	400
F	0,34	16	7	100
G	0,28	18	7	100
H	0,34	18	7	400

Tabela 4.2 – Parâmetros e resultados obtidos para cada corpo de prova

Amostra	Pressão de soldagem	Corrente de soldagem	Tempo de soldagem	Tempo de retenção	Tração	Whiskers	Oxidação
	MPa	kA	ms	ms	N	Unidade	Pontos
1	0,28	16	5	100	230	0	13
2	0,34	16	5	400	170	0	4
3	0,28	18	5	400	270	0	14
4	0,34	18	5	100	230	0	8
5	0,28	16	7	400	250	0	13
6	0,34	16	7	100	190	0	6
7	0,28	18	7	100	300	0	16
8	0,34	18	7	400	310	0	8
9	0,28	16	5	100	250	0	9
10	0,34	16	5	400	140	0	6
11	0,28	18	5	400	290	0	14
12	0,34	18	5	100	240	0	9
13	0,28	16	7	400	250	0	15
14	0,34	16	7	100	230	0	6
15	0,28	18	7	100	310	0	13
16	0,34	18	7	400	280	0	6
17	0,28	16	5	100	230	0	15
18	0,34	16	5	400	100	0	5
19	0,28	18	5	400	290	0	15
20	0,34	18	5	100	250	0	7
21	0,28	16	7	400	250	0	14
22	0,34	16	7	100	180	0	6
23	0,28	18	7	100	330	0	14
24	0,34	18	7	400	230	0	6
25	0,28	16	5	100	240	0	14
26	0,34	16	5	400	160	0	5
27	0,28	18	5	400	320	0	15
28	0,34	18	5	100	240	0	7
29	0,28	16	7	400	170	0	15
30	0,34	16	7	100	210	0	6
31	0,28	18	7	100	380	0	16
32	0,34	18	7	400	310	0	6
33	0,28	16	5	100	260	0	13
34	0,34	16	5	400	90	0	5
35	0,28	18	5	400	310	0	14
36	0,34	18	5	100	240	0	8
37	0,28	16	7	400	270	0	12
38	0,34	16	7	100	190	0	6
39	0,28	18	7	100	320	0	16
40	0,34	18	7	400	230	0	6

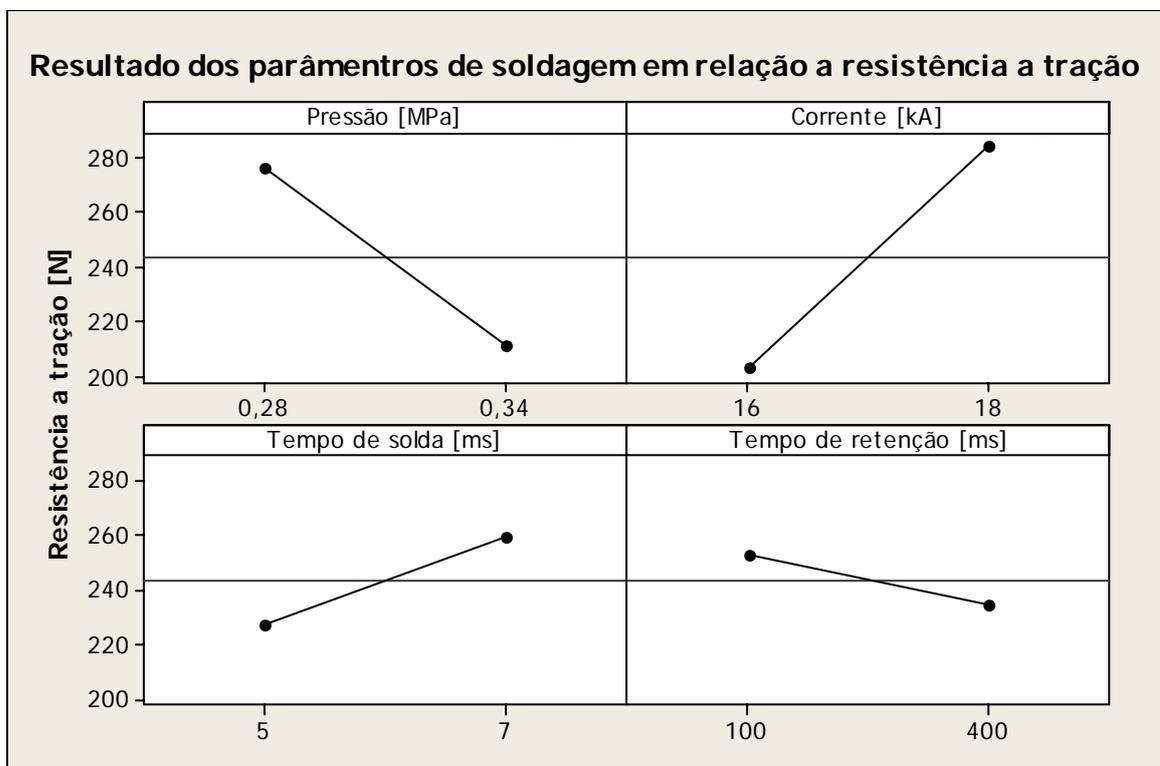
Os critérios de avaliação foram definidos, a partir de testes realizados em corpos de prova. Por se tratar de uma inovação, não existe uma especificação para enquadrar esse tipo

de produto, logo foram usados como referência os critérios definidos para produtos similares. Um dos critérios de projeto é o de que as peças devem suportar uma carga axial de 250 N, no mínimo. Esse valor foi estabelecido com base na observação de peças soldadas em placas eletrônicas instrumentadas com um acelerômetro. Observou-se que as peças que tinham essa resistência à tração ou superior, suportavam a solitação de 40 G. Outro fator significativo é que a solda não deve apresentar mais de 10 pontos onde ocorrem imperfeições na superfície superior das chapas, o que pode resultar em falha devido à oxidação e, portanto, falha prematura do capacitor. O último critério de aceitação diz respeito à geração de *whiskers* que podem causar curto-circuitos.

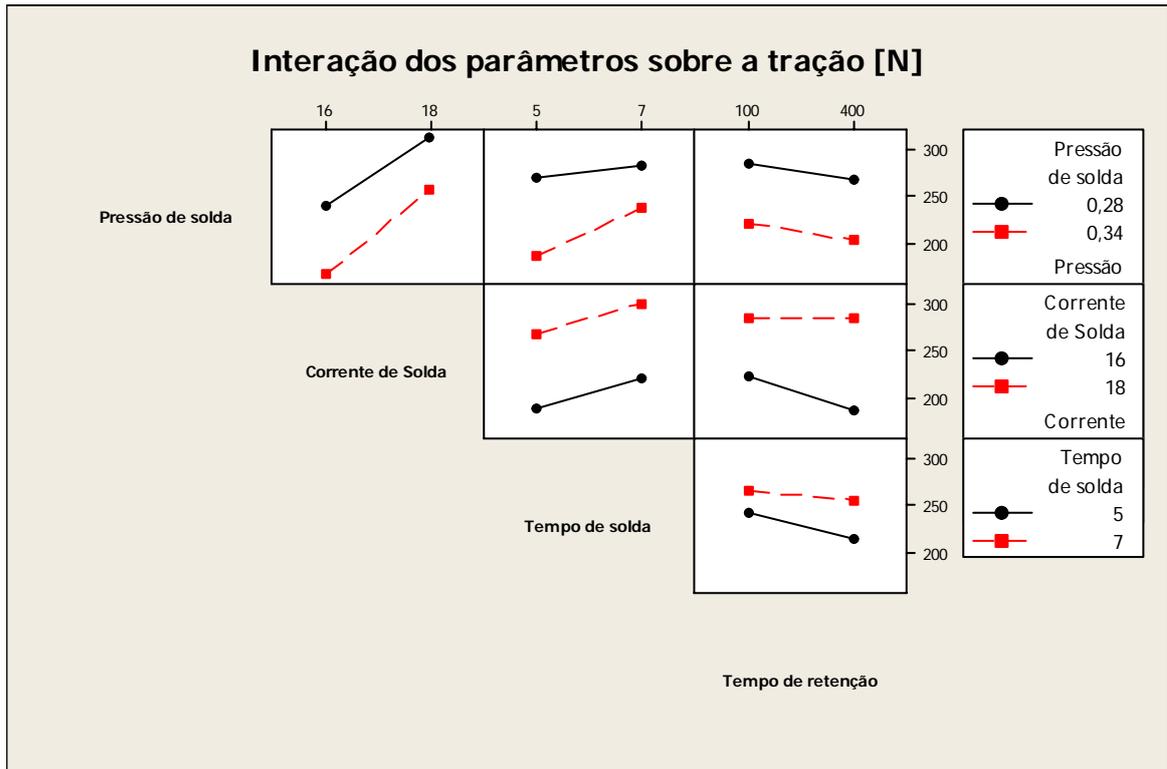
O ensaio de tração axial foi executado no dispositivo descrito e apresentado na figura 3.6.

4.4 Análise da influência dos parâmetros sobre a resistência a tração axial

Os resultados obtidos para a influência de cada parâmetro estudado sobre a resistência à tração das juntas obtidas são mostrados na figura 4.2.



a)



b)

Figura 4.2 – Resultados obtidos para resistência à separação das chapas por tração. a) avaliação dos parâmetros de soldagem, b) avaliação das interações entre os parâmetros.

A avaliação de cada parâmetro é importante assim como a avaliação das interações entre os parâmetros. Os resultados demonstram que a corrente elétrica é o item que mais influencia a resistência à tração das juntas resultantes. Como pode ser observado na figura 4.2 a) o segundo parâmetro mais importante é a pressão, seguida pelo tempo de soldagem e por último pelo tempo de retenção, que dentro dos limites do experimento, não influencia significativamente a resistência da junta.

Os gráficos também permitem avaliar os limites que foram utilizados para cada uma das variáveis. Esses limites possibilitam a parametrização do equipamento de forma a garantir de forma estável os requisitos solicitados. Analisando os resultados demonstrados nas figuras 4.2 é possível observar que os limites que satisfazem ao requisito de tração mínima de 250 N no componente são corrente superior a 17 kA, pressão inferior a 0,31 MPa, tempo de soldagem superior a 6 ms e tempo e retenção abaixo de 250 ms.

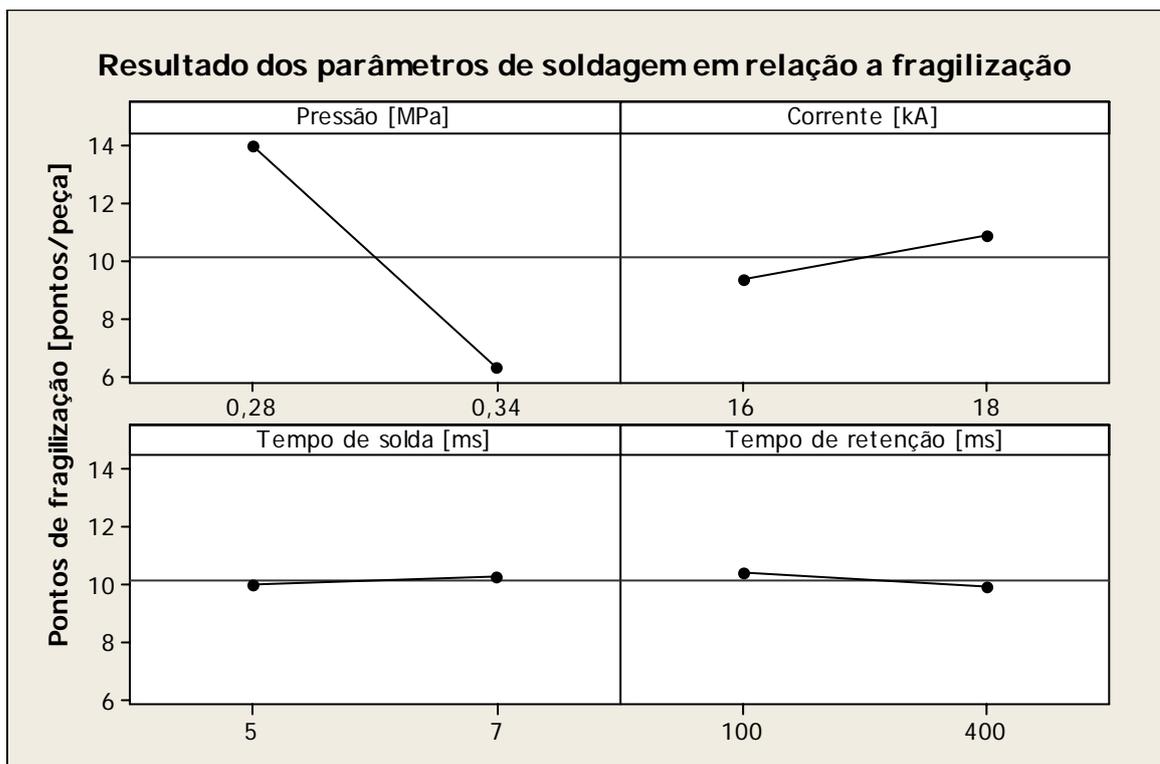
Observando a figura 4.2.b pode-se comparar a influência de cada parâmetro com a dos demais. Pode-se notar que se for utilizada a pressão mínima de 0,28 MPa, apenas a combinação com corrente de 16 kA não atende o limite de resistência mínima de 250 N. Todas as demais combinações de corrente e tempo, dentro dos limites estabelecidos,

produzem juntas soldadas com resistência acima deste valor. Entretanto, se utilizada a pressão de 0,34 MPa, somente a utilização da corrente de 18 kA permitirá atender aos requisitos de resistência especificados.

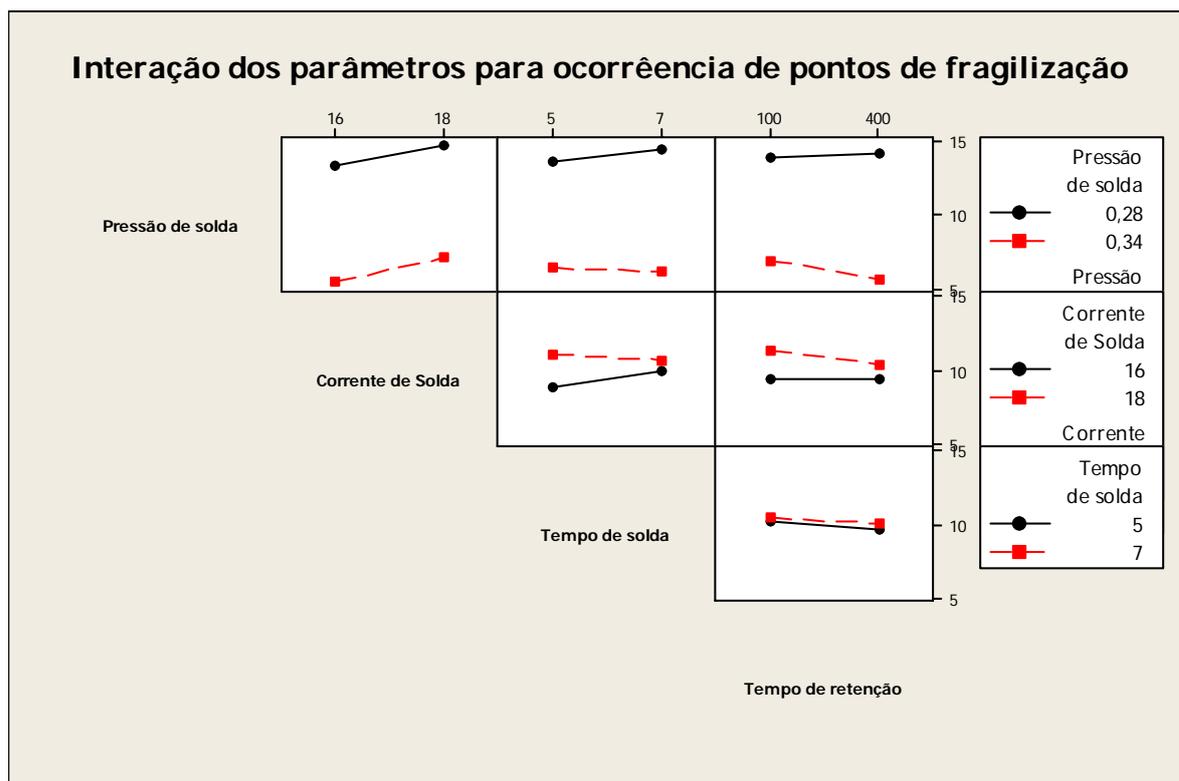
Na análise da figura 4.3 entre corrente e tempos de soldagem e retenção é possível observar que somente a corrente de 18 kA produz soldas com a resistência desejada, independente da combinação de tempos utilizada. Na comparação entre os tempos, sempre que foi utilizado tempo de soldagem de 7 ms os pontos de solda suportaram a resistência necessária.

4.5 Análise da influência dos parâmetros sobre a ocorrência de oxidação

A figura 4.3 mostra quais dos parâmetros avaliados são mais importantes para que o componente apresente um melhor acabamento, mantendo a integridade e proporcionando a proteção necessária, ou seja, a condição em que aparecem menos pontos que podem gerar oxidação ou pontos queimados. Observou-se em diversas aplicações destes componentes que quando existem mais de 10 pontos de oxidação na superfície, o desempenho do componente fica comprometido. Este número está relacionado à estimativa da área da chapa que pode ficar exposta.



a)



b)

Figura 4.3 – Resultados obtidos para o número de pontos de oxidação resultante da operação de soldagem. a) avaliação dos parâmetros de soldagem, b) avaliação das interações entre os parâmetros.

Com base nos dados mostrados nas figuras 4.3.a e 4.3.b pode-se observar que o parâmetro que possui maior influência sobre a geração de pontos de oxidação nas chapas é a pressão, sendo que pressões acima de 0,31 MPa produzem menos de 10 pontos. A corrente não influencia de forma significativa e os tempos não interferem na ocorrência de pontos de oxidação.

Na análise da interação entre os parâmetros também fica evidente a influência da pressão. Pode-se observar que qualquer regulagem das outras variáveis, entre si não é significativa, apenas as que são correlacionadas a pressão. E regulando o equipamento com a pressão de 0,34 MPa atende o requisito estabelecido, independente de outra variável.

4.6 Análise dos parâmetros em relação ao aparecimento de *Whiskers*

A presença de *whiskers* foi avaliada através de inspeção visual, com o auxílio de um microscópio. A presença destes filamentos, que podem gerar curto-circuitos em componentes eletrônicos, foi avaliada em 40 peças e, para os intervalos dos parâmetros utilizados, em nenhuma das peças se observou presença desses filamentos.

4.7 Parâmetros de soldagem

A análise dos resultados experimentais permite definir a combinação de parâmetros de soldagem que garante a obtenção de propriedades e características definidas como fundamentais para a obtenção de juntas de qualidade. Dentro dos limites de parâmetros de soldagem estudados, a combinação de parâmetros considerada mais adequada é mostrada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Melhores parâmetros para a condição de soldagem estudada.

Parâmetros	Valor	Unidade
Corrente de soldagem	18.000	A
Pressão de soldagem	0,34	MPa
Tempo de soldagem	7	ms
Tempo de forjamento	100	ms
Pressão de contato	0,11	MPa
Tempo de aproximação	1000	ms

4.8 Análise da influência das espessuras das camadas de revestimento.

Após avaliar e definir os parâmetros de soldagem, foi necessário avaliar a real necessidade das diferentes camadas de revestimento sobre a chapa de aço. Após uma análise preliminar das camadas superficiais das chapas foi visto que a camada de ouro está definida de forma aceitável, pois se encontra na mesma ordem de grandeza utilizada por outros autores [Jones 1997], e também porque espessuras maiores inviabilizariam a aplicação devido ao custo. A espessura da chapa de aço está adequada à solicitação mecânica do componente.

Logo, as duas espessuras que poderiam ser alteradas são as das camadas de cobre e de níquel. Para avaliar o efeito da variação da espessura destas camadas foram propostas três espessuras diferentes para cada material e feitas combinações com o objetivo de determinar qual seu efeito sobre a resistência da junta e formação de pontos de oxidação e *whiskers*.

As combinações de espessuras de camadas testadas são mostradas na tabela 4.4, enquanto a tabela 4.5 apresenta uma lista completa dos parâmetros utilizados em cada experimento com os respectivos resultados.

Tabela 4.4 – Combinação de espessuras de camadas de revestimento da chapa de aço usadas nos experimentos

Combinação de camadas	Níquel	Cobre	Níquel	Cobre
	Camada	Camada	μm	μm
A	Mínima	Mínima	1	6
B	Mínima	Média	1	10
C	Mínima	Máxima	1	14
D	Média	Mínima	2	6
E	Média	Média	2	10
F	Média	Máxima	2	14
G	Máxima	Mínima	3	6
H	Máxima	Média	3	10
I	Máxima	Máxima	3	14

Tabela 4.5 – Resultados dos experimentos realizados com as combinações definidas na tabela 4.4

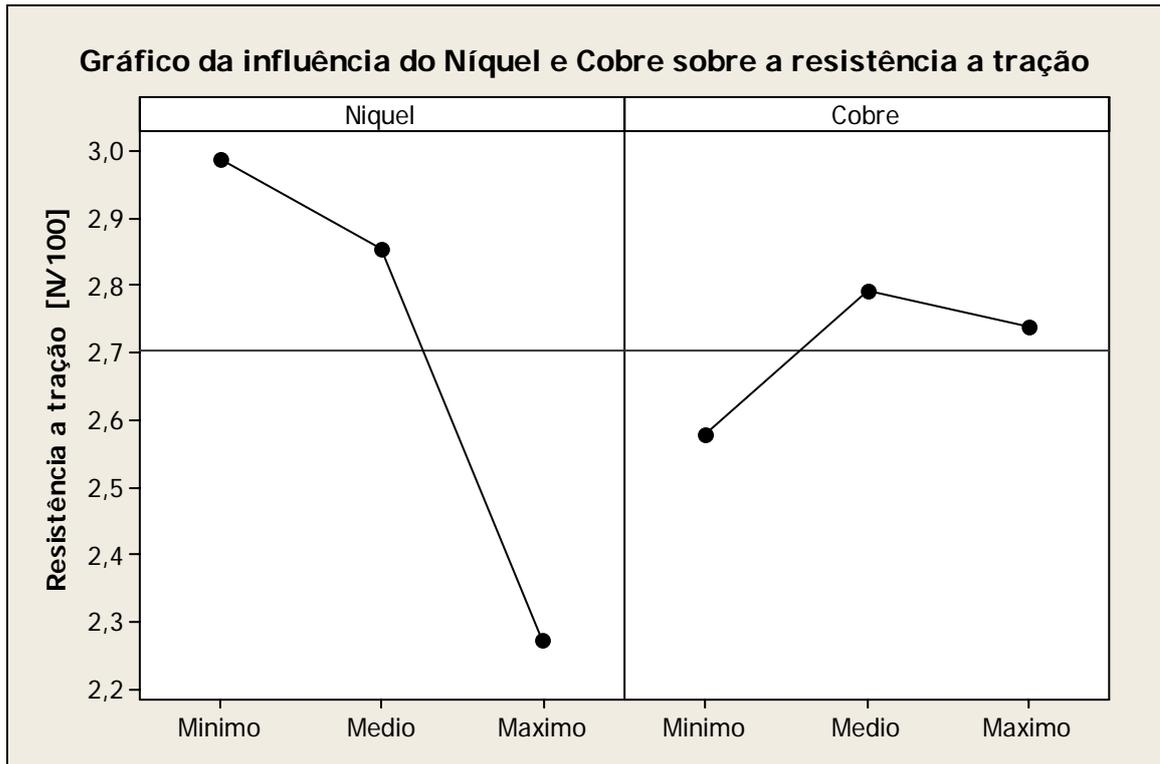
Experimentos	Combinação de camadas	Amostra	Tração [N]	Oxidação [Unidades]	Whiskers [Unidades]
1	A	1	330	7	0
2	B	1	310	6	0
3	C	1	330	6	0
4	D	1	230	6	0
5	E	1	350	6	0
6	F	1	320	6	0
7	G	1	230	7	0
8	H	1	230	9	0
9	I	1	180	6	0
10	A	2	330	7	0
11	B	2	310	6	0
12	C	2	310	6	0
13	D	2	250	6	0
14	E	2	280	6	0
15	F	2	280	6	0
16	G	2	220	7	0
17	H	2	210	6	0
18	I	2	220	14	0
19	A	3	270	6	0
20	B	3	310	6	0
21	C	3	300	7	0
22	D	3	240	8	0
23	E	3	300	6	0
24	F	3	300	6	0
25	G	3	230	7	0
26	H	3	240	11	0
27	I	3	260	10	0
28	A	4	300	6	0
29	B	4	280	6	0
30	C	4	280	6	0
31	D	4	240	7	0
32	E	4	370	6	0

33	F	4	340	6	0
34	G	4	250	10	0
35	H	4	240	11	0
36	I	4	250	9	0
37	A	5	300	6	0
38	B	5	280	6	0
39	C	5	240	6	0
40	D	5	220	9	0
41	E	5	280	7	0
42	F	5	280	6	0
43	G	5	230	9	0
44	H	5	200	9	0
45	I	5	220	12	0

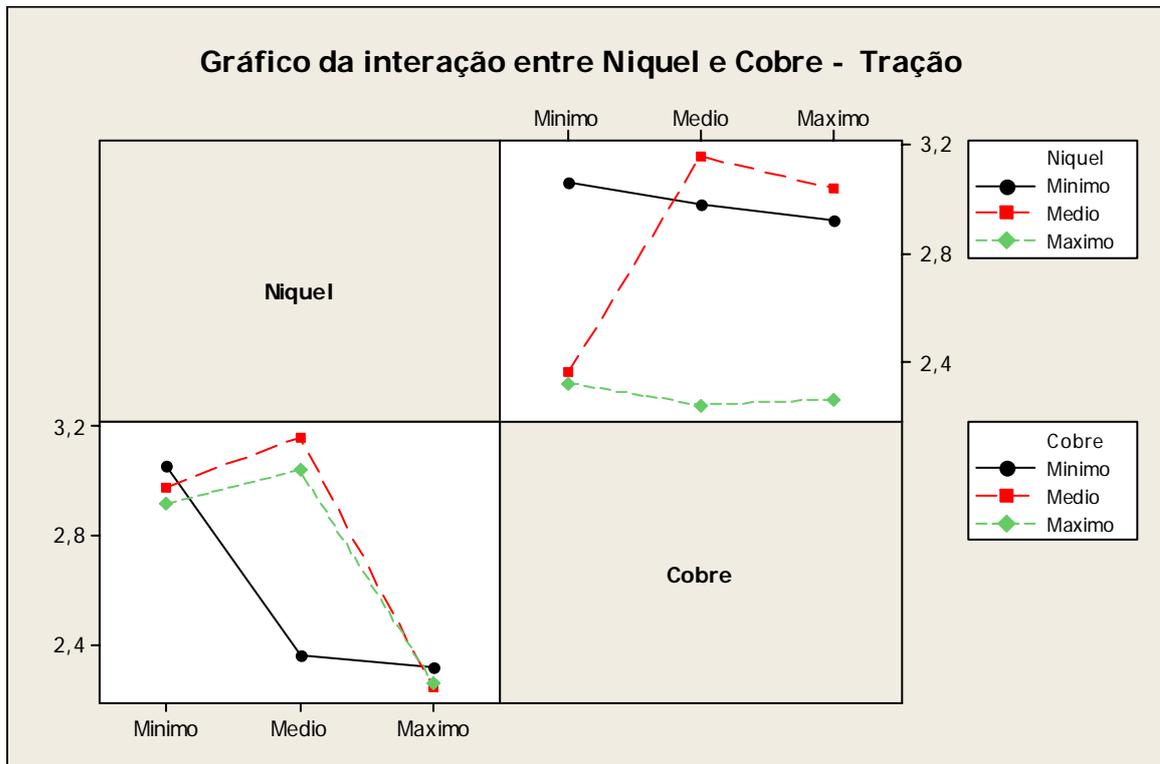
Com relação à variação da espessura das camadas de níquel e cobre, é demonstrado que mesmo as espessuras sendo muito pequenas, na casa dos milésimos de milímetros, exercem influência sobre a qualidade das juntas, conforme pode ser observado nas figuras 4.4 e 4.6.

A resistência à tração obtida nas diferentes combinações de espessura de camadas foi avaliada. Entretanto a avaliação independente de cada nível de espessura do material não permite estabelecer uma correlação direta entre a resistência e a espessura de camada para o material utilizado. Portanto é fundamental que se faça à análise de correlação entre as combinações de espessuras de camadas testadas. Essa mesma análise deve ser feita com relação à possibilidade de falhas por oxidação.

Um dos requisitos subentendidos em uma linha de produção e fabricação de componentes é que as peças fabricadas tenham características idênticas com tolerância aceitável. O método mais utilizado para validação de processos industriais é baseado na verificação da capacidade de processo. No presente estudo a avaliação se dará em função da média e dispersão observadas para cada situação, devido à pequena quantidade de amostras disponíveis. Os resultados obtidos para a resistência à tração da junta são apresentados nas figuras 4.4 e 4.5.



a)



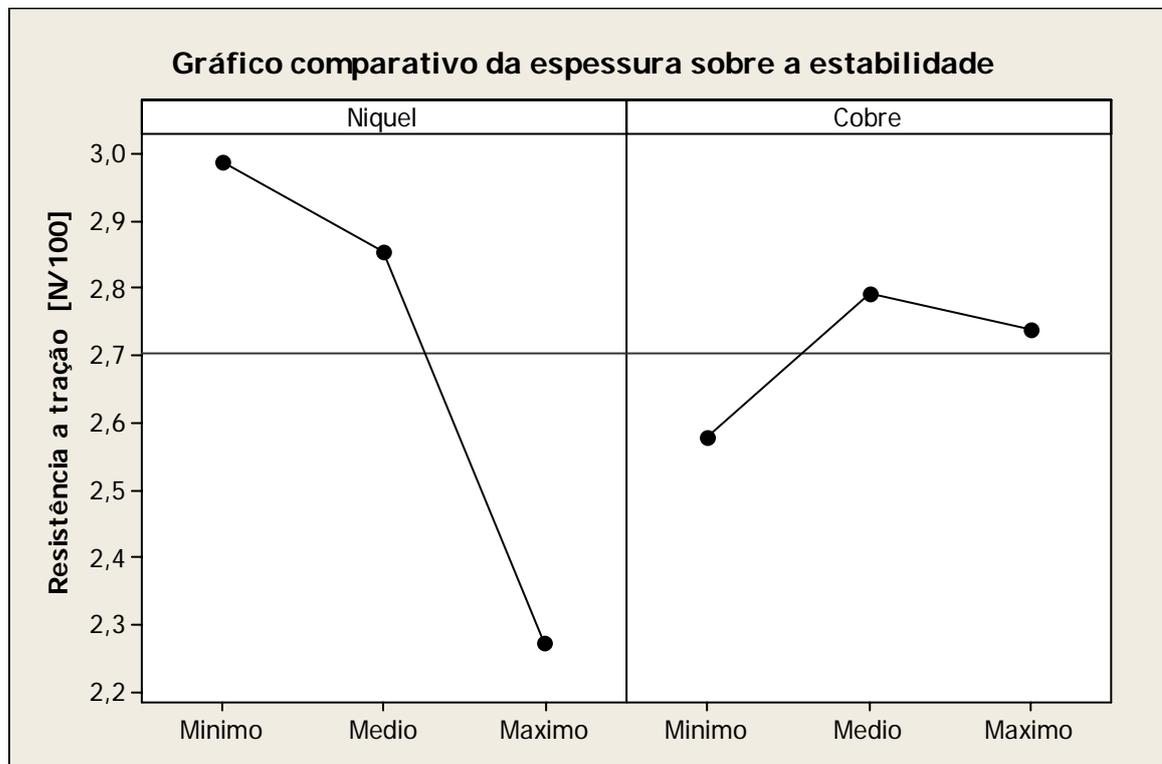
b)

Figura 4.4 – Resultados obtidos com relação à resistência a tração. a) resistência em função da espessura das camadas de revestimento, b) interação entre os efeitos.

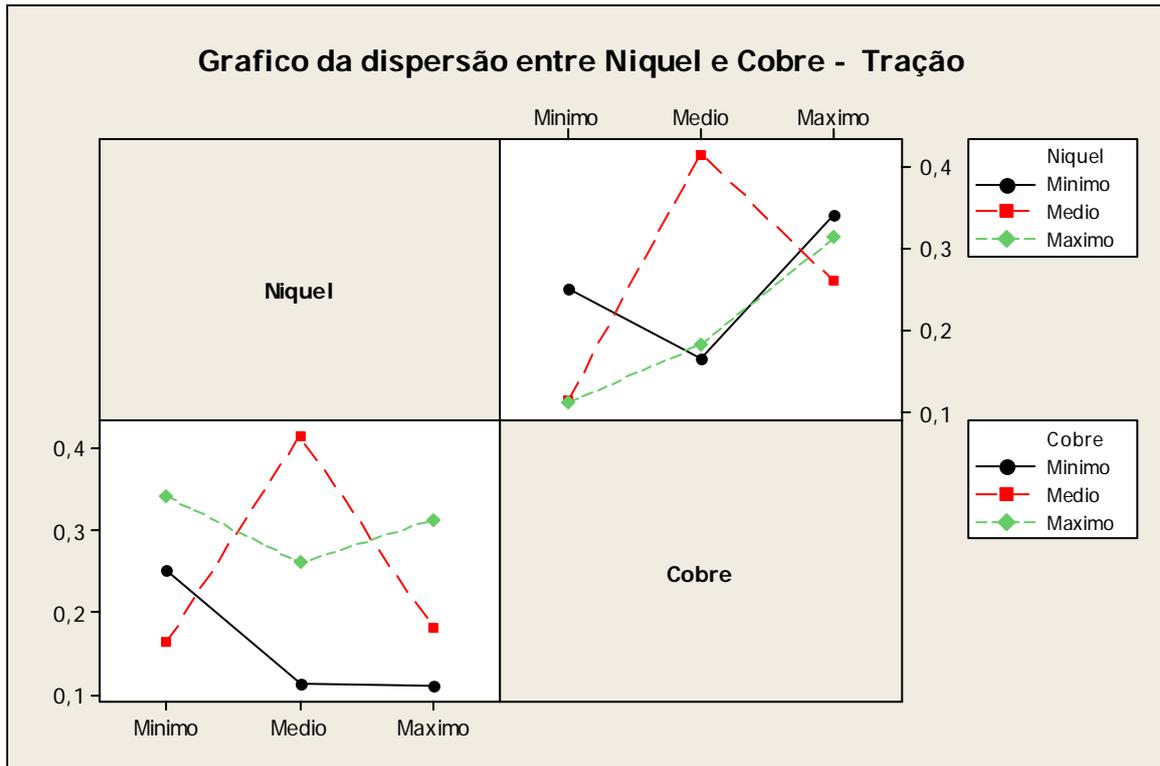
Na figura 4.4 se pode observar que menores espessuras de camada de níquel produzem juntas com maior resistência à tração. A curva à direita mostra a relação entre resistência à tração e a espessura da camada de cobre. Como pode ser observado a curva não apresenta tendência linear, mas sugere que os melhores resultados no ensaio de tração ocorram para a espessura de 10 μm de cobre.

Na figura 4.4.b é possível observar que com o valor máximo de espessura da camada de níquel, 3 μm , não se observou resultados satisfatórios, independente da espessura da camada de cobre. Contudo, pode-se notar que com a combinação dos valores médios de espessura das camadas de níquel, 2 μm , e cobre, 10 μm , obtém-se resistência adequada.

A figura 4.5 permite avaliar quais espessuras de camada acarretam em um processo mais capaz com estabilidade e repetibilidade. É possível observar que quanto maior a camada de cobre, mais instável fica o processo. A dispersão dos dados é semelhante para todas as espessuras de camadas de níquel. A figura 4.5.b apresenta a influencia da correlação entre as diferentes configurações de espessuras de camadas. Observando a figura 4.5 a) o gráfico da espessura de cobre forma uma curva com tendência linear crescente. Uma característica em relação às espessuras médias em ambos os casos observada é de que o menor valor de espessura de camada do cobre produz maior estabilidade quando combinado com a máxima espessura da camada de níquel.



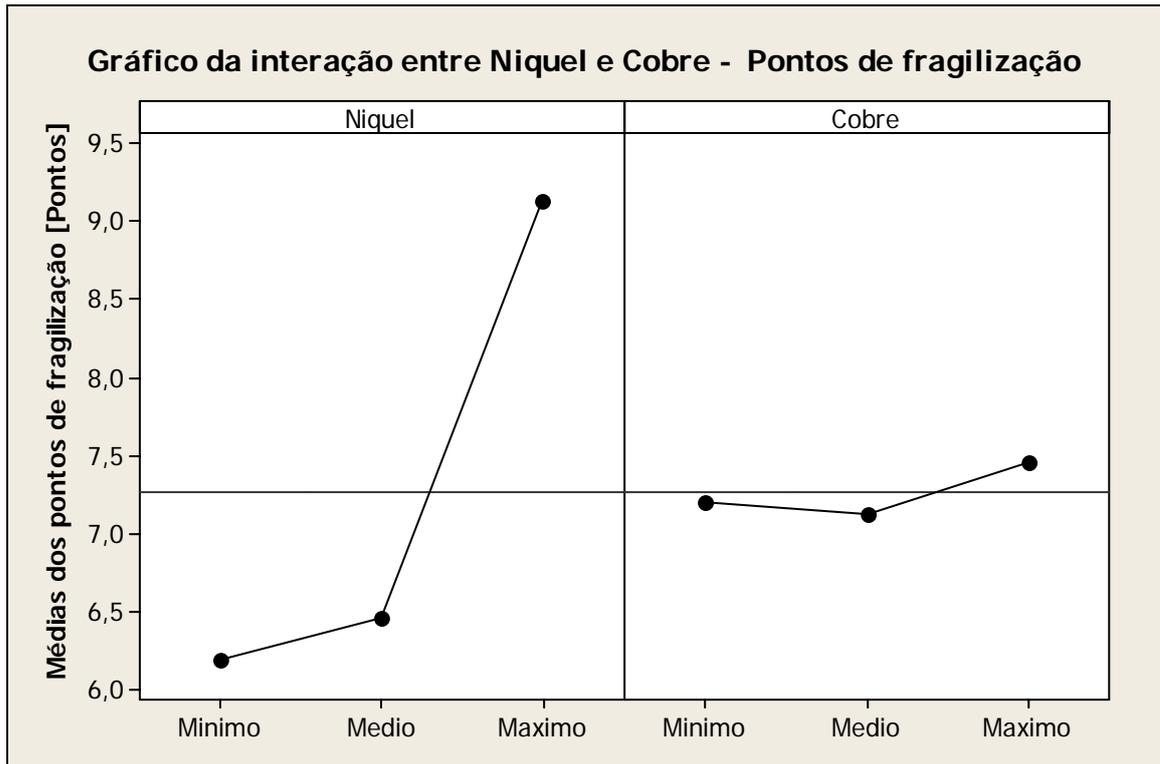
a)



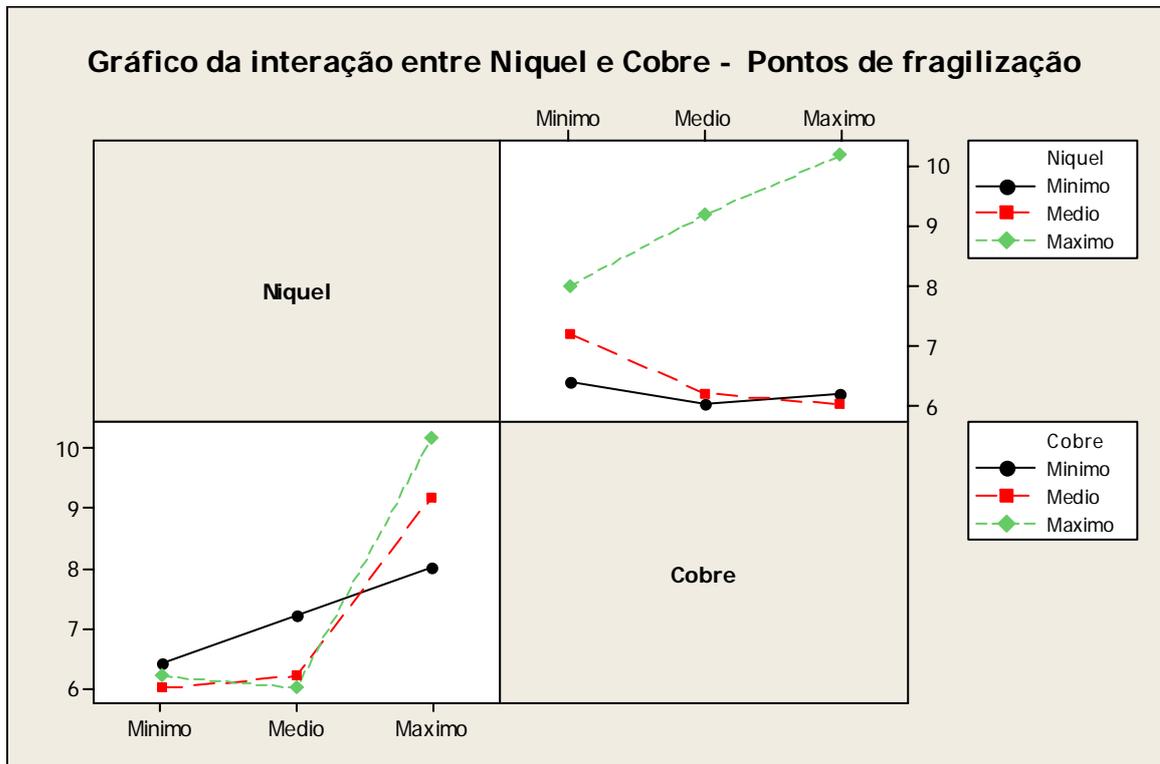
b)

Figura 4.5 – Avaliação da estabilidade das camadas em relação a resistência a tração axial a) em relação as espessuras das camadas e b) a correlação entre as espessuras e materiais.

Na figura 4.6 foi avaliada a influência das espessuras das camadas de níquel e cobre sobre a formação de pontos de oxidação nas chapas. É possível observar que com a espessura da camada de níquel de 3 μm , valor máximo, houve formação de maior quantidade de pontos de oxidação. Não se observou influência da variação das espessuras das camadas de cobre sobre o número de pontos de oxidação formados. É possível notar que o aumento na espessura da camada de níquel incrementa o número de defeitos superficiais que podem ocasionar oxidação. O fato saliente é que, se a espessura da camada de níquel for inferior a 2 μm e a espessura da camada de cobre for igual ou maior que 10 μm , o processo fica estável e produz poucos pontos geradores de oxidação.



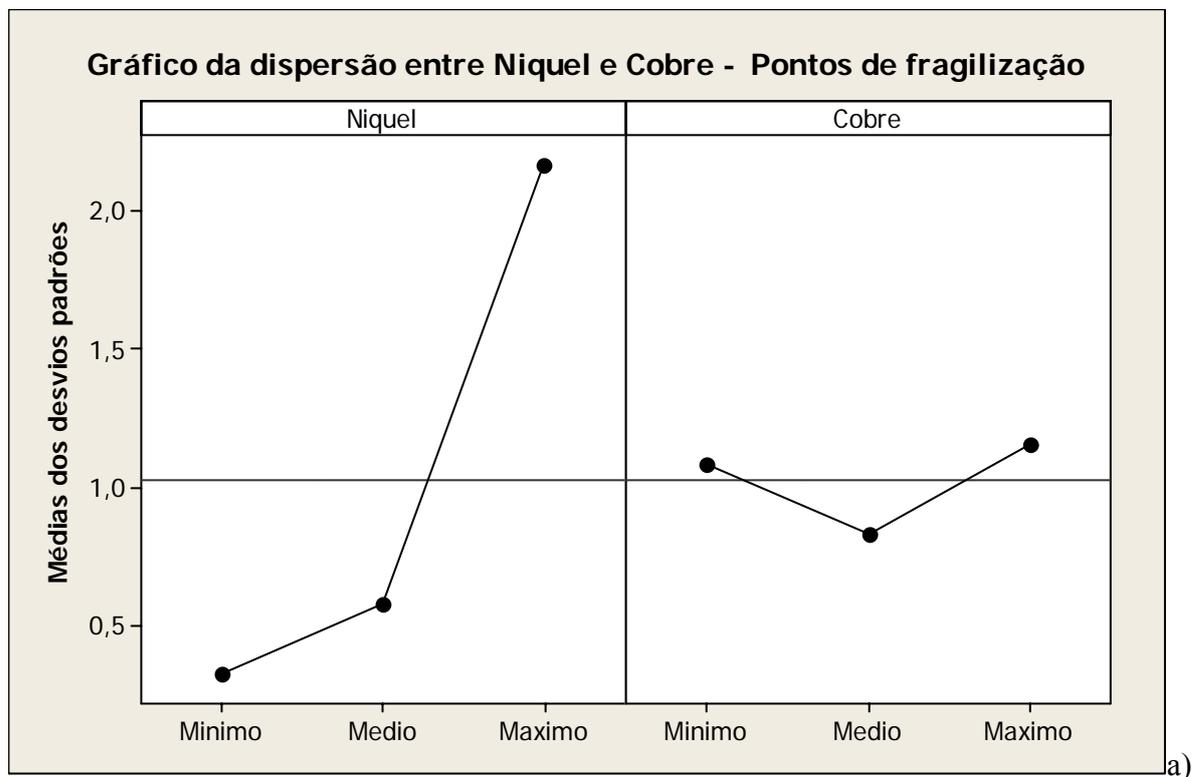
a)

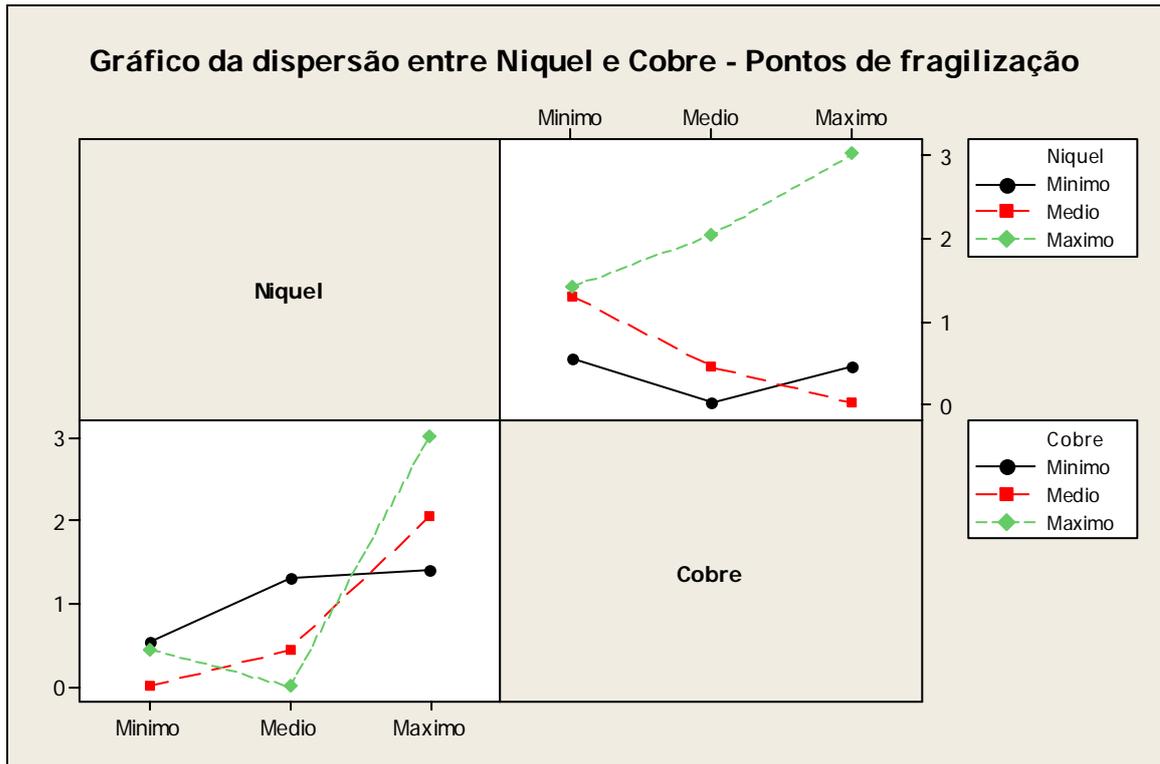


b)

Figura 4.6 – Resultados obtidos com relação ao número de pontos de oxidação. a) pontos de oxidação versus espessura das camadas de revestimento, b) interação entre os efeitos.

Na figura 4.7 foi avaliada a dispersão dos dados em relação ao número de defeitos superficiais. Os valores obtidos demonstram que há uma relação direta entre a quantidade de pontos de defeitos das camadas protetoras e a dependência entre as espessuras. Assim como na figura 4.6, é possível observar que com a máxima espessura de níquel testada, 3 μm , ocorreu maior instabilidade. Os dados não permitem estabelecer relação entre a espessura da camada de cobre e a formação de pontos de oxidação. O gráfico da fig. 4.7.b permite verificar que, se a camada de níquel for inferior a 2 μm , a camada de cobre pode estar entre 6 e 14 μm que é obtido um processo com uma variação menor que 2 pontos por peça.

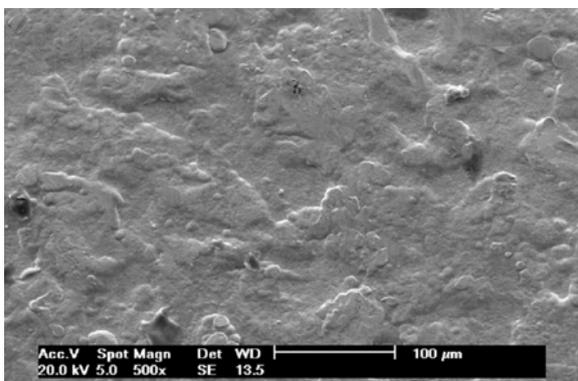




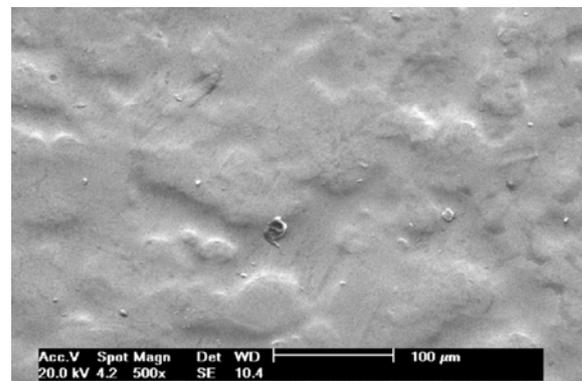
b)

Figura 4.7 – Dispersão dos dados em relação à formação de pontos de Oxidação.

Outra consideração importante diz respeito ao estado da superfície e quantidade de impurezas presentes na chapa a ser soldada. Na figura 4.8 são mostradas as superfícies das chapas. A fig. 4.8.a mostra o aspecto superficial da chapa com configuração (A) da tab. 4.4, apresentando a menor espessura de camada de níquel, 1 μm , e camada de cobre com 6 μm . Na fig. 4.8.b pode-se visualizar a superfície da chapa com a configuração (I), apresentando as máximas espessuras de camadas de níquel e cobre, 3 μm e 14 μm , respectivamente.



a)



b)

Figura 4.8 – Aspecto superficial das chapas antes de serem soldadas. a) Chapa com a configuração (A) 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre, b) Chapa com a configuração (I) 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.

Na figura 4.9 podem ser observadas impurezas e imperfeições presentes nas superfícies das chapas. As configurações das camadas são as mesmas da figura 4.8.

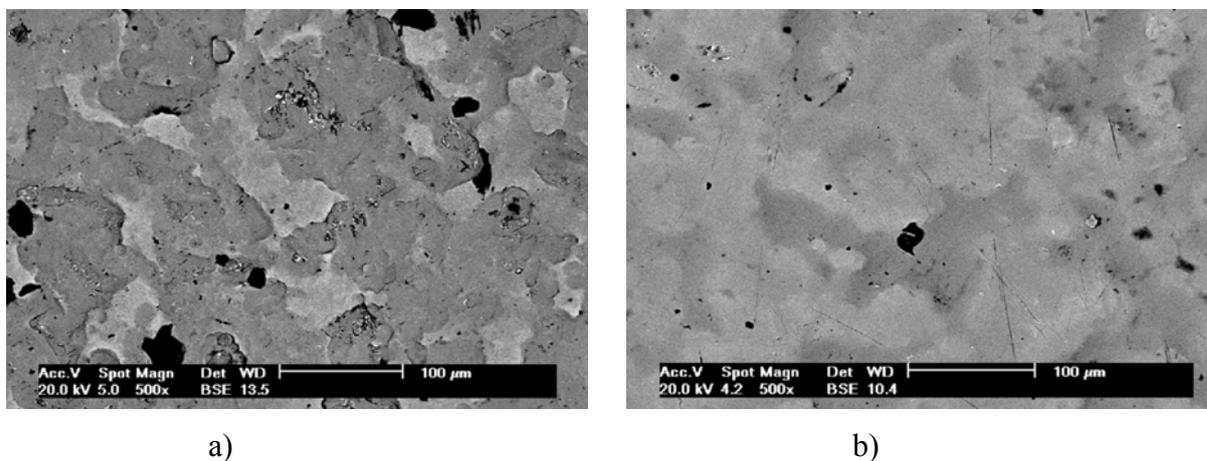


Figura 4.9 – Impurezas e imperfeições na superfície das chapas antes de serem soldadas. a) Chapa com a configuração (A): 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre; b) Chapa com a configuração (I): 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.

Pode-se observar que a superfície das chapas com configuração (A) não apresenta coloração uniforme, provavelmente porque a camada de 1mm, é muito pequena, o que impossibilita a obtenção de uma camada homogênea e sem imperfeições superficiais.

A figura 4.10 apresenta um corte longitudinal das chapas após a soldagem, onde pode ser visualizadas as espessuras da camada superficial de zinco após a soldagem. Nessa figura é possível avaliar se ocorreu alguma imperfeição ou falha que possa acarretar em fragilização da solda ou facilidade de aparecimento de pontos que possam causar oxidação. Na fig 4.10.b deduzisse que a grande espessura da camada de níquel formou uma região de menor resistência mecânica produzindo um efeito semelhante à decoesão lamelar sob a ação de tensões de tração. Descontinuidades devido ao processo de fabricação, podem ter contribuído para a nucleação destas falhas. Isso explica o decréscimo na resistência e aumento de dispersão nos resultados observados para a maior espessura de camada de níquel utilizada nos ensaios.

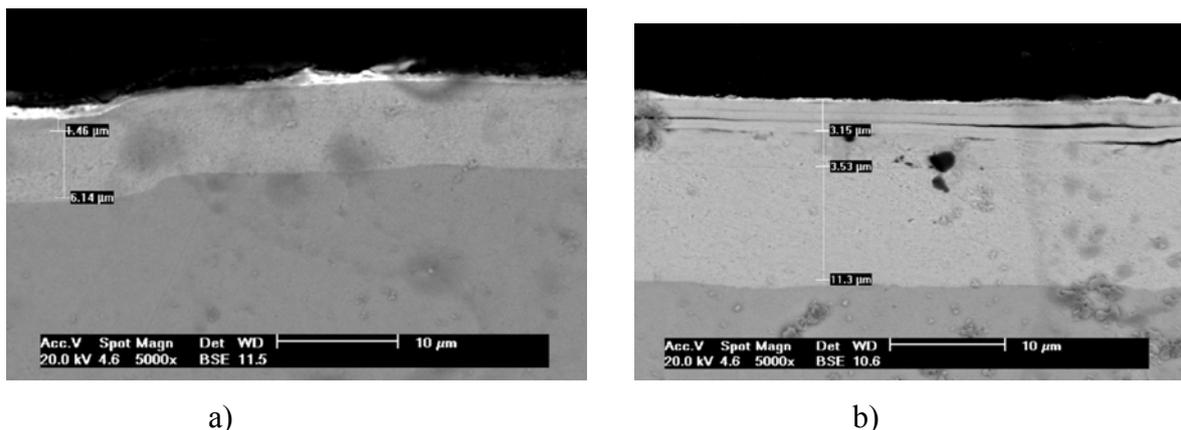


Figura 4.10 – Verificação espessuras das chapas após a soldagem. a) Chapa com a configuração (A) 1 μm Níquel e 6 μm de Cobre b) Chapa com a configuração (I) 3 μm Níquel e 14 μm de Cobre.

4.9 Avaliação do botão de solda

Além da resistência mecânica da junta soldada e isenção de pontos de oxidação é importante analisar a geometria do botão de solda.

Na figura 4.11 é mostrado o aspecto da fratura na chapa de aço, recoberta com a menor espessura de níquel e com a espessura de cobre média. A análise da superfície visa comprovar a ocorrência de fusão e verificar em que partes da projeção ela ocorre. O percentual de cada elemento residual na superfície da peça soldada após o teste de tração foi avaliado.

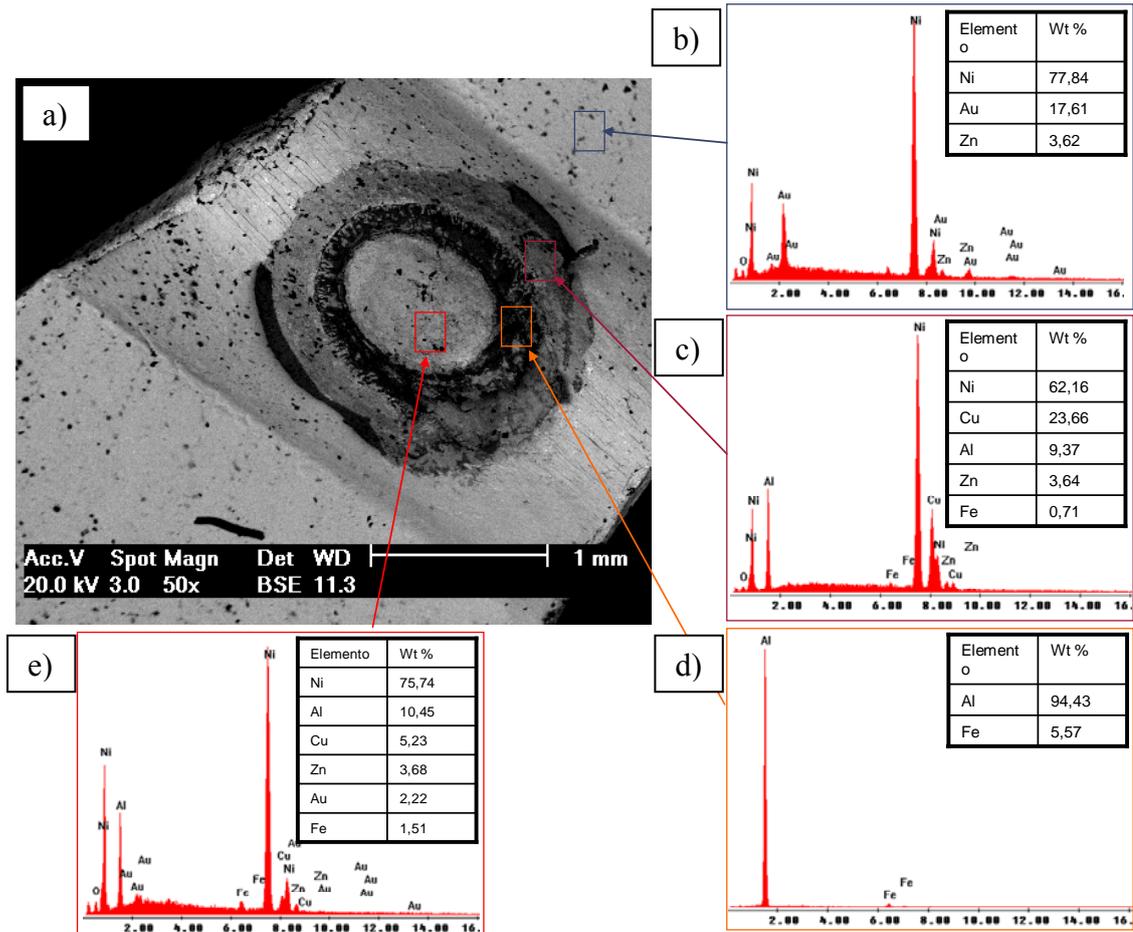


Figura 4.11 – Resultado das análises do corpo de prova em microscopia eletrônica de varredura. a) vista da região da solda após a ruptura; b) região do metal sem solda; c) anel externo da região da solda; d) anel interno da região da solda; e) região interna do ponto sem fusão.

Para garantir a qualidade da união soldada, após o teste de tração deve existir depósito de alumínio sobre a superfície da chapa de aço. O quadro da fig. 4.11 b mostra a composição da superfície da chapa de aço antes da soldagem. Foi assumido que as camadas estão distribuídas uniformemente sobre a superfície e que as diferenças são pequenas. Pode-se observar que existe na superfície sem solda um percentual alto de Níquel 78%, Ouro 18% e uma pequena quantidade de Zinco 4%.

No quadro da fig. 4.11.c pode-se ver a composição da região externa do ponto de solda. Nesta parte existe alumínio, aproximadamente 10%, e a exposição do cobre, 23%, significando que ocorreu um processo semelhante à brasagem, com difusão dos materiais que formam o revestimento concentrando-se nesta região.

No quadro da fig. 4.11.d é possível observar 95,5% de alumínio e o restante é ferro demonstrando que houve união dos materiais. É importante observar que foi gerado um anel que mostra uma área uniforme de fusão do componente eletrônico com a chapa.

No quadro da fig. 4.11.e é mostrada a composição da projeção onde é possível avaliar uma combinação muito próxima da parte não soldada, evidenciando que no centro não é a área de união que fornece mais resistência a tração mecânica da peça.

5 CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados foi comprovado que é possível realizar a união entre um capacitor eletrolítico envolto em uma caneca de alumínio com uma chapa de aço recoberta com ouro, níquel e cobre, através do processo de soldagem por resistência elétrica, obtendo-se juntas com propriedades adequadas às aplicações desses componentes;

A pressão de soldagem foi a variável que ocasiona o maior influência sobre os critérios de avaliação estudados, a resistência à tração e integridade das camadas protetoras contra oxidação. Para evitar marcas na superfície das chapas a pressão deve ser elevada, contudo para garantir uma solda mais resistente, a pressão deve ser menor. Assim, para a combinação de requisitos proposta para uma junta capaz de atender aos requisitos específicos do projeto, esta variável deve ser analisada em conjunto com as demais para definição do nível adequado de pressão nos eletrodos.

A corrente de soldagem foi o parâmetro mais significativo para qualidade da união, entretanto observou-se que somente a corrente não é suficiente para garantir os requisitos esperados de resistência mecânica e integridade superficial.

O tempo de soldagem tem pequena influência na resistência mecânica da solda e, dentro do limite de parâmetros estudados não influencia a qualidade superficial.

O tempo de retenção após o período de soldagem tem uma influência pequena nos resultados de resistência de tração, sendo assim preferíveis tempos mais curtos para permitir maior produtividade.

Analisando a influência conjunta da corrente, pressão e dos tempos sobre as características resultantes foi possível definir um padrão que atende aos requisitos desejados. Neste estudo verificou-se que a pressão no nível de 0,34 MPa reduz a quantidade de marcas na superfície e a corrente mais elevada de 18 kA aumenta a resistência à tração com uma menor quantidade de pontos de fragilização.

Os experimentos realizados em corpos de prova com diferentes espessuras de camadas de níquel e cobre permitiram estabelecer limites de aceitabilidade para as camadas destes materiais. As peças com espessura da camada de níquel entre 1 e 2 μm e espessura de cobre entre 6 e 10 μm permitiram produzir juntas soldadas com resistência mecânica superior à especificada e número de pontos de oxidação dentro do limite tolerável.

A análise do ponto de solda revelou a existência de três regiões distintas: na parte central que ocorre uma pequena união dos materiais, circundando esta região há um anel em que ocorre fusão e na região periférica deste anel ocorre fusão incompleta.

Como previsto não se observou a ocorrência dos filamentos de solda (*whiskers*) utilizando os intervalos de parâmetros especificados e os materiais selecionados neste trabalho,

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer uma análise da microestrutura na região do botão de solda, visando identificar fases e compostos intermetálicos presentes.

Realizar estudo semelhante utilizando o processo de soldagem por fricção, que em outros estudos apresentou soldas com propriedades mecânicas melhores.

Avaliar a influência dos fatores mais importantes e tentar buscar uma relação empírica, ainda que baseada na modelagem do processo, entre os parâmetros.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AWS (1998). **Welding Handbook. Vol. 2: Welding Process, 8º ed.** International Standard Book Number: 0-87171-354-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Rd., P.O. Box 351040, Miami, FL 33135.

AWS (1999). **Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes.** International Standard Book Number: 0-87171-564-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.

AWS/SAE D8.9M (2002). **Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials.** International Standard Book Number: 0-87171-672-0. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126. Printed in the U.S.A.

Bálsamo, P. S. S. ; Vilarinho, L. O. ; M. Vilela ; Scotti, A. . (2000) **“Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy”**. The Int. Journal for the Joining of Materials, v. 12, n. 2, p. 48-59.

Branco, H. L. O. (2004). **Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. Dissertação de Mestrado,** Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 113p.

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.

Cho, Y. e Rhee, S. (2000) **“New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding”**. Meas. Sci. Technol., 11, pp. 1173–1178.

Cho, Y. e Rhee, S. (2002). **“Primary Circuit Dynamic Resistance Monitoring and its Application to Quality Estimation during Resistance Spot Welding.”** Welding Journal, June, pp. 104-s – 111-s.

Cho, Y. e Rhee, S. (2003). **“Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding.”** Welding Journal, August, pp. 195-s – 201-s.138

Czoara, C. A. e Kilmer, T. H. (1976). **“Advancing the State of the Art in Resistance Welding.”** Welding Journal, April, Vol. 55, Nº 4, pp. 259 – 263.

Djanarthany S., Viala J.C., Bouix J (2001)., **Mater. Chem. Phys.** 72 pp 301.

Domenech, C. (2004). **“Seleção do esquema de amostragem”**. Falando de Qualidade. Banas, Nº 146, p. 80-82.

EWI (2002). **“Magnesium Joining for Automotive Applications”**. EWI CRP Report no.217, July 30, 50p.

Galyon G.T., **“The Annotated Whisker Bibliography and Anthology-version 1.2”**, November 2003 (available at http://www.nemi.org/projects/ese/tin_whisker_activities.html).

Galyon G.T. and Palmer L. (2004), **“The Structure and Kinetics of Tin-Whisker Formation and Growth on High Tin Content Finishes,”** Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies-Marcel Dekker, Inc.-N.Y., ed. Karl J. Puttlitz and Kathleen A. Stalter, pp. 851-914.

Gedeon, S. A., Schrock, D., LaPointe, J. e Eagar, T. W. (1984). **“Metallurgical and Process Variables Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Steels.”** Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 1 – 9.

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.

Gomes, E. B. (2006), **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**, Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia mecânica, UNIFEI, pp 37 – 44.

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.

Holliday, R., Parker, J. D. e Williams, N. T. (1996). **“Relative contribution of electrode tip growth mechanisms in spot welding zinc coated steels”**. Welding in the World. Vol. 37, Nº 4, pp. 186-193.

Houlcroft, P. T. (1979). **Welding process technology**. Cambridge University Press, New York, E.U.A., 313 p.

Intermachinery (2002). **Manual de Soldagem por Resistência a Ponto**, 41 p. 139

Jones J.A. (1997). **“Gold aluminium intermetallics currente and future considerations”** European Space Agency, Provided by the NASA Astrophysics Data System, Article Nr.1997 ESA SP.395, pp 411 – 415.

Kaiser, J. G., Dunn, G. J. e Eagar, T. W. (1982). **“The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding.”** Welding Journal, June, pp. 167-s – 174-s.

Karagoulis, M. J. (1994). **“A Nuts-and-Bolts Approach to the Control of Resistance Spot Welding.”** Welding Journal, July, pp. 27 – 31.

Kim, D. C., Park H. J., Hwang I.S. e Kang M.J (2009). **Resistance spot welding of aluminum alloy sheet 5J32 using SCR type and inverter type power supplies**, Archives of Materials Science and Engineering, Vol 38, July, 2009 pp 55 – 60.

Lauricella C.M.,(2010), **Toxicidade do chumbo e sua substituição em ligas estanho-chumbo**, Journal Health and Sciece Institute pp -105- 108

Machado, I. G. (1996). **Soldagem & Técnicas conexas: Processos de soldagem**. Porto Alegre, 477p.

Marques, P. V. (1991). **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte/MG, (ed) ESAB, 352p.

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

Montgomery, D. C. (2001) **Design and Analysis of Experiments 5th edition**, John Wiley & Sons, 684p.

Moreira F.R.M, Moreira J.C. (2004). **“Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde”** Rev Panam Salud Publica. pp119-29.

Nascimento, J. R. (2012). **“Estudo comparativo de sistemas de radiografia digital na inspeção de solda”** UFRJ/COPPE, pp 4 – 12 .

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.

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

Powell, H. J., Westgate, S. A. e Wiemer, K. (1996). **“A practical guide to process and quality control for resistance spot welding”**. The Welding Institute, Report n° 569/1996, August.

RWMA (1989). **Resistance Welding Manual**, Resistance Welder Manufacturing Association. U.S.A., 4th Ed., Nov., 443 p.

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

Ross, P. J., (1991), **“Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade”**. Makros Books do Brasil Editora Ltda, 333p.

Roswell, S. L. (1976). **“Resistance Spot Welded Galvanized Steel Sheet, Electrode Life and Corrosion Tests.”** The Welding Institute, Report n° 17/1976/P, September. 44p.

Satonaka, S. e Matsuyama, K. (2000). **“Review on Inspection Techniques for Spot Welds.”** Welding in the World, Vol. 44, N° 3, pp. 29 – 36.

Schwartz, M.M. (1993) **“ASM Handbook, Vol 6, Welding, Brazing and Soldering”**,

Stocco, D. (2010) **“Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas”** Escola politécnica da Universidade de São Paulo, pp 67 – 75.

Stoloff N. S., Liu C. T., Deevis S. C., (2000), **“Emerging applications of intermetallics.”** Intermetallics 8, pp1313.

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.

Tang, H., Hou, W., Hu, S. J., Zhang, H. Y., Feng, Z. e Kimchi, M. (2003). **“Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality.”** Welding Journal, May, pp. 116-s – 124-s.

TWI (2005) **Resistance Welding** (www.twi.co.uk).

Vanderplaats, G. N., 1984, **“Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications”**, McGraw Hill, 333p.

Vieira, S.R.B.,(1996) **“Capítulo 4 – O Método Taguchi”**; Dissertação, UFSC, Florianópolis.

Weber, G., Preß, H. (1994). **“Description of the electrical processes in the secondary circuit of resistance welding equipment.”** Welding in the World. Vol. 33, N° 1, pp. 8-13.

Wainer, E., Brandi, S. D., de Mello, F. D. H., (1992). **SOLDAGEM, processos e metalurgia.** (ed) Editora Edgard Blucher Ltda. pp 217 – 242.

Wolff, M. A. (2005) **Medidas da Variação de Temperatura Durante a Soldagem com Máquina de Soldagem a Pontos.** Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 07/2005, Abril, 11 p.

Wu, K. C. (1968). **“Eletróde Indentation Criterion for Resistance Spot Welding”**. Welding Journal. Vol. 47, N° 10, pp. 472-s – 478-s.

Yeung, K. S. e Thornton, P. H. (1999). **“Transient Thermal Analysis of Spot Welding Eletrodes.”** Welding Journal, January, pp. 1-s – 6-s.

Zhou, M., Zhang, H. e Hu, J. (2003). **“Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds.”** Welding Journal, April, pp. 72-s – 77-s.