

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Daniela Mach*
do Zampolli E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM *30/10/00*
Roseana da Exaltação
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

B C

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM NOS PROCESSOS DE
ULTRA-SOM E RESISTÊNCIA PARA
ALUMÍNIO E COBRE**

Autora: Daniella Machado Zampolli

Orientadora: Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan

88/2000

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM NOS PROCESSOS DE
ULTRA-SOM E RESISTÊNCIA PARA
ALUMÍNIO E COBRE**

Autora: **Daniella Machado Zampolli**

Orientadora: **Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000
S.P. – Brasil

200111923
E26117002

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
SOLDAGEM NOS PROCESSOS DE
ULTRA-SOM E RESISTÊNCIA PARA
ALUMÍNIO E COBRE**

Autora: Daniella Machado Zampolli

Orientadora: Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan


Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente
DEF / FEM - UNICAMP


Prof. Dr. Ramon Cortes Paredes
DEMEC - UFPR


Profa. Dra. Maria Helena Robert
DEF / FEM - UNICAMP

Campinas, 30 de Outubro de 2000

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais, em primeiro lugar, aos meus amigos mais queridos e aos meus familiares.

Agradecimentos

Agradeço à todas as pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho, porém algumas merecem uma citação especial:

Aos meus pais e à minha tia, por terem sempre me apoiado em todas as minhas decisões, inclusive nas minhas indecisões;

À Profa. Roseana, pela orientação do caminho a ser seguido desde o início, e pela contribuição em meus conhecimentos científicos;

Aos meus amigos queridos de São Paulo, que acompanharam a realização do trabalho desde o primeiro dia;

Ao amigos de soldagem Luciano, Eduardo, Carlos, Celso, Roderley e Mirão, pelas ajudas de última hora e discussões sobre o trabalho, e principalmente companhia (também à Lucilaine);

Ao Leandro, por toda a ajuda e convivência durante estes dois anos tão importantes, e muito mais;

Ao pessoal do Departamento de Fabricação, pela convivência diária e pela ajuda no que fosse preciso;

Ao pessoal da Bosch, imprescindíveis para a realização do trabalho;

Ao Prof. Carvalho, pela consultoria estatística;

Às empresas Serra Bucher e Sigmatest, que prestaram toda a ajuda de que necessitei;

À FAPESP e CAPES, pelo auxílio financeiro.

Epígrafe

“Grandes realizações não são feitas por impulso, mas sim por uma soma de pequenas realizações.”

Vincent Van Gogh

Resumo

ZAMPOLLI, Daniella Machado, *Otimização das Condições de Soldagem nos Processos de Ultra-Som e Resistência para Alumínio e Cobre*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 173 p. Dissertação (Mestrado).

Neste trabalho, procurou-se encontrar as melhores junções soldadas, de alumínio e cobre, por ultra-som e por resistência a ponto, através de uma otimização destes processos, com o emprego de um planejamento fatorial completo e do método estatístico da superfície de resposta. Posteriormente, realizou-se uma comparação entre as propriedades especificadas para a peça, resistência ao cisalhamento, resistência ao arrancamento e resistência elétrica. Os materiais utilizados foram as ligas de alumínio AA1100-O e de cobre C10200, a partir das quais soldou-se as junções alumínio/alumínio, cobre/cobre e alumínio/cobre, utilizadas em um mancal porta-escovas, fabricado pela empresa Robert Bosch do Brasil. Os resultados obtidos mostraram que, de um modo geral, o processo de ultra-som gerou as junções mais apropriadas para aplicação na peça, além de outras vantagens mais específicas complementares, como maior facilidade, rapidez de soldagem e condições de trabalho menos severas ao operador. As junções alumínio/alumínio foram soldadas por ambos os processos, tendo-se obtido resultados bastante próximos. Quanto às junções cobre/cobre e alumínio/cobre, a soldagem mostrou-se válida através do processo de ultra-som, enquanto que o processo por resistência não foi apropriado para os tipos de materiais utilizados. Para todas as soldagens, as ferramentas estatísticas utilizadas trouxeram resultados confiáveis, já que apresentaram embasamento teórico.

Palavras Chave

Soldagem de Metais Dissimilares, Soldagem por Ultra-Som, Soldagem por Resistência a Ponto.

Abstract

ZAMPOLLI, Daniella Machado, *Optimization of the Welding Conditions in the Ultrasound and Resistance Processes for Alluminum and Copper*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 173 p. Dissertação (Mestrado).

In this work, the objective was to find the best junctions welded by the ultrasound and the spot resistance welding processes, through an optimization of their main parameters, employing a complete factorial planning and the statistic method of the surface response. Lately, it was performed a comparison among the specified properties for the unions, shear resistance, peel resistance and electric resistance. The utilized materials were the aluminum AA1100-O and the copper C10200 alloys, with which the unions aluminum/aluminum, copper/copper and aluminum/copper were welded, and which are employed in an automotive electric part, produced by the Robert Bosch do Brasil company. The obtained results showed that, in a general way, the ultrasound process produced the most applicable junctions for the part, and also other more specific complementary advantages, like an easier, cleaner and faster welding and some less severe work conditions for the worker. The junctions aluminum/aluminum were welded by both processes, being the results very close one to the other. For the junctions copper/copper and aluminum/copper, the welding was successful through the ultrasound process, while through the resistance process, the results with the employed materials were not satisfactory. The studied statistical tools brought trustful results for all the experiments, since they were based in theoretical concepts.

Key Words

Dissimilar Metal Welding, Ultrasound, Resistance Spot.

Índice

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xiv
Nomenclatura.....	xvii
1. – Introdução e Objetivos do Trabalho.....	1
2. – Introdução Teórica.....	4
2.1 – Soldagem por Ultra-Som.....	4
2.1.1 – Processo de Soldagem por Ultra-Som.....	5
2.1.2 – Soldagem de Alumínio por Ultra-Som.....	17
2.1.3 – Soldagem de Cobre por Ultra-Som.....	20
2.1.4 – Soldagem de Alumínio/Cobre por Ultra-Som.....	21
2.2 – Soldagem por Resistência a Ponto.....	22
2.2.1 – Processo de Soldagem por Resistência a Ponto.....	22
2.2.2 – Soldagem de Alumínio por Resistência.....	33
2.2.3 – Soldagem de Cobre por Resistência.....	35
2.2.4 – Soldagem de Alumínio/Cobre por Resistência.....	36
2.3 – Ensaios.....	38
2.3.1 – Ensaio de Cisalhamento.....	38
2.3.2 – Ensaio de Arrancamento.....	42
2.3.3 – Ensaio de Resistência Elétrica.....	44
2.4 – Metalografia Complementar.....	45

2.5 – Planejamento Experimental e Método da Superfície de Resposta.....	45
3. – Técnicas Experimentais.....	50
3.1 – Introdução.....	50
3.2 – Materiais Utilizados.....	51
3.3 – Equipamentos Utilizados para os Ensaios.....	54
3.3.1 – Equipamento de Ensaio de Cisalhamento.....	54
3.3.2 – Equipamento de Ensaio de Arrancamento.....	55
3.3.3 – Equipamento de Medição de Resistência Elétrica.....	56
3.3.4 – Equipamentos para Metalografia.....	56
3.4 – Planejamento Experimental para a Soldagem por Ultra-Som.....	56
3.5 – Descrição do Procedimento Experimental para o Processo de Ultra-Som.....	64
3.5.1 – Equipamento de Soldagem por Ultra-Som.....	64
3.5.2 – Ajuste do Equipamento de Soldagem por Ultra-Som.....	66
3.5.3 – Monitoramento dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Ultra-Som.....	68
3.5.4 – Soldagem por Ultra-Som de Alumínio/Alumínio.....	68
3.5.5 – Soldagem por Ultra-Som de Cobre/Cobre.....	71
3.5.6 – Soldagem por Ultra-Som de Alumínio/Cobre.....	72
3.5.7 – Ensaios das Amostras Soldadas por Ultra-Som.....	73
3.5.8 – Preparação para Metalografia das Amostras Soldadas por Ultra-Som.....	73
3.5.9 – Medições e Testes Complementares Para a Soldagem por Ultra-Som.....	76
3.6 – Planejamento Experimental para a Soldagem por Resistência.....	76
3.7 – Descrição do Procedimento Experimental para o Processo de Resistência.....	79
3.7.1 – Equipamentos de Soldagem por Resistência.....	79
3.7.2 – Ajuste dos Equipamentos de Soldagem por Resistência.....	82
3.7.3 – Monitoramento dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Resistência.....	83
3.7.4 – Soldagem por Resistência de Alumínio/Alumínio.....	84
3.7.5 – Soldagem por Resistência de Cobre/Cobre.....	86
3.7.6 – Soldagem por Resistência de Alumínio/Cobre.....	88
3.7.7 – Ensaios das Amostras Soldadas por Resistência.....	89
3.7.8 – Preparação para Metalografia das Amostras Soldadas por Resistência.....	90

4. – Resultados e Discussões.....	92
4.1 - Soldagem por Ultra-Som.....	92
4.2 – Soldagem da Junção Alumínio/Alumínio.....	93
4.2.1 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento.....	97
4.2.2 – Resultados do Ensaio de Arrancamento.....	101
4.2.3 – Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica.....	102
4.3 – Soldagem da Junção Cobre/Cobre.....	104
4.3.1 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento.....	106
4.3.2 – Resultados do Ensaio de Arrancamento.....	108
4.3.3 – Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica.....	109
4.4 – Soldagem da Junção Alumínio/Cobre.....	110
4.4.1 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento.....	113
4.4.2 – Resultados do Ensaio de Arrancamento.....	116
4.4.3 – Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica.....	117
4.5 – Medições e Testes Complementares.....	118
4.6 – Soldagem por Resistência a Ponto.....	126
4.7 – Soldagem da Junção Alumínio/Alumínio.....	126
4.7.1 – Resultados do Ensaio de Cisalhamento.....	128
4.7.2 – Resultados do Ensaio de Arrancamento.....	135
4.7.3 – Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica.....	136
4.8 – Soldagem da Junção Cobre/Cobre.....	137
4.9 – Soldagem da Junção Alumínio/Cobre.....	142
4.10 – Comparação dos Resultados	145
5. – Conclusões.....	149
Referências Bibliográficas.....	152
Bibliografia Consultada.....	159
Anexo I.....	161

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Processo de Soldagem por Ultra-Som.....	5
Figura 2.2 – Interface de Chapas de Alumínio Soldadas por Ultra-Som.....	7
Figura 2.3 – Movimento Cisalhante de Quebra de Filmes de Óxidos.....	12
Figura 2.4 – Dispersão das Camadas de Óxidos Durante a Soldagem.....	12
Figura 2.5 – Curvas de Soldagem Para Condições Superficiais Distintas.....	13
Figura 2.6 – Processo de Soldagem por Resistência a Ponto.....	23
Figura 2.7 – Sequência de Soldagem por Resistência a Ponto.....	24
Figura 2.8 – Resistências em um Processo de Soldagem a Ponto.....	25
Figura 2.9 – Ponto Soldado por Resistência a Ponto.....	26
Figura 2.10 – Regiões Formadas no Metal pela Soldagem por Resistência.....	27
Figura 2.11 – Soldagem de Peças de Diferentes Espessuras e Condutividades.....	31
Figura 2.12 – Ensaio de Cisalhamento.....	39
Figura 2.13 – Medição do Diâmetro Médio de Pontos Elípticos Soldados.....	40
Figura 2.14 – Medição do Diâmetro Médio de Pontos Irregulares Soldados.....	41
Figura 2.15 – Classificação dos Tipos de Pontos Soldados por Resistência.....	42
Figura 2.16 – Ensaio de Arrancamento.....	43
Figura 3.1 – Equipamento de Ultra-Som.....	65
Figura 3.2 – Equipamento de Soldagem por Resistência.....	79
Figura 4.1 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Alumínio.....	97
Figura 4.2 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Maior Resistência ao	100

Cisalhamento.....	
Figura 4.3 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Menor Resistência ao Cisalhamento.....	100
Figura 4.4 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Menor Resistência ao Arrancamento.....	102
Figura 4.5 – Interfaces das Junções Cobre/Cobre.....	107
Figura 4.6 – Interfaces das Junções Cobre/Cobre.....	109
Figura 4.7 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Cobre Para os Parâmetros Amplitude e Energia.....	112
Figura 4.8 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Cobre Para os Parâmetros Pressão e Energia.....	112
Figura 4.9 – Interface da Junção Alumínio/Cobre Utilizada Para Ensaio de Microdureza.....	122
Figura 4.10 – Gráfico Potência x Tempo da Soldagem de Junção com Limpeza Superficial.....	124
Figura 4.11 – Gráfico Potência x Tempo da Soldagem de Junção sem Limpeza Superficial.....	124
Figura 4.12 – Interface de Junção Alumínio/Alumínio com Limpeza Superficial.....	125
Figura 4.13 – Rasgamento do Alumínio no Ponto de Solda Cisalhado das Junções Alumínio/Alumínio.....	129
Figura 4.14 – Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Resistência a Ponto.....	132
Figura 4.15 – Presença de Indentação e Vazios na Solda de Junção Alumínio/Alumínio.....	133
Figura 4.16 – Interfaces das Junções Alumínio/Alumínio.....	133
Figura 4.17 – Microestruturas da Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Fusão.....	135
Figura 4.18 – Junções Alumínio/Alumínio Arrancadas.....	136
Figura 4.19 – Faces dos Eletrodos Utilizados Para a Soldagem da Junção Cobre/Cobre.....	139
Figura 4.20 – Tentativas de Soldagem de Junções Cobre/Cobre.....	141
Figura 4.21 – Junção Alumínio/Cobre Soldada por Resistência a Ponto.....	144

Figura 4.22 – Junções Alumínio/Cobre Cisalhadas.....	144
Figura AI.1 – Gráfico Probabilístico de Efeitos.....	162
Figura AI.2 – Gráfico da Variação da Resistência ao Cisalhamento com os Parâmetros Pressão e Energia.....	163
Figura AI.3 – Superfície de Resposta Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	165
Figura AI.4 – Intervalo de Predição dos Parâmetros Pressão e Energia.....	166
Figura AI.5 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.....	168
Figura AI.6 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.....	170
Figura AI.7 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.....	173

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades dos Materiais Importantes Para a Soldagem por Resistência.....	37
Tabela 3.1 – Composição Química da Liga de Alumínio.....	51
Tabela 3.2 – Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio.....	52
Tabela 3.3 – Propriedades Físicas da Liga de Alumínio.....	52
Tabela 3.4 – Variação da Resistividade Elétrica com a Temperatura.....	52
Tabela 3.5 – Composição Química da Liga de Cobre.....	53
Tabela 3.6 - Propriedades Mecânicas da Liga de Cobre.....	53
Tabela 3.7 - Propriedades Físicas da Liga de Cobre.....	53
Tabela 3.8 – Variação da Resistividade Elétrica com a Temperatura.....	54
Tabela 3.9 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Cisalhamento.....	60
Tabela 3.10 - Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Arrancamento.....	60
Tabela 3.11 – Combinação dos Fatores no Planejamento Experimental Fatorial.....	61
Tabela 3.12 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.....	70
Tabela 3.13 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.....	71
Tabela 3.14 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.....	73
Tabela 3.15 – Amostras Analisadas Metalograficamente.....	75
Tabela 3.16 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Cisalhamento.....	78
Tabela 3.17 - Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Arrancamento.....	78
Tabela 3.18 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.....	86
Tabela 3.19 – Amostras Analisadas Metalograficamente.....	91

Tabela 4.1 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	94
Tabela 4.2 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	97
Tabela 4.3 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	104
Tabela 4.4 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Cobre/Cobre.....	105
Tabela 4.5 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Cobre/Cobre.....	106
Tabela 4.6 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Cobre/Cobre.....	110
Tabela 4.7 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Cobre.....	110
Tabela 4.8 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Cobre.....	113
Tabela 4.9 – Resultados das Porcentagens dos Elementos nas Superfícies dos Metais.....	115
Tabela 4.10 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Cobre.....	117
Tabela 4.11 – Valores de Temperatura para a Soldagem por Ultra-Som.....	119
Tabela 4.12 – Valores de Microdureza para a Junção Alumínio/Cobre.....	122
Tabela 4.13 – Resistência ao Cisalhamento de Junções com Limpeza Superficial....	123
Tabela 4.14 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	127
Tabela 4.15 – Região do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	128
Tabela 4.16 – Valores Sugeridos e Utilizados para Soldagem de Junções Alumínio/Alumínio de 1,8 mm de Espessura.....	131
Tabela 4.17 – Características dos Pontos Soldados Cisalhados.....	134

Tabela 4.18 – Características dos Pontos Soldados Arrancados.....	136
Tabela 4.19 - Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Alumínio.....	137
Tabela AI.1 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.....	161
Tabela AI.2 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.....	164
Tabela AI.3 – Terceira Etapa do Planejamento Experimental.....	166
Tabela AI.4 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.....	167
Tabela AI.5 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.....	167
Tabela AI.6 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.....	168
Tabela AI.7 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.....	169
Tabela AI.8 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.....	169
Tabela AI.9 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.....	170
Tabela AI.10 – Terceira Etapa do Planejamento Experimental.....	171
Tabela AI.11 – Quarta Etapa do Planejamento Experimental.....	172
Tabela AI.12 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.....	172
Tabela AI.13 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.....	172

Nomenclatura

P – potência (Watts)

F – força (Newtons)

A – amplitude de vibração (mm)

E – energia (Joules)

t – tempo (segundos)

Q – quantidade de calor (Joules)

R – resistência elétrica (ohms)

I – corrente elétrica (Ampères)

MSR – Método da Superfície de Resposta

a, p, e – parâmetros amplitude, pressão e energia do planejamento fatorial do processo de ultra-som

R(T) – resistência elétrica no valor da temperatura corrigida, em Ω

R(T₀) – resistência elétrica em um valor arbitrário de temperatura, em Ω

α - coeficiente de temperatura à T₀, em $^{\circ}\text{C}^{-1}$

T - temperatura na qual foi efetuada a medição, em $^{\circ}\text{C}$

T₀ - temperatura especificada, em $^{\circ}\text{C}$

cr, pr, tr – parâmetros corrente, pressão e tempo do planejamento fatorial do processo de resistência

JMP, SAS – programas estatísticos computacionais

Capítulo 1

Introdução e Objetivos do Trabalho

Devido à importância do processo de soldagem dentro da fabricação mecânica, e ao seu crescente desenvolvimento nas últimas décadas, torna-se importante o estudo de aplicações de novas tecnologias de soldagem como possíveis substituições de processos atualmente empregados na indústria. Algumas teorias, descobertas há algumas décadas, vêm sendo ainda largamente testadas com o objetivo de otimização e substituição total ou parcial de antigos procedimentos de fabricação. Muitas delas apresentam restrições físicas quanto às aplicações e desconfiança por parte dos usuários, principalmente porque ainda não foram completamente explicadas ou ainda, porque falham quanto à quantidade de experimental realizado.

Neste trabalho, são estudados dois processos de soldagem capazes de formar junções para uma mesma aplicação. O primeiro processo é conhecido como soldagem por resistência a ponto, largamente empregado em indústria de fabricação de peças de metal de pequena espessura. Este processo foi desenvolvido na Inglaterra por Joule, no ano de 1856, conseguindo a primeira solda elétrica por resistência entre dois arames. Mais tarde, em 1877, também na Inglaterra, Thomson conseguiu aperfeiçoar este sistema, com a aplicação de um esforço mecânico de compressão sobre as duas peças. Atualmente, este processo já vem sendo automatizado e monitorado por computador, gerando junções sobrepostas confiáveis e de alta repetibilidade, principalmente na indústria automotiva.

A soldagem por ultra-som é o segundo processo estudado. Descoberto em 1938, por Ludwig Bergman, quando realizava experimentos com ondas ultra-sônicas e seus efeitos em

metais, este verificou que muitos poderiam ser unidos sobrepostos por soldagem através deste processo. Descobriu, inclusive, que qualquer metal poderia ter seu limite de resistência aumentado através da passagem de ondas ultra-sônicas em seu estado fundido, já que a passagem destas causava a diminuição de grão do metal, aumentando, assim, sua resistência mecânica. Em 1960, foi construído e patenteado o primeiro equipamento de solda por ultra-som para metais, desde quando vem ocorrendo grandes avanços nesta tecnologia em termos mundiais. No Brasil, porém, raras aplicações foram realizadas neste campo, sendo o processo pouco conhecido pela indústria.

O processo apresenta a vantagem da não utilização de fusão para união dos materiais, mantendo ou, em alguns casos, reforçando suas propriedades originais. O quadro atual de aplicação deste processo mostra o emprego de energia ultra-sônica em diversas atividades além da união de metais e plásticos: ensaios não-destrutivos e limpeza industrial.

Com a necessidade da escolha técnica de um destes processos para soldagem de parte de um componente de sua fabricação, a empresa Robert Bosch Ltda. apresentou a oportunidade de realização deste trabalho, através do qual, após análise dos resultados encontrados, foi possível se chegar a um leque de informações importantes para a empresa: vantagens e desvantagens, tempo gasto em preparação, limitações, dificuldades e possibilidades futuras de cada um dos processos.

A empresa vinha utilizando-se dos processos de soldagem por brasagem e por resistência a ponto para a soldagem do componente (barra e guia de um mancal porta-escovas, mostrados no anexo 1), e por motivos econômicos, ambientais e de segurança, visava a substituição destes pela técnica de ultra-som, mais moderna, limpa e segura. Os três processos citados acima são os mais apropriados para a soldagem pontual de metais de pequena espessura, nos quais se espera alta resistência mecânica e repetibilidade de resultados.

Estas são as características necessárias para a soldagem dos materiais existentes no mancal porta-escovas, que faz parte do conjunto do motor elétrico utilizado em guinchos acoplados em veículos, tendo como principal usuário a Chrysler, em seu veículo Jeep, fabricado nos Estados Unidos.

O trabalho tem como objetivo principal a otimização de parâmetros importantes de soldagem de junções através dos processos de ultra-som e de resistência elétrica a ponto, seguida da realização de ensaios das uniões de maior resistência mecânica encontradas, permitindo uma comparação final entre propriedades mecânicas e propriedade elétrica das melhores junções de alumínio/alumínio, cobre/cobre e alumínio/cobre obtidas pelos dois diferentes processos.

Estas propriedades foram comparadas através dos ensaios mecânicos de cisalhamento e arrancamento e do ensaio de condutividade elétrica. Foi ainda analisada a influência dos principais parâmetros de cada um dos processos de soldagem nas propriedades das junções soldadas. Os ensaios mecânicos e elétrico escolhidos foram os que melhor representaram os esforços sofridos pela junção em seu ambiente de trabalho, e determinaram valores limites das propriedades mecânicas e elétrica imprescindíveis para a qualidade da peça.

Capítulo 2

Introdução Teórica

Neste capítulo, procurou-se apresentar características dos processos de soldagem por ultra-som e resistência a ponto, no que se refere à: formação da solda, parâmetros que influenciam o processo, propriedades das junções formadas, e ensaios das soldas.

Para a realização deste trabalho, foi feita uma pesquisa nas bases de dados Ei Village, Probe e Compendex Web, no período de 1.980 a 2.000, direcionada para os dois processos e para junções de metais dissimilares, concluindo-se que, apesar da crescente utilização de junções de metais dissimilares, existe pouco estudo científico sobre as características destas junções, assim como sobre a soldagem de metais por ultra-som.

2.1 Soldagem por Ultra-som

Um dos processos mais adequados para se soldar junções de metais de pequenas dimensões e espessura, através de sobreposição, é o ultra-som. Este processo vem crescendo em utilização e substituindo os processos por resistência elétrica, devido à vantagens como: maior capacidade de produção, menor agressão ao meio-ambiente e ao operador, e principalmente, devido à possibilidade de soldagem de metais dissimilares (especialmente os não-ferrosos), os quais apresentam dificuldades ao serem soldados por resistência.

Como o ultra-som é um processo considerado como soldagem no estado sólido, problemas como formação de intermetálicos, expulsão do metal e transformação de estrutura não chegam a ocorrer. Os processos de soldagem no estado sólido envolvem a utilização de

deformação ou difusão e deformação limitada para produção de junções entre materiais similares e dissimilares.

A pouca literatura existente sobre o processo mostra que ainda há um leque de descobertas a serem realizadas, para que se possa explicar a teoria completa, e quais os melhores métodos para medição da qualidade das junções. Nos itens a seguir, tem-se uma apresentação do processo, seguida pelas características de soldagem de cada uma das junções realizadas neste trabalho, conforme teoria já disponível.

2.1.1 Processo de Soldagem por Ultra-som

O princípio da soldagem por ultra-som baseia-se na utilização de uma fonte de energia vibratória, proveniente de energia elétrica transformada por um transdutor, e da aplicação de pressão mecânica nas peças para garantir a união, conforme a figura 2.1. É um processo de soldagem no estado sólido, no qual a coalescência é produzida nas superfícies de contato através da aplicação local pontual de energia de alta frequência vibratória, enquanto as partes são mantidas unidas sob pressão estática moderada.

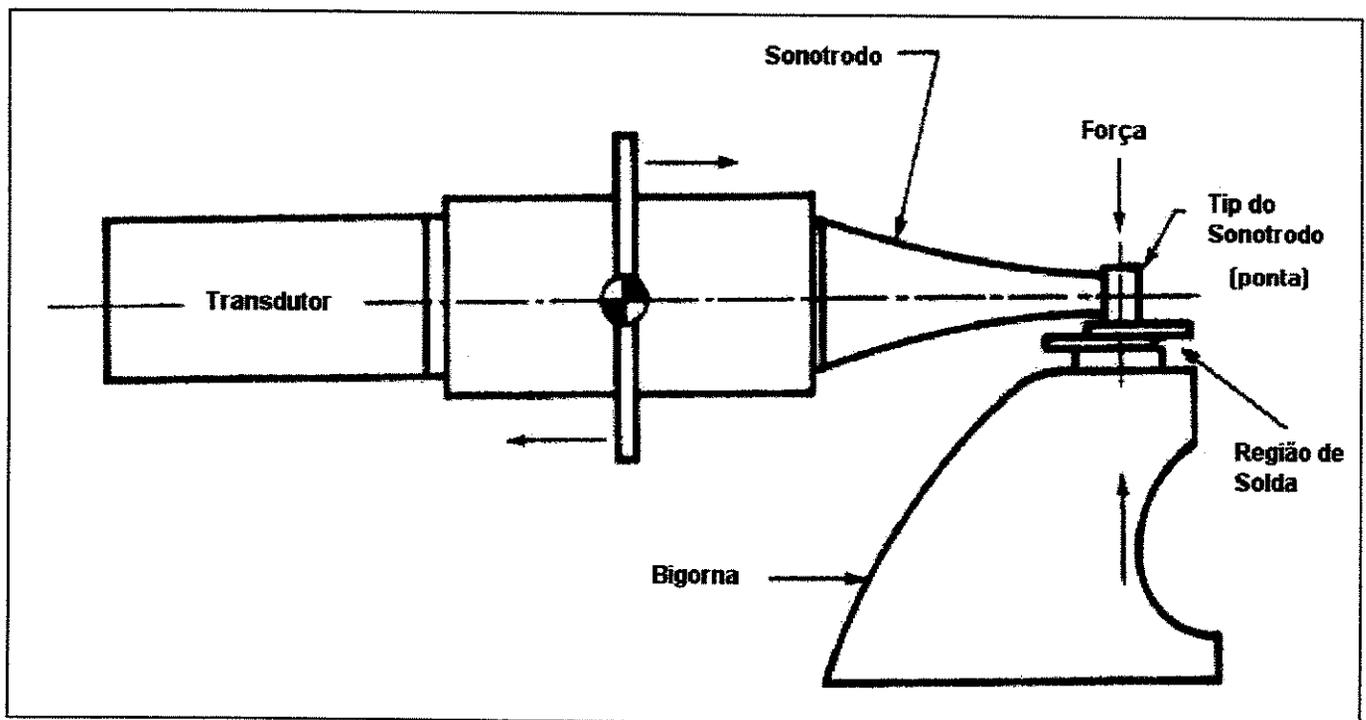


Figura 2.1 – Processo de Soldagem por Ultra-Som (ASM, 1993).

Conforme a figura 2.1, neste sistema, o sonotrodo vibra longitudinalmente para produzir um movimento paralelo à interface a ser soldada. Este sistema funciona em máquinas de baixa potência. A força para fixação é o resultado de um momento fletor aplicado pelo braço do sonotrodo nas peças, indicada pela seta. A bigorna serve como base de fixação e apoio das peças. Tanto esta como o sonotrodo apresentam superfícies rugosas, ou possuem um recartilhado para segurar as partes a serem unidas, e prevenir deslizamentos indesejáveis.

A união dos metais pontualmente ocorre na profundidade de microns a partir das superfícies de contato, tornando bastante difícil uma visualização da região soldada. A melhor forma de visualização de um ponto soldado por ultra-som é por meio de um corte de uma seção da interface da união. É através da interface que se pode verificar a existência de vazios, óxidos dispersos, inclusões de outros elementos como contaminantes, e descontinuidade da solda.

Na figura 2.2, tem-se um exemplo de ponto soldado por ultra-som: a interface de duas chapas de alumínio 1100-O, ilustrando a formação de uma solda descontínua, com alguns vazios (partes pretas ao longo da interface), após a dispersão do filme de óxido das superfícies que ocorre durante a soldagem deste metal.

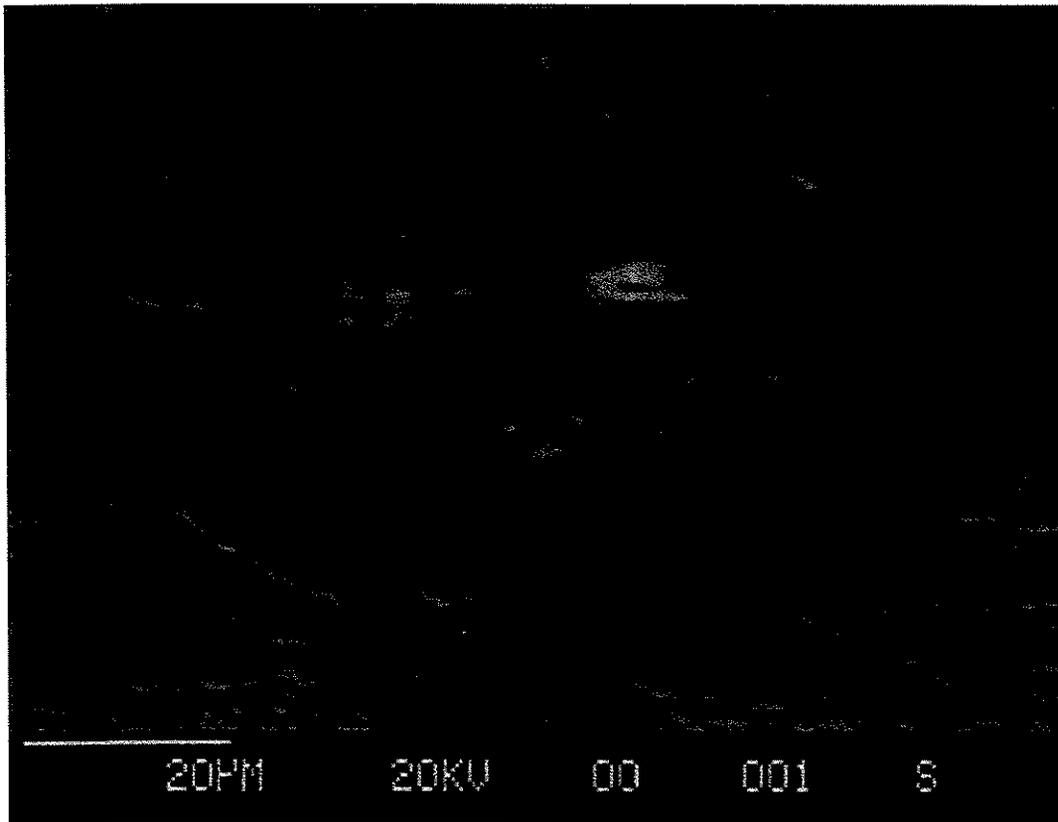


Figura 2.2 – Interface de Chapas de Alumínio Soldadas por Ultra-Som.

A seqüência automática de funcionamento de um equipamento de ultra-som é a seguinte:

- o sonotrodo é acionado e assentado;
- a força do sonotrodo sobre as peças é aplicada;
- a energia vibratória pulsante programada de soldagem é aplicada (em algumas aplicações, é vantajosa a aplicação da pressão nas peças após o início da oscilação do sonotrodo);
- ocorre a formação da junção;
- a energia é cortada;
- o sonotrodo é retraído.

Para que a solda seja bem feita, o equipamento de ultra-som deve garantir pulsos seqüenciados e controlados durante as vibrações.

A geração da energia para a soldagem por ultra-som é feita através da transformação da frequência convencional do equipamento de 50 Hz ou 60 Hz em frequência de 20.000 Hz ou 40.000 Hz (frequências de vibração acima da frequência audível), utilizando-se um gerador de potência (transformador), que também controla a amplitude e a frequência das vibrações. Esta energia elétrica de alta frequência é conduzida para um conversor eletro-mecânico, onde a energia elétrica é convertida em vibrações mecânicas. Estas vibrações são, então, amplificadas por um transformador de amplitude e pelo sonotrodo do ultra-som antes de serem aplicadas às peças (FLOOD, 1997).

Com o fornecimento de energia, o sonotrodo, oscilando em um plano essencialmente paralelo à interface da junta, produz dois tipos de ondas vibratórias. As ondas transversais (de cisalhamento) penetram no material formando a solda. As ondas verticais (de compressão) não são efetivas na soldagem ultra-sônica de metais. A parte da energia vibratória de alta frequência que efetivamente realiza a solda consiste das vibrações que passam pelos planos das superfícies de contato dos materiais. Estas vibrações de cisalhamento são levadas até a interface dos materiais através dos membros de acoplamento do sonotrodo e do transdutor, vistos também na figura 2.1. As ondas cisalhantes são curtas, o que traz a vantagem da alta repetibilidade e direcionamento. Os sistemas de acoplamento do transdutor podem ser projetados e posicionados para transmitir ondas acústicas tanto de cisalhamento como de compressão.

As vibrações ultra-sônicas (força oscilatória de cisalhamento), combinadas com a força estática do sonotrodo e um incremento moderado de temperatura, induzem tensões de cisalhamento dinâmicas nas peças. Quando estas tensões de cisalhamento dinâmicas possuem magnitude suficiente, ocorre deformação plástica local do material na interface, formando a união entre as partes.

As principais variáveis de controle (parâmetros) do processo são: amplitude de vibração, pressão do sonotrodo (gerando força sobre a área a ser soldada), energia de soldagem e tempo de soldagem (FLOOD, 1997). A potência do processo (P - Watts) é função da amplitude das vibrações (A - milímetros) e da força (F - Newtons) aplicada nas peças. A energia (E - Joules)

necessária para se fazer a solda é função da potência (P) utilizada e do tempo (t - segundos), segundo as equações (2.1) e (2.2) abaixo:

$$P = F \cdot A \quad (2.1)$$

$$E = P \cdot t \quad (2.2)$$

Com relação aos parâmetros do processo, a seleção da frequência é baseada nos níveis de potência exigidos, para cada tipo de material e espessura, na amplitude de vibração necessária, e na pressão exercida pelo sonotrodo. A faixa de frequência para cada equipamento varia com a escolha do transformador e o projeto do sonotrodo. Este parâmetro é automaticamente e precisamente controlado e regulado por um gerador de potência elétrica, para que seja mantido constante durante a soldagem, e seu modo de ajustagem varia com os diferentes tipos de conversores de frequência.

A amplitude constitui o comprimento de oscilação do sonotrodo, permanecendo constante durante o processo de soldagem. A magnitude deste parâmetro é determinada pela forma e constituição do material a ser soldado. Quanto maior a amplitude, maior o deslocamento das camadas superficiais das peças a serem soldadas. Ao se exceder o limite de elasticidade, ocorrerá o aumento da viscosidade do material, danificando-o.

O parâmetro força é estabelecido em função das necessidades de potência ultra-sônica. Todos os equipamentos de solda por ultra-som fornecem uma grande faixa de valores de força de fixação e estas faixas podem ser modificadas através da instalação de diferentes cilindros de pressão hidráulica e pneumática. A função deste parâmetro é a manutenção constante da união das peças durante a soldagem.

A força é imposta pela pressão do sonotrodo sobre as peças, com a ajuda da bigorna como base. Enquanto a pressão dentro das peças se encontra abaixo do limite de elasticidade do material, as peças não deformam, até que seja alcançado um certo valor deste parâmetro que cause deformação local no material. Após a remoção das camadas de contaminantes e óxidos, há

ocorrência de ligação do material puro, e em seguida, a força provoca uma deformação maior na interface até a produção de uma área grande de solda. Durante a formação desta área de solda, existe a difusão atômica entre os metais na área limpa de contato, e uma recristalização dos grãos em uma estrutura fina, semelhante à materiais trabalhados a frio.

Uma força excessiva produz deformação nas superfícies e aumento da potência de soldagem necessária. Uma força insuficiente permite o deslizamento do sonotrodo, podendo causar danos na superfícies das peças, aquecimento excessivo do sonotrodo, ou soldas de baixa qualidade.

O parâmetro tempo é controlado eletronicamente em todos os modernos equipamentos de ultra-som. O intervalo de tempo no qual a energia ultra-sônica é aplicada varia entre 0,005 s para espessuras de fios bastante finos e 1,0 s para seções de peças mais espessas (KAISER, 1978). Este parâmetro pode ser definido constante ou variável em alguns equipamentos.

O tempo de soldagem dita o número de oscilações que atua nas peças a serem soldadas. Quanto maior o tempo de soldagem, maior a possibilidade de ocorrência de danos (deformações plásticas) no material, devido às cargas cíclicas exercidas pela alternância de vibrações e pressão aplicada.

A necessidade de um tempo de soldagem longo indica potência insuficiente. Geralmente, as soldas de melhor qualidade são produzidas com maior potência e um tempo curto. Um tempo de soldagem excessivo gera uma aparência superficial de má qualidade, aquecimento interno do equipamento e trincas na interface. O tempo deve ser ajustado conforme o material e sua espessura, para que as ondas vibratórias tenham seu efeito de soldagem sentido na interface de contato das peças, efeito este que varia de acordo com a estrutura cristalina e a distância que as ondas têm a percorrer. A faixa de espessuras que as ondas podem percorrer chega até 2,00 mm. Deve-se dizer que a espessura da peça inferior a ser soldada não é importante, pois as ondas vibratórias efetivas de soldagem “caminham” somente na espessura da peça superior, em contato com o sonotrodo.

Algumas modificações ou anormalidades em variáveis não ultra-sônicas durante a soldagem, como a condição da superfície das peças, dimensões ou orientação do sentido de laminação das peças, requerem mudanças nas variáveis ultra-sônicas, para se manter a quantidade suficiente de energia, gerando soldas resistentes. Enquanto que a frequência é um parâmetro fixo, a força, o tempo e a amplitude exigem uma correta ajustagem para cada aplicação. A quantidade de energia a ser transferida para a solda é proporcional a estes parâmetros, como visto nas equações 2.1 e 2.2, e deve garantir, além da solda, a remoção de óxidos e impurezas. Uma energia insuficiente gera junções fracas. Um excesso de energia ocasiona deformação nas peças, diminuindo sua seção e enfraquecendo a união diante de um ensaio tracional.

Com relação à condição superficial das peças, durante o processo de ultra-som, camadas de óxidos e outros filmes superficiais são fragmentados e dispersos, e um crescente contato entre os materiais é obtido, o que é uma importante vantagem na soldagem de alumínio e de vidro, materiais que contêm filmes de óxidos superficiais que dificultam uma união de qualidade. O resultado é uma união metalúrgica real formada no estado sólido.

Na figura 2.3, segundo CALVO (1988), como ocorre neste caso para o alumínio e o cobre, as formações de filmes de óxidos em metais são dispersas através de um deslocamento de cisalhamento entre as microasperezas das superfícies das peças em contato. Os primeiros contatos entre as peças são formados nestas microasperezas, que sofrem deformação plástica. A aplicação de carga quebra os filmes de óxidos nestes pontos. Neste estágio, a força do sonotrodo é o principal parâmetro, sendo a rugosidade superficial das peças também importante, já que uma superfície altamente polida diminuirá os deslocamentos de cisalhamento. De outra forma, se as superfícies estiverem bastante rugosas, a área de ligação é limitada, formando vazios grandes, tornando a solda pouco uniforme.

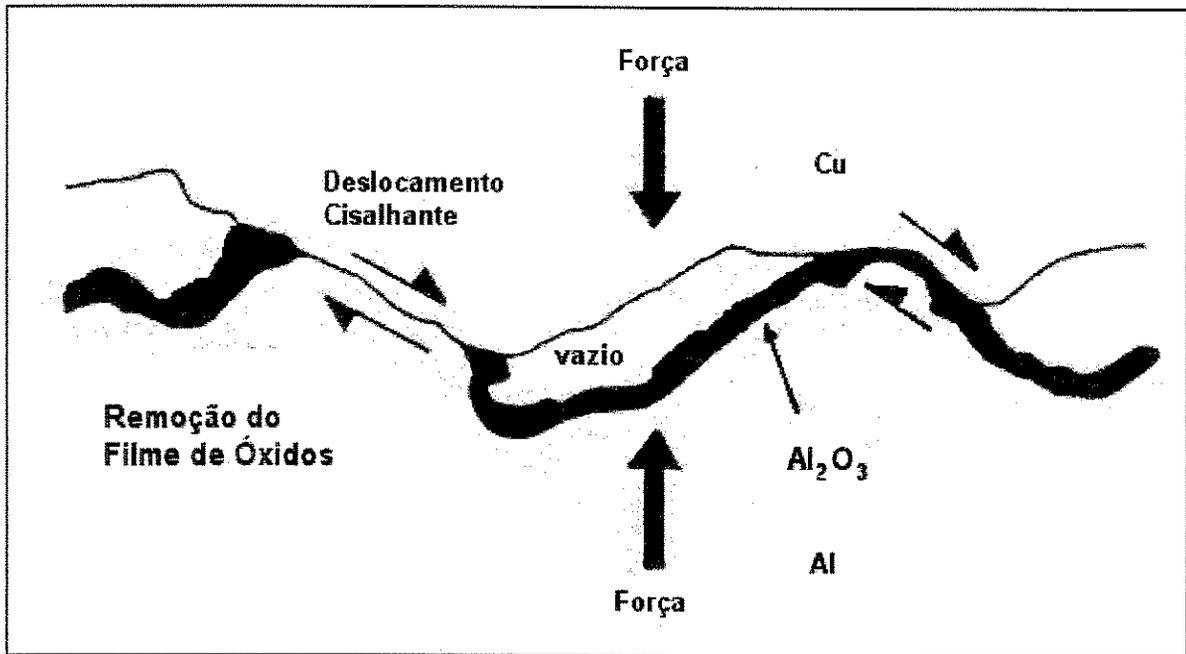


Figura 2.3 – Movimento Cisalhante de Quebra de Filmes de Óxidos (CALVO, 1988).

As camadas de óxidos dos metais antes e depois da soldagem podem ser vistas na figura 2.4:

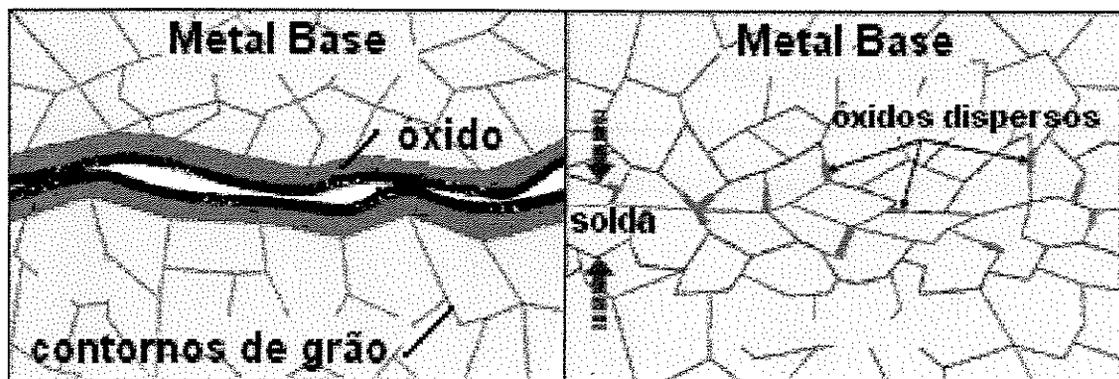


Figura 2.4 – Dispersão das Camadas de Óxidos Durante a Soldagem (AMTECHULTRASONICS, 2000).

Este mesmo processo ocorre para contaminantes superficiais existentes nas peças. O movimento vibratório é capaz de dispersá-las, permitindo a solda entre as peças, porém, mediante uma diferença com relação à soldagem de superfícies limpas, conforme verifica-se na figura 2.5:

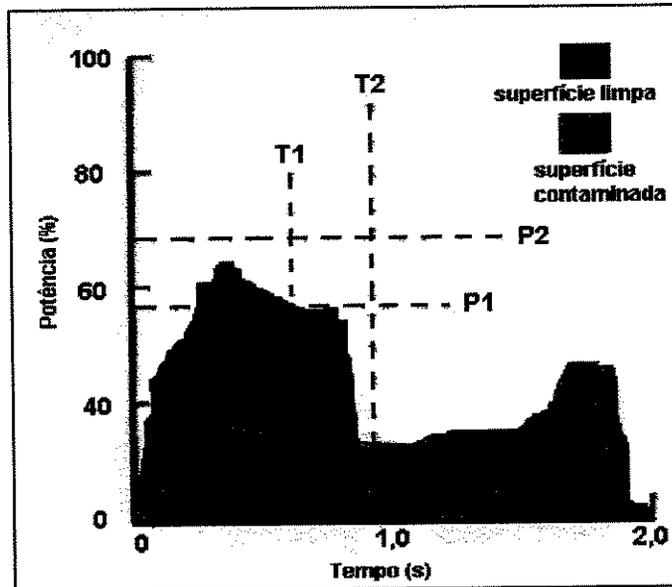


Figura 2.5 – Curvas de Soldagem Para Condições Superficiais Distintas (AMTECH, 2000).

De acordo com a figura, as peças com sujeira superficial irão vibrar mais livremente uma contra a outra, até que os contaminantes se dispersem da interface. Ao se tornarem limpas, os metais base adquirem a distância atômica necessária e começam a soldar. Para que isto ocorra, torna-se necessário maior tempo de solda, e portanto, a curva de potência de soldagem deverá crescer mais lentamente até atingir o nível de energia necessário. Esta curva está representada no gráfico da figura na cor cinza.

Ainda na mesma figura, para as peças sem contaminantes, a soldagem se inicia mais cedo, e a curva de potência aumenta mais rapidamente para atingir a energia necessária, dentro de um menor período de tempo (gráfico de cor preta).

O circuito de controle de energia, ao monitorar a potência e o tempo, garante que a mesma quantidade de energia seja aplicada na solda, sem levar em consideração a condição superficial das peças. Desta forma, por este processo de soldagem, peças com ou sem limpeza superficial

podem ser soldadas, porém com uma diferença no tempo de soldagem. De acordo com o fabricante do equipamento AMTECH (2000), valores para os parâmetros tempo e potência podem ser fixados dentro de limites de qualidade do processo. Estes limites dão uma certa flexibilidade ao processo para o caso de variações de limpeza superficial, gerando junções de qualidade para peças com ou sem contaminantes superficiais. Há autores que afirmam a necessidade de prévia limpeza superficial perfeita, como STINCHCOMB (1989), caso contrário, não se consegue uma união metalúrgica.

Tomando-se como exemplo a afirmação deste último autor, nota-se que há bastante divergência entre as teorias que tentam explicar o fenômeno do ultra-som para metais.

Com relação ao tipo de ligação, muita teoria metalúrgica sobre este processo ainda precisa ser estudada. As teorias mais discutidas, segundo LITTLE (1973), se referem à ocorrência de uma reação química na interface das peças, à ocorrência de ligação atômica metálica interfacial, de ligação mecânica de travamento e de ligação interfacial por microfusão, ou ainda, de uma combinação entre todos estes processos.

A teoria mais aceita é, ainda segundo este autor, a ocorrência de uma ligação atômica metálica interfacial. Teoricamente, se os metais fossem constituídos por um cristal único, e se este pudesse ser limpo e mole, apresentando somente um tipo de plano nas superfícies, dois destes cristais poderiam ser soldados, sem a necessidade de nenhum tipo de força proveniente de quaisquer dos cristais. Porém, sabe-se que os metais são policristalinos e apresentam muitas superfícies com diferentes planos, tornando necessária a aplicação de uma energia para ativação dos elétrons dos átomos dos metais.

O que ocorre nestas soldas é que as vibrações ultra-sônicas geram, no metal, o calor necessário para cada uma das partes a serem soldadas. Os metais adquirem certa plasticidade no ponto de contato, através das vibrações ultra-sônicas, e, juntamente com a força do sonotrodo, há a indução de tensões dinâmicas de cisalhamento nas peças. Quando estas tensões atingem magnitude suficiente, ocorre uma deformação plástica local do material na interface. As camadas de óxidos e outros filmes são fragmentados e dispersados e se inicia o contato metálico, a nível

atômico. Dentro desta teoria, segundo LITTLE (1973), experimentalmente pôde-se soldar combinações de metais como: alumínio e aço, alumínio e tungstênio, alumínio e molibdênio, e níquel e latão.

A teoria proveniente do fabricante AMTECH (2000) baseia-se no fato de que uma frequência de alta amplitude, juntamente com uma pressão aplicada, dispersa os filmes de superfície e óxidos, gerando uma solda de difusão controlada e limpa. As superfícies dos metais limpas são fortemente pressionadas uma contra a outra. Os contornos dos cristais são levados à distâncias atômicas entre um e outro metal, permitindo uma forte atração dos átomos ao longo da interface para criar uma ligação metalúrgica sem atingir a temperatura de fusão dos metais. Os átomos podem ser misturados entre metais similares ou dissimilares na interface da solda, formando esta ligação metalúrgica, em frações de segundo. A solda não é caracterizada por uma adesão superficial, mas sim por uma junção sólida e homogênea.

O calor gerado através da vibração para se realizar a solda chega a atingir, no máximo, um terço da temperatura de fusão dos materiais (KAISER, 1978). Segundo LITTLE (1973), a temperatura no ponto de contato entre as peças e o ferramental de soldagem chega a 35% da temperatura de fusão do material (com utilização de níveis apropriados dos parâmetros), devido à fricção interna, porém já encontrou-se temperaturas de até 50% da temperatura de fusão, o que pode gerar um início de transformação metalúrgica, como recozimento seguido da recristalização dos grãos. A temperatura máxima de soldagem é função da escolha dos parâmetros do processo. O aumento da energia leva ao aumento desta grandeza, assim como o aumento da força estática induz o aumento inicial da temperatura, mas limita o valor da temperatura máxima. Assim, o perfil da temperatura é influenciado, limitadamente, por ajustes dos parâmetros do equipamento. A temperatura nas camadas internas do material é função também do tipo do material a ser soldado. Na teoria, a temperatura obtida é mais alta para materiais de menor condutividade térmica.

TSUJINO et al (1993) são adeptos a esta teoria da difusão, e assim, enaltecem a grande vantagem da solda por ultra-som, que é a possibilidade de se unir materiais iguais ou diferentes em pouco espaço de tempo. Além disso, por decorrência da difusão, a área de soldagem é

limitada a uma área bastante estreita (não são necessários espaçamentos laterais e sobreposição entre as peças).

Seguindo esta teoria, a difusão dos átomos é capaz de gerar soldas de altas propriedades mecânicas: as características da solda, como resistência ao cisalhamento e resistência à fadiga, são superiores a outros processos. Por estes autores, ao se soldar por ultra-som, os valores limites de resistência das junções chegam muito próximos aos valores de resistência do material. As uniões metalúrgicas obtidas chegam a atingir de 65% a mais de 100% do valor de resistência do metal antes da soldagem.

De acordo com LITTLE (1973), com exceção do alumínio puro (este autor cita uma restrição para soldagem deste metal, sem uma explicação aparente), a solda ultra-sônica gera maior resistência mecânica do que uma solda por resistência elétrica.

Segundo KAISER (1978), a qualidade da solda pode ser testada através de ensaios de tração, cisalhamento ou arrancamento, assim como para uma solda realizada por resistência elétrica a ponto. Desta forma, não há normalização para os ensaios das soldas por ultra-som, já que utiliza-se as normas existentes para solda a ponto.

A maior parte das informações existentes para soldagem ultra-sônica é sobre resistência ao cisalhamento, trazendo valores testados para vários materiais. Mais propriedades são também estudadas: resistência à tração, resistência à fadiga, efeito das propriedades do material de base, resistência à corrosão e características de isolamento (KAISER, 1978). Outras propriedades, como a quantidade de deformação da espessura e o grau de rugosidade superficial podem ser controlados através de ajustes adequados do equipamento.

Com relação ao ensaio de arrancamento, apesar da possibilidade de se utilizar normas da solda por resistência, há controvérsias sobre sua validade, pois os resultados encontrados na prática vêm sendo razoavelmente menores do que para a solda por resistência (AMTECH, 2000). Para este ensaio, segundo KAISER (1978), a solda por ultra-som não apresenta uma alta

resistência de tração seccional, sendo que esta pode ser compensada pela quantidade de pontos soldados.

Além das vantagens já citadas, pode-se ainda citar que o ultra-som é um processo de única e simples operação, elimina a utilização de consumíveis, não emprega produtos químicos perigosos, não gera fumaças tóxicas (segundo LITTLE, 1973, este processo gera uma certa quantidade de gás, que, porém, não leva à necessidade de nenhum equipamento de proteção para as peças ou para o operador), utiliza baixa energia durante o processo (quando comparado a outros processos), gera pouca deformação de espessura do material (no máximo de 5%, dependendo da liga e geometria da peça), forma junções com alta resistência ao cisalhamento, à fadiga e à corrosão, assim como junções de mais alta condutividade elétrica, quando comparado à processos de soldagem por fusão. Não há geração de relaxação ou fluência devido aos ciclos térmicos ou memória de material, as junções não apresentam influência por vibrações, e não há a necessidade de proteção do operador para manipulação das peças logo após a soldagem.

Como desvantagem do processo, pode-se dizer que o equipamento de soldagem é de alto custo, o sonotrodo apresenta-se bastante sujeito ao trincamento, além de demonstrar problemas de aderência às peças a serem soldadas, causado geralmente por falta de manutenção do equipamento ou falha de ajustagem.

2.1.2 Soldagem de Alumínio por Ultra-som

Qualquer combinação de ligas alumínio/alumínio e de alumínio puro com ligas de alumínio pode ser soldada. A soldagem por ultra-som pode ser inclusive aplicada estruturalmente para combinações entre alumínio e outros metais, dependendo da faixa de espessuras e da capacidade de potência do equipamento. O alumínio é um metal que pode ser soldado com a maioria dos outros metais, segundo KAISER (1978), incluindo o cobre.

Em soldas de alumínio por ultra-som, o contato entre as peças recebe os efeitos das tensões de cisalhamento dinâmicas, quebrando assim a camada de óxido da superfície deste metal (KAISER, 1978). Sem a ocorrência de fusão, ocorre, então, uma solda metalúrgica das partes no

estado sólido, trazendo-as suficientemente próximas uma da outra (distâncias atômicas), através da pressão exercida pelo equipamento. Deste modo, a limpeza prévia da superfície do alumínio não se torna necessária, diferentemente de uma soldagem por fusão.

A única ação de limpeza prévia necessária é a retirada da camada de óleo, sendo que o tempo entre esta limpeza e a soldagem não é importante, a não ser que esta superfície tenha sido contaminada com graxa, material siliconado ou qualquer substância similar. Novas camadas de óxidos são formadas na superfície do alumínio próximas ao ponto soldado, caso este tenha sido feito em contato com o ar, pois a energia vibratória fragmenta o filme de óxido presente, deixando a superfície próxima livre para formação de nova camada. O novo filme se forma imediatamente. Em casos de demanda de isenção de camada de óxido, a solda pode ser feita em ambiente de gás inerte (KAISER, 1978).

A formação de compostos intermetálicos pela solda não é fator determinante para o ultra-som, pois o calor produzido não é suficiente a ponto de fundir o material. A temperatura de fusão (660° C) e as altas condutividades térmica e elétrica do alumínio não são fatores que dificultam uma soldagem no estado sólido. Da mesma forma, não há problemas causados por calor excessivo na metalurgia do alumínio (FLOOD, 1997).

Também por não haver fusão envolvida, a soldagem do alumínio (exceto do alumínio puro) por ultra-som é indicada devido à não formação de trincas de solidificação logo após o processo, nas regiões interdendríticas ou nos contornos de grão do material (BORLAND, 1979), o que pode ser comum em soldas por fusão.

Para soldagem do alumínio, as frequências mais utilizadas são de 10.000 a 60.000 Hz. As frequências mais baixas são geralmente empregadas nos equipamentos de maior potência e as frequências mais altas são empregadas nos equipamentos de potência mais baixa. As capacidades de potência dos equipamentos de ultra-som para soldagem de várias espessuras de chapas de alumínio variam de 25 W a 8.000 W. A potência necessária para uma solda ponto por ultra-som em alumínio é menor do que a potência necessária em um processo por resistência a ponto.

Dependendo da espessura, liga e potência de soldagem, o tempo necessário para se realizar uma solda ponto de alumínio por ultra-som é menor que um segundo (KAISER, 1978).

A aparência externa dos pontos de soldas por ultra-som é bastante similar a dos pontos de solda por resistência. Nas ligas mais dúcteis, as marcas de solda são de forma aproximadamente elíptica (para um sonotrodo circular), devido à oscilação transversal do sonotrodo. Geralmente, quanto mais dura a liga, mais circular a marca, aparentando ainda mais o ponto feito por resistência (KAISER, 1978). As marcas na superfície em contato com o sonotrodo dependem muito das propriedades da liga e podem ser controladas, até certo limite, através do ajuste da força de soldagem e da potência do equipamento.

Com relação à análise metalográfica da união, os cortes transversais geralmente revelam efeitos de trabalho local ao longo das superfícies de contato, assim como interrupções e deslocamento de óxidos e de outros filmes. Na interface de soldagem do alumínio, a mudança na superfície do metal pode ser bem menos aparente quando vista em corte seccional. A linha aparente de soldagem em micrografias é mais fina do que algumas divisões metalúrgicas no metal base. Esta é uma evidência de solda em estado sólido.

A deformação induzida pelo ultra-som ocorre abaixo da temperatura de recristalização. Somente em algumas ligas de alumínio ocorre alguma evidência de recristalização, quando uma porcentagem crítica de trabalho a frio nas superfícies induzem esta recristalização e crescimento de grão, ao eliminar a continuidade de filme de óxido na interface.

A soldagem de alumínio por ultra-som não é indicada para qualquer tipo de situação, porém, em alguns casos apresenta propriedades mecânicas superiores às da solda por resistência, como em exemplos de solda entre alumínio e cobre e alumínio e outros metais dissimilares, onde o ultra-som se torna o único processo aplicável. Ainda segundo KAISER (1978), na soldagem de espessuras finas e médias de alumínio, os ensaios de tensão cisalhante devem resultar na falha do metal de base e, raramente, na quebra do ponto soldado.

As ligas de alumínio não-tratáveis termicamente, como a liga 1100-O, de alta pureza, podem ser soldadas por processos no estado sólido, com metais similares e dissimilares. De acordo com WELDING HANDBOOK (1989), junções ultra-sônicas de alumínio puro obtém praticamente a mesma resistência mecânica que junções soldadas por resistência a ponto, diferentemente da afirmação de LITTLE (1973), no item anterior. Para uma junção de ligas de alumínio mais resistentes, sua resistência chega a ultrapassar a de uma união soldada por resistência a ponto, já que o ultra-som não produz calor excessivo nem mudanças estruturais no metal base, e o tamanho da solda é geralmente maior, para uma mesma dimensão da peça.

Segundo KAISER (1978), a espessura mínima para soldagem de qualquer liga de alumínio é de 0,0038 mm. As espessuras máximas de chapas de alumínio soldáveis por ultra-som são:

- 2,032 mm para as ligas de alumínio com elementos de liga mais resistentes;
- 3,048 mm para as ligas menos resistentes.

2.1.3 Soldagem de Cobre por Ultra-som

Conforme WELDING HANDBOOK (1989), o cobre puro e todas suas ligas podem ser facilmente soldados por qualquer processo no estado sólido. Para esta soldagem, pode-se combinar diversos níveis de temperatura, pressão e deformação, formando junções de excelentes propriedades mecânicas, principalmente resistentes à tração, cisalhamento e fadiga. A união metalúrgica entre o cobre puro e entre todas suas ligas gera uma junção superior à de outros metais no que diz respeito à resistência ao arrancamento.

Através do processo de ultra-som, pode-se obter junções de cobre com metais dissimilares, gerando bons resultados para as junções com alumínio, prata, aço carbono e inoxidável e titânio.

Existe pouca teoria relacionada à soldagem de cobre por ultra-som, apesar da grande utilidade deste processo para a união de fios e fitas deste metal. Não foram encontrados valores de resistência mecânica de junções de cobre, sendo este muito pouco citado em toda a teoria do processo.

2.1.4 Soldagem de Alumínio/Cobre por Ultra-som

A soldagem de alumínio com cobre é considerada viável com a utilização do processo de ultra-som (CALVO, 1988).

Conforme MOZHAISKAYA (1991), o movimento de fricção causado pelo movimento de uma peça sobre a outra fornece uma ativação térmica suficiente das superfícies dos materiais, sem a ocorrência de formação de uma fase líquida. No caso do alumínio, há formação de uma pequena zona de transição, onde uma solução sólida de cobre em alumínio é predominante.

Devido ao calor de fricção gerado ser relativamente baixo, não ocorrendo fusão, também para a soldagem de alumínio com cobre não há o surgimento de componentes intermetálicos, assim como não é necessária uma análise detalhada das características físicas de cada um dos metais para se tornar possível a união entre eles (FLOOD, 1997).

Alguns dos problemas encontrados na soldagem de alumínio e cobre por fusão, como a camada de óxido do alumínio, a diferença de temperaturas de fusão dos dois metais, e a alta condutividade térmica dos metais, podem ser eliminados com a utilização do processo de ultra-som.

Seguindo-se a teoria da difusão explicada no item 2.1.1, um método apropriado de se verificar a possibilidade de soldagem de materiais dissimilares no estado sólido é a análise do diagrama de fases, que indica a dificuldade de união de materiais (formação ou não de intermetálicos).

Além disso, o estudo de junções de dissimilares gera necessariamente uma análise da região interfacial, região de maior possibilidade de falha. Em um sistema de dois componentes, as falhas interfaciais podem ser resultantes das propriedades individuais de cada um dos materiais, por necessidades de sinergia dentro da junção. Para o entendimento do comportamento interfacial, é necessário um estudo conduzido a nível atômico, com correlações apropriadas à micro-mecânica e ao nível macroscópico.

Conforme KAISER (1978), a soldagem por ultra-som de alumínio e cobre vem crescendo em quantidade de aplicações, pois é o processo que produz a melhor ligação entre estes metais (levando-se em conta limitações de espessura), e cujo controle é considerado como um dos mais confiáveis e precisos na soldagem de chapas finas. De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, concluiu-se que a literatura existente sobre este tema é bastante escassa, principalmente quando se refere à soldagem por ultra-som destes dois materiais escolhidos, havendo maior quantidade de literatura para outros processos no estado sólido.

2.2 Soldagem por Resistência a Ponto

O processo de soldagem por resistência a ponto é um outro processo adequado à soldagem de chapas de pequena espessura, para diversos materiais, através de sobreposição. Por este processo, funde-se pontualmente chapas de metal na região da interface entre elas. É um processo iniciado no começo do século, sendo largamente empregado na indústria, devido a sua praticidade e à facilidade de carregamento e instalação do equipamento. É classificado como um processo de soldagem por pressão, mesmo envolvendo fusão na interface do material a ser soldado.

Neste item, apresenta-se as características do processo e algumas informações sobre a soldagem de alumínio e cobre.

2.2.1 Processo de Soldagem por Resistência a Ponto

A soldagem por resistência é realizada através da coalescência localizada de metais ou não metais, produzida pelo aquecimento do material pontualmente, até a temperatura de soldagem, com a aplicação de pressão nas peças a serem soldadas. Conforme a figura 2.6, as chapas são colocadas entre dois eletrodos, por onde passa uma corrente elétrica (do eletrodo superior ao inferior). Através do transformador, pode-se obter as altas correntes necessárias para geração da fusão localizada, na ordem de 10.000 A.

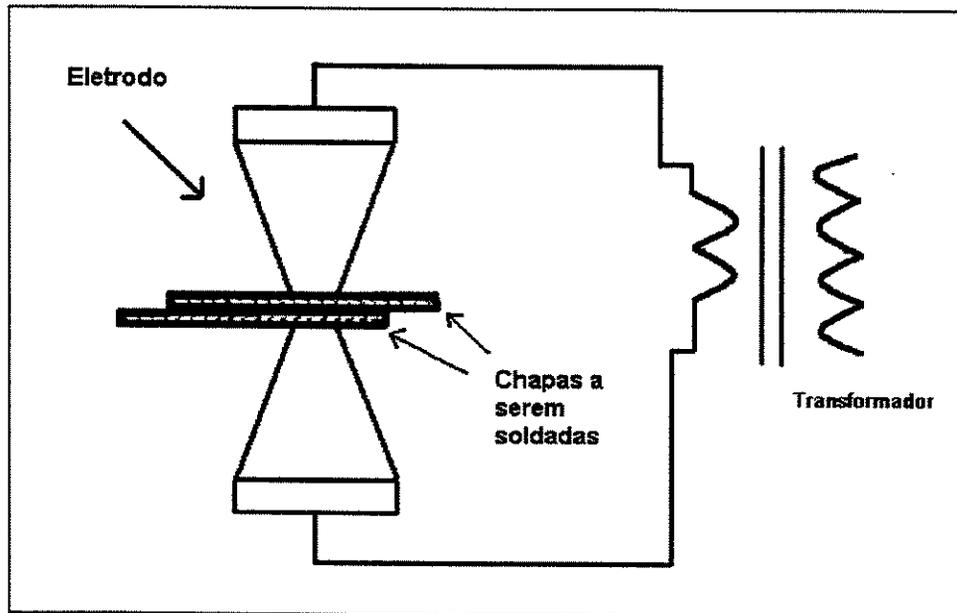


Figura 2.6 – Processo de Soldagem por Resistência a Ponto.

A obtenção dos pontos de solda utilizando-se uma máquina estacionária geralmente obedece a seguinte seqüência de operações, que pode ser vista na figura 2.7: após a sobreposição de uma chapa na outra, sobre o eletrodo inferior (1), é provocada a descida do eletrodo superior, comprimindo as peças (2). As faces externas das peças estão em contato com os eletrodos em sua área formada pelo diâmetro da face. Os eletrodos, em contato com o secundário do transformador, transmitem a corrente elétrica de alta densidade e pequena tensão. Esta corrente, durante um curto espaço de tempo (suficiente para ocorrência da fusão pontual), produz calor, por efeito Joule (explicado a seguir), em cada uma das partes do circuito, proporcionalmente à resistência ôhmica de cada região. Há ocorrência de deformação local e posterior fusão na interface entre as peças, já que aí a resistência ôhmica é maior (explicado a seguir) (3).

Após certa quantidade de ciclos de passagem de corrente, esta é interrompida, mantendo-se o esforço de compressão dos eletrodos para que haja o resfriamento das peças com estas ainda fixadas, até a solidificação do ponto soldado (4), como na figura 2.7. Com o término do resfriamento, o eletrodo superior é elevado, finalizando assim o processo.

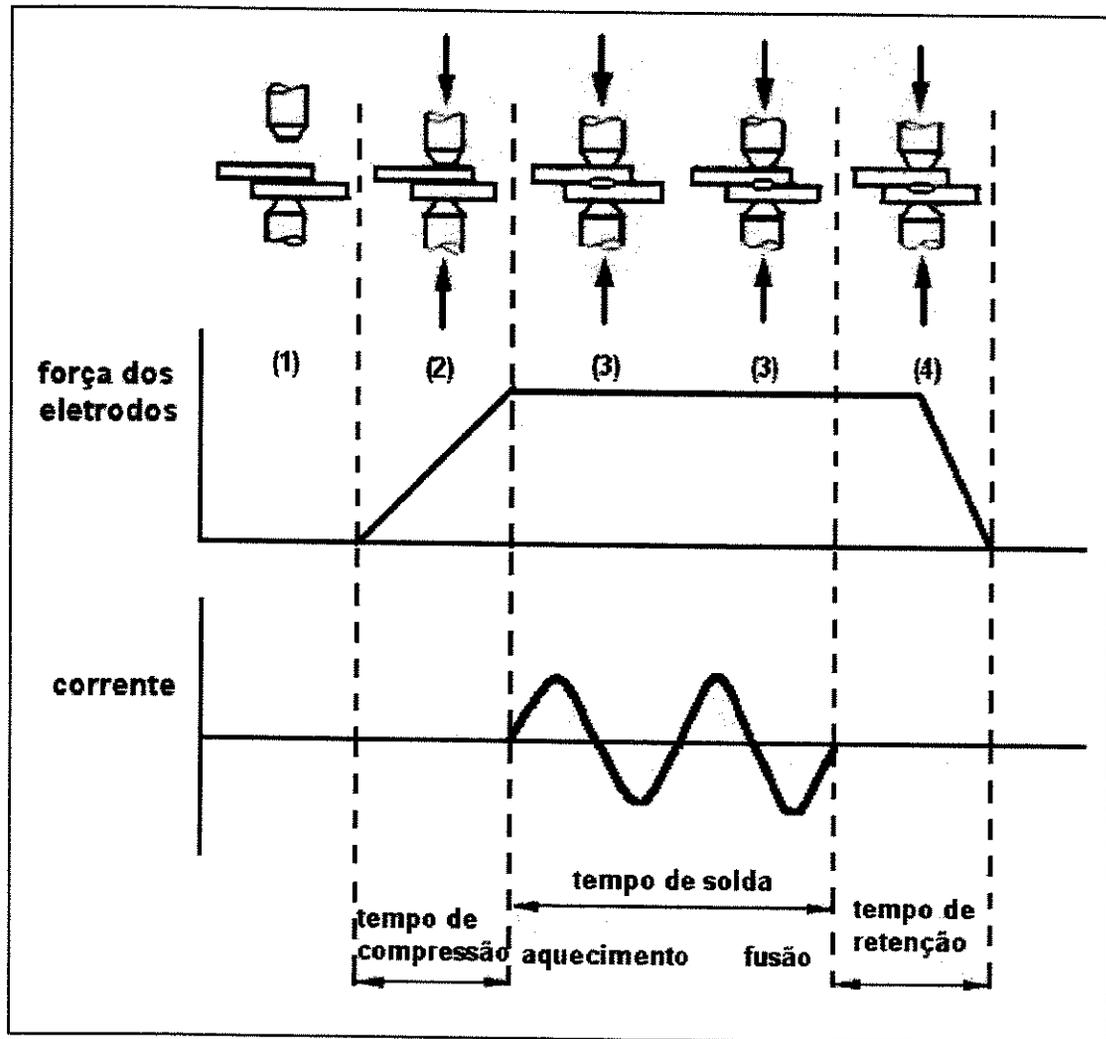


Figura 2.7 – Seqüência de Soldagem por Resistência a Ponto (GOURD, 1986).

Para algumas aplicações, podem existir seqüências mais complexas deste processo, sendo a descrição acima a mais simplificada.

Conforme citado anteriormente na descrição das etapas do processo, e visualizado na figura 2.7, as resistências elétricas do circuito da corrente estão dispostas em série, determinando o perfil térmico da soldagem. As resistências estão divididas entre resistência de contato e resistências internas dos materiais. As resistências de contato aparecem devido ao fato da área líquida, comum às duas superfícies metálicas, ser efetivamente constituída por apenas uma pequena fração de área aparente, como na figura. A nível microscópico, somente as irregularidades em alto relevo das superfícies se tocam.

Como visualizado na figura 2.8, a somatória das resistências ôhmicas é constituída por:

- R_1 e R_7 : resistência elétrica do material do eletrodo;
- R_2 e R_6 : resistência de contato entre eletrodo e peça. A magnitude desta resistência depende da condição da superfície do metal da peça e do eletrodo, do tamanho e contorno da face do eletrodo, e da força do eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, mas a superfície da peça não atinge a temperatura de fusão devido à alta condutividade térmica dos eletrodos e também por estes serem resfriados por água;
- R_3 e R_5 : resistência interna das peças, diretamente proporcional a sua espessura e resistividade;
- R_4 : resistência de contato entre as duas peças, local de maior resistência e ponto de maior geração de calor, pois este não é perdido diretamente para os eletrodos.

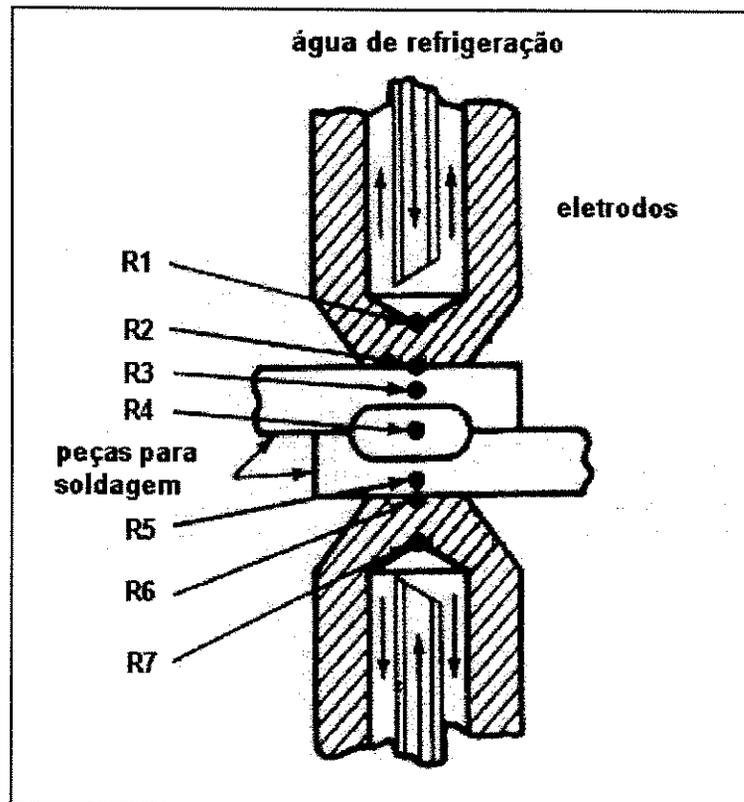


Figura 2.8 – Resistências em um Processo de Soldagem a Ponto (WELDING HANDBOOK, 1980).

Na figura 2.9, encontra-se o ponto de solda formado no interior das chapas sobrepostas, as quais sofreram também uma deformação externa devido à pressão dos eletrodos. Durante a solda, como pode-se observar na figura, o calor é perdido por condução para o metal adjacente e para os eletrodos. Esta dissipação de calor continua a taxas variáveis durante a aplicação de corrente e depois, até que a solda esteja resfriada à temperatura ambiente. A dissipação de calor durante o tempo de aplicação da corrente depende da composição e da massa das peças, do tempo de soldagem e dos meios externos de resfriamento. Se os eletrodos permanecerem em contato com as peças após a passagem da corrente, eles rapidamente as resfriarão. Caso eles forem removidos rapidamente, alguns problemas de falta de união podem ocorrer.

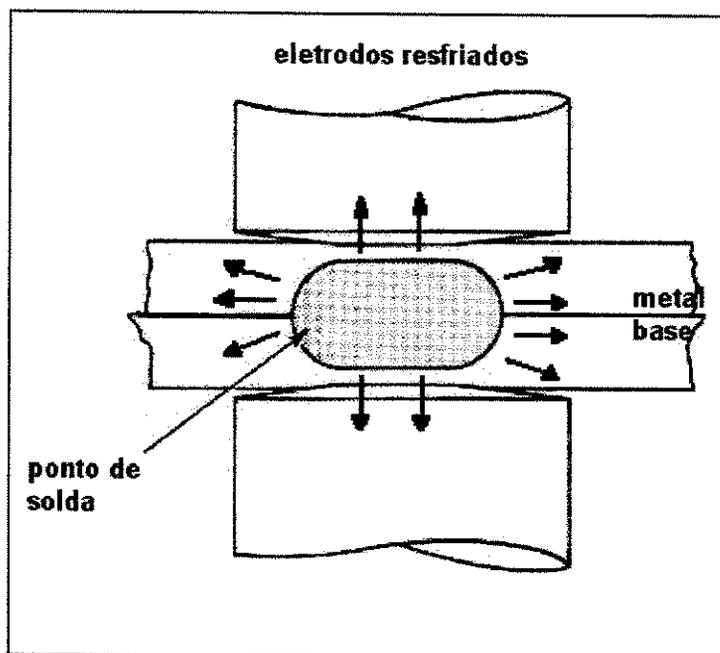


Figura 2.9 – Ponto Soldado por Resistência a Ponto.

Como em todo processo de soldagem onde ocorre fusão, o metal a ser soldado apresenta três regiões distintas, as quais podem ser visualizadas na figura 2.10: o ponto de solda (Zona Fundida), onde o material sofre a fusão propriamente dita, a ZAC (Zona Afetada pelo Calor), em torno do ponto, e o restante de metal onde as influências da temperatura não trazem conseqüências significativas à estrutura, mantendo as mesmas propriedades anteriores (iguais às do metal base) (AWS, 1968).

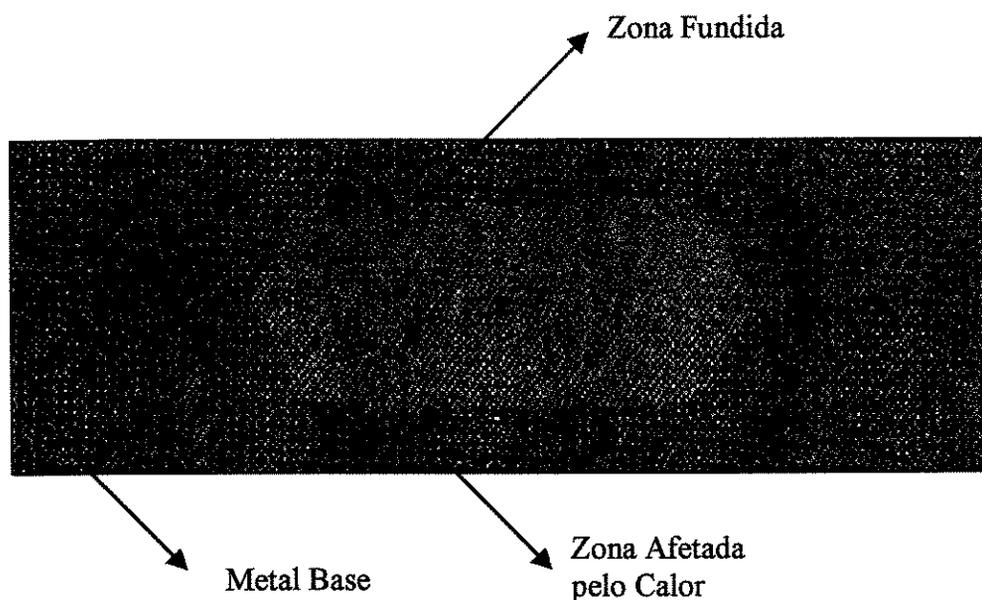


Figura 2.10 – Regiões Formadas no Metal pela Soldagem por Resistência (WELDING HANDBOOK, 1991).

Segundo KOU (1987), a estrutura granular da Zona Fundida pode afetar consideravelmente a susceptibilidade à trincas de solidificação durante a soldagem e as propriedades mecânicas após a soldagem.

De acordo com AWS (1968), a Zona Afetada pelo Calor sofre influências do calor da resistência, a uma temperatura suficientemente alta para causar algumas mudanças físicas significantes e detectáveis, sem que ocorra fusão. Esta mudança física pode ser crescimento de grãos ou têmpera do material (aços e alumínio) previamente endurecido, ou até endurecimento do material sem crescimento de grão. Não há uma temperatura específica que defina a Zona Afetada pelo Calor, portanto, pode-se verificar esta zona somente através das mudanças físicas descritas anteriormente.

O fenômeno térmico básico na formação do ponto de solda é o efeito Joule, gerido pela equação (2.3), onde a energia elétrica que se transforma em calor (Q), em Joules, e é fornecida à solda, é uma função da corrente de soldagem no secundário (I), em Ampères, da resistência total

do circuito secundário (R), em ohms, e do tempo de passagem de corrente através da área de soldagem para formar o ponto (t), em segundos:

$$Q = \int_0^t RI^2 dt \quad (2.3)$$

A lei de Joule pode ser expressa pela seguinte definição: “Em um condutor percorrido por uma corrente constante, desenvolve-se na unidade de tempo uma quantidade de calor proporcional à resistência elétrica do condutor e ao quadrado da intensidade de corrente que nele circula.” Esta lei, aplicada à soldagem por resistência, funciona da seguinte forma: a corrente elétrica que atravessa um condutor não contínuo (conjunto de resistências ôhmicas), em um intervalo de tempo, libera uma quantidade de calor que leva à fusão.

Com relação aos parâmetros do processo, os mais importantes são: intensidade da corrente, pressão de aplicação dos eletrodos e tempo dos ciclos de soldagem.

Apesar do controle rigoroso destes parâmetros, para se garantir uma solda de boa qualidade, variações nos resultados podem ocorrer devido à: mudanças na resistência de contato do material, movimentação do eletrodo superior, perdas magnéticas, ou curto circuito da corrente através de pontos formados anteriormente.

O parâmetro intensidade de corrente está diretamente ligado ao período de aplicação desta. A densidade de corrente é o parâmetro que mais influencia no tamanho do ponto de solda e na resistência mecânica da junção. Se a intensidade da corrente for insuficiente, não ocorrerá a fusão, mesmo em um longo período de tempo. Se a intensidade for excessiva, o eletrodo penetrará na peça, pois praticamente toda a espessura desta estará na fase plástica. Ocorrerá deformação da peça, expulsão de metal líquido, e, em alguns casos, ocorrerá a fusão do eletrodo com a peça, cavitação, trincas no ponto soldado e propriedades mecânicas mais baixas.

Como visto na lei de Joule, a corrente é o parâmetro de maior efeito também na geração de calor, portanto, as flutuações de voltagem da linha de potência e as variações de impedância no circuito secundário devem ser cuidadosamente controladas (KAISER,1978). Estas variações de impedância podem ser causadas por mudanças na geometria do circuito ou pela introdução de massas variáveis de metais magnéticos no circuito secundário do equipamento. Além do nível de corrente para soldagem, a faixa intensidades de correntes na qual se obtém soldas aceitáveis deve ser ampla o suficiente para acomodar as tolerâncias de produção: tamanho mínimo de lente (80% do diâmetro de contato dos eletrodos), diâmetro máximo de lente (125% do diâmetro de contato dos eletrodos), penetração mínima de solda (20% a partir da superfície de contato), indentação máxima das peças (20% a partir da superfície de contato), expulsão e resistência mecânica do ponto.

Um outro parâmetro importante do processo é a força exercida pelos eletrodos sobre as peças, resultando numa pressão, que altera a resistência de contato e a circulação de corrente na interface das mesmas. As superfícies dos metais apresentam diferentes rugosidades, sendo que a pressão diminui a distância entre picos e vales destas superfícies em contato. Neste caso, a quantidade total de calor gerado no local diminui, devido ao aumento da circulação de corrente. Assim, deve-se aumentar a intensidade de corrente e/ou seu tempo de aplicação, para uma pressão maior.

Anteriormente à passagem de corrente, a função da pressão aplicada é aproximar as peças uma contra a outra, provocando um contato íntimo no local da solda. A pressão aplicada deve ser suficientemente alta para vencer as reações mecânicas elásticas e até deformar plasticamente, se necessário, para assegurar adequadas resistências de contato. É necessário um valor ótimo da pressão, suficiente para vencer o efeito mola das peças e garantir contato elétrico sem centelhamento (que ocorre devido à falta de contato entre as peças), mas sem diminuir muito a resistência de contato.

Durante a soldagem, a pressão tem a função de restringir a expulsão de líquido entre as chapas enquanto o ponto se forma. A pressão aplicada detém uma poça de fusão dentro de um

anel de força na região fundida. Após a passagem de corrente, a pressão tem o efeito de refinamento de grão, enquanto o ponto resfria, aumentando sua resistência mecânica.

Para uma dada força de aplicação dos eletrodos, se relaciona uma corrente máxima, acima da qual o metal é expulso violentamente, provocando soldas com defeitos. A pressão deve ser aplicada de forma constante, enquanto que o material passa pelas diversas fases (sólida, plástica, líquida e sólida) (KAISER, 1978).

A pressão aplicada varia ainda com a espessura e o tipo do material soldado e a massa do eletrodo. A composição química do material interfere no sentido de que quanto maior a dureza do metal, deve-se aumentar a pressão para deformar as rugosidades superficiais, formando um bom contato elétrico.

Para materiais com filmes de óxidos superficiais não condutores, há um aumento considerável das resistências de contato entre peça/eletrodo e peça/peça. Deste modo, há somente uma pequena área condutora em contato, necessitando de grandes intensidades de corrente e maior pressão. Deve-se ainda considerar que as resistências de contato variam muito de superfície para superfície, mesmo para os mesmos materiais. Leva-se em conta ainda que as resistividades internas das peças aumentam com a temperatura, sendo seu cálculo bastante complexo.

O parâmetro tempo (ciclos de soldagem) pode ser facilmente controlado, assim como a utilização de tiristores para regulação da corrente, a checagem das dimensões do eletrodo, e a verificação da condição da superfície dos materiais a serem soldados podem garantir reprodução dos resultados. Este parâmetro no processo divide-se em 4: tempo de pré-pressão (fechamento dos eletrodos sobre as peças até o início de passagem de corrente), tempo de soldagem (intervalo onde a corrente flui de um eletrodo para o outro), tempo de retenção (após a passagem de corrente, os eletrodos são mantidos pressionando as peças e retirando calor da poça de fusão) e tempo de retração (retirada dos eletrodos). O tempo é expresso em ciclos, onde 1 ciclo corresponde à 1/60 s.

Uma importante função deste parâmetro é o controle da taxa de geração de calor para produção de soldas com resistência adequada, sem excessivo aquecimento dos eletrodos e seu rápido desgaste. As perdas de calor por condução e por radiação aumentam com o aumento do tempo de soldagem. De uma certa forma, o tempo de soldagem e a intensidade de corrente são complementares. O insumo total de calor pode ser variado pelo ajuste de uma destas variáveis. Com este insumo, forma-se o ponto de solda, que necessita de um tempo mínimo para formação, sem levar em consideração a amperagem (corrente). O insumo de calor é um fator importante nas soldas que causam fusão no material, pois, através dele, pode-se verificar qual a influência de cada parâmetro do processo utilizado na quantidade de calor fornecida para a solda. Através também deste fator, pode-se comparar os diferentes processos de soldagem que incluem fusão, e as seleções dos diferentes parâmetros de cada processo (MACHADO, 1996).

Além da correta ajustagem destes parâmetros principais, deve-se levar em consideração que, para se soldar peças de diferentes espessuras ou de materiais dissimilares, os eletrodos precisam ser de diâmetros diferentes. No caso de espessuras diferentes, para um mesmo material, o eletrodo menor deve ser colocado em contato com a peça mais fina, conforme a figura 2.11 (1). Para peças de metais dissimilares, porém com igual espessura, o eletrodo menor deve ficar em contato com a peça de maior condutividade (2). Nos dois casos, a área fundida de um material será maior que a do outro, assim como a penetração.

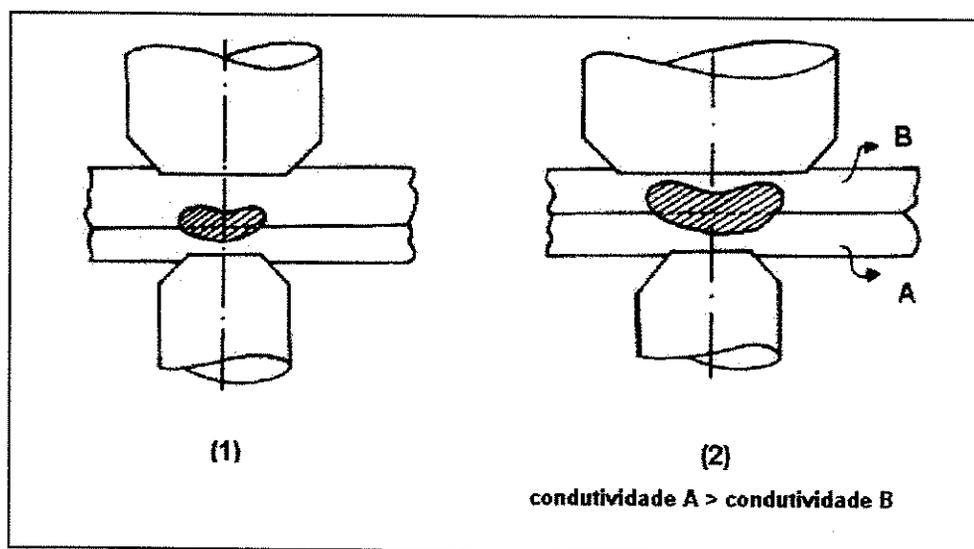


Figura 2.11 – Soldagem de Peças de Diferentes Espessuras e Condutividades (WAINER, 1992).

Com relação às propriedades mecânicas das junções, segundo o site WeldTechnology (2000), o controle de qualidade deste tipo de solda pode ser realizado através de ensaios destrutivos, não-destrutivos, técnicas estatísticas e sistemas de controle adaptativos.

Os ensaios destrutivos normalizados para este tipo de solda são: tração cisalhante, tração axial, arrancamento e fadiga. Após um ensaio destrutivo, verifica-se o modo de fratura, demonstrando fragilidade ou ductilidade da região soldada. Pode-se obter ainda medidas do diâmetro da lente.

Os ensaios não-destrutivos eliminam o custo da destruição de produtos. Um dos ensaios não-destrutivos que vem sendo utilizado ultimamente, com bons resultados, é descrito a seguir: os valores provenientes de um ensaio de tração de uma solda por resistência a ponto mostram a existência de um valor de resistência do material a partir do qual uma solda ruim se quebra e uma solda boa se deforma elasticamente, voltando ao normal sem ter sido destruída. Assim, pode-se separar soldas boas de ruins, sem a destruição das amostras.

O controle estatístico do processo reduz a necessidade de ensaios, tornando o processo mais consistente, enquanto que um controle adaptativo é capaz de monitorar um ou mais parâmetros do processo, como corrente, voltagem, energia, condutância, força dos eletrodos, expansão térmica, taxa de expansão e espessura das peças. Posteriormente, pode gerar uma compensação por variações destes parâmetros.

Como vantagens do processo, tem-se: princípio de funcionamento do processo bastante simples, assim como o equipamento necessário, de fácil automação e boa repetitividade de amostras com parâmetros pré-estabelecidos, e possibilidade de aumento da resistência mecânica da junção com o aumento do diâmetro do ponto, ou seja, com o aumento do diâmetro do eletrodo, conseguindo-se limites maiores de resistência ao tensionamento, segundo WELDING HANDBOOK (1980).

O processo apresenta, porém, algumas outras desvantagens, como a necessidade de análise de condutividade térmica, resistividade elétrica, temperatura de fusão dos materiais, a necessidade de preparação pré-soldagem, a utilização de eletrodos que necessitam de reposição periódica, a utilização de maior energia no processo, quando comparado ao ultra-som, e a geração de gases, faíscas e fumaça.

2.2.2 Soldagem de Alumínio por Resistência

Segundo tabela de soldabilidade entre materiais da Contacts Metals Welding (2000), verifica-se que a soldabilidade entre alumínio/alumínio é boa, assim como a resistência mecânica da junção.

Um dos grandes problemas da soldagem por fusão de alumínio é a camada de óxido existente em sua superfície, característica deste metal, dificultando a execução do processo. Esta camada de óxido de alumínio possui ponto de fusão relativamente elevado quando comparado ao metal e às suas ligas (aproximadamente 2.052°C), fazendo com que o metal funda internamente, enquanto que sua superfície permanece intacta (ALCAN, 1993, HAO, 1996).

Outro problema que esta camada de óxido pode causar na soldagem do alumínio é a inclusão de impurezas (óxidos), diminuindo, assim, a qualidade da solda. Daí a importância da limpeza da superfície do metal, através de meios mecânicos (escovação ou esmerilhamento), ou por tratamentos químicos (fazendo a imersão do alumínio em soluções de alguns tipos de produtos químicos), imediatamente antes da soldagem.

O processo de soldagem por resistência a ponto de alumínio, por envolver altas temperaturas, gera prejuízos nas propriedades mecânicas adquiridas anteriormente à solda, devido às mudanças metalúrgicas no material, como resolubilização de precipitados de segunda fase, recozimento, e outros. Portanto, torna-se necessário um tratamento mecânico ou térmico posterior, para que estas propriedades sejam readquiridas (MARQUES, 1991). As ligas de alumínio que mais sofrem com estas mudanças estruturais são as não-tratáveis termicamente, como, por exemplo, a liga 1100.

Ainda com relação às altas temperaturas de soldagem, um dos problemas que podem ocorrer em soldas por resistência de alumínio, no ponto fundido, é a formação de trincas de solidificação, logo após a soldagem.

Este problema pode ser causado devido aos elementos de liga presentes, às impurezas da liga de alumínio e ao desenvolvimento de tensões trativas decorrentes do ciclo térmico da soldagem e restrições à contração e expansão térmicas (MARQUES, 1991). Estas trincas geralmente ocorrem na Zona Fundida, podendo raramente ocorrer na Zona Afetada pelo Calor.

Estes problemas da soldagem por fusão podem ser minimizados através da otimização dos parâmetros do processo de soldagem (BORLAND, 1979, MARQUES, 1991).

A altas temperaturas, o alumínio e suas ligas apresentam baixa resistência mecânica, e um pequeno intervalo no qual o material se encontra no estado plástico. Desta forma, a aplicação de força nos eletrodos deve ser rigorosamente controlada, pois estes devem se movimentar rapidamente quando da aplicação da pressão nas peças, enquanto estas estão ainda no intervalo plástico (MACHADO, 1996).

Outro fato importante a ser considerado é a necessidade de uma excessiva limpeza dos eletrodos (por exemplo, a cada 10 soldagens), devido à adesão do alumínio nestes. As causas prováveis desta adesão são: resfriamento insuficiente do eletrodo, acabamento excessivamente rugoso dos eletrodos, têmpera fraca (macia) da liga de alumínio, óxidos da superfície muito espessos, excessiva penetração da solda na chapa, força de soldagem insuficiente ou variável, diâmetro do eletrodo muito pequeno, materiais do eletrodo incorretos. Para se soldar alumínio, utiliza-se eletrodos de cobre devido a sua baixa resistência e alta condutividade térmica comparada aos demais metais. Isto faz com que o calor seja gerado nas peças, ao invés de ser gerado nos eletrodos. Quando estes encontram-se bastante quentes, geram marcas de calor na superfície das peças.

Apesar dos problemas metalúrgicos, mecânicos e funcionais que podem ocorrer durante e depois de uma soldagem por fusão, verifica-se que a soldagem por resistência apresenta a

vantagem da possibilidade de emprego para uma grande faixa de espessuras de peças (maior que a faixa disponível para ultra-som), dimensões e materiais, e da alta repetibilidade das dimensões dos pontos.

Os limites de espessuras de chapas de alumínio possíveis de soldagem por resistência são de 0,025 mm a 6,350 mm (KAISER, 1978).

2.2.3 Soldagem de Cobre por Resistência

A maior aplicação deste processo de soldagem em cobre é feita em chapas de até 1,5 mm de espessura, em ligas com relativamente baixa condutividade elétrica (o coeficiente de condutividade elétrica varia enormemente em cada liga) (MACHADO, 1996). Para o cobre eletrolítico, bastante condutivo, são necessárias correntes extremamente altas para atingir uma fusão.

Segundo FLINN (1961), a liga de cobre 10200 de alta pureza não é recomendada para este processo de soldagem, devido à suas altíssimas condutividades térmica e elétrica. Conforme WELDING HANDBOOK (1989), a densidade de corrente necessária para soldagem deve ser bastante alta, o que pode causar superaquecimento dos eletrodos, adesão do cobre nos eletrodos (diminuindo, assim, a vida útil destes), e até fusão do cobre nos eletrodos, se estes forem de cobre. O pré-aquecimento das peças pode ser necessário, já que o metal adjacente ao ponto soldado retira rapidamente o calor introduzido neste. Torna-se indicado soldar a ponto ligas de cobre cujas condutividades elétricas chegam até 30% da condutividade do cobre puro. Quando este valor ultrapassar 60%, tem-se a quase impossibilidade de uma junção resistente soldada por métodos convencionais.

Além deste fator, o cobre isento de oxigênio é produzido através de fusão e fundição sob atmosferas livres de contaminação por oxigênio. Como nenhum agente desoxidante é introduzido neste tipo de cobre, ele pode absorver oxigênio da atmosfera durante períodos de aquecimento a temperaturas bastante altas. O oxigênio absorvido pode causar problemas durante uma subsequente soldagem (WELDING HANDBOOK, 1989).

Da mesma forma que na soldagem de alumínio, uma limpeza superficial anteriormente à solda é necessária, para retirada da camada de pátina, que interfere na passagem da corrente elétrica durante a soldagem. Esta limpeza pode, algumas vezes, incluir métodos químicos.

2.2.4 Soldagem de Alumínio/Cobre por Resistência

Através do manual WELDING HANDBOOK (1980), verifica-se que a soldagem de alumínio com cobre é viável com a utilização do processo de soldagem por resistência, mantendo-se os parâmetros de soldagem corretamente ajustados, para se obter uma solda confiável. Todavia, segundo a tabela de soldabilidade entre materiais da Contacts Metals Welding (2000), não se encontra soldabilidade entre alumínio e cobre, por meio de fusão. Diante da pesquisa realizada sobre este tema, encontrou-se diversas informações contraditórias sobre a soldabilidade destes materiais.

MACHADO (1996) afirma que existe a possibilidade de união entre metais dissimilares, utilizando-se algumas técnicas descritas a seguir. A soldagem de materiais dissimilares por resistência é facilitada caso seja feita uma análise detalhada sobre as condições que gerarão o equilíbrio térmico entre as duas superfícies, para que a solda se divida em partes iguais entre as peças. Deve ser gerada mais energia para o material que possui maiores condutividades térmica e elétrica, ou para o material que apresenta maior ponto de fusão, caso os valores das condutividades sejam parecidos (MACHADO, 1996).

Para materiais com valores de condutividade parecidos, o eletrodo deve possuir menor área de contato para o lado da peça mais condutiva, ou a face de sua ponta de contato deve ser fabricada de um material que possua alta resistividade (eletrodos classe 11 ou 12, grupo B – RWMA). Para garantir ainda uma melhor soldagem, a peça do material mais condutivo deve ser revestida com uma fina camada de um material de maior resistividade, ou ser mais espessa. Caso a diferença de condutividades seja apreciável, duas ou mais recomendações acima devem ser seguidas.

Segundo o site WeldTechnology, tem-se na tabela 2.1 algumas propriedades importantes do alumínio e do cobre para a soldagem por resistência, com o objetivo de comparação entre os metais:

Tabela 2.1 – Propriedades dos Materiais Importantes Para a Soldagem por Resistência.

	alumínio	cobre
Condutividade Térmica W/m-K	190	385
Resistividade Elétrica Ohms-cm	5,0E-6	1,7E-6
Ponto de Fusão °C	620	1085

Através da tabela, compreende-se uma certa dificuldade na soldagem destes metais, apesar da afirmação de alguns autores sobre esta possibilidade. Nota-se que as três propriedades físicas diferem bastante para cada metal (condutividade térmica: 200% de variação, resistividade elétrica: 300% de variação, ponto de fusão: 200% de variação). O problema da grande diferença dos pontos de fusão entre o alumínio e o cobre pode causar ruptura no alumínio, já que a solidificação e a contração do metal com maior temperatura de fusão induz tensões no outro metal enquanto este ainda se encontra em um estado de solidificação parcial.

Além da dificuldade imposta pelas diferenças de propriedades físicas, a soldagem do alumínio e do cobre por fusão gera uma camada quebradiça, não condutiva de composto intermetálico que reduz a ductilidade desta junção. Ao ocorrer a união dos metais fundidos, e quando o ponto fundido se aproxima da estrutura de uma liga de 12% de cobre, esta nova liga apresenta características bastante quebradiças para a maioria das aplicações (AMTECH, 2000).

Através de informações do WELDING HANDBOOK (1989), se dois metais base irão formar uma série contínua de soluções sólidas ao serem fundidos, a soldagem entre eles pode ser realizada. Caso contrário, se há formação de fases complexas e componentes intermetálicos, uma

fusão adequada dependerá de um metal de adição e do emprego de um processo de soldagem que evite estas fases e componentes.

2.3 Ensaaios

Os ensaios realizados em materiais metálicos são utilizados para se determinar os parâmetros fundamentais que caracterizam o comportamento mecânico destes materiais, possibilitando ou não sua utilização em aplicações específicas de projetos. Estes parâmetros podem ser utilizados no dimensionamento de partes mecânicas, assim como no controle de qualidade dos materiais e na verificação das melhores condições de fabricação de peças.

Anteriormente a qualquer tipo de ensaio, os corpos-de-prova devem ser limpos, para evitar qualquer tipo de sujeira prejudicial ao procedimento de ensaio, como graxa, óleos, que podem causar um aumento da resistência da superfície. Da mesma forma, os corpos-de-prova defeituosos ou as junções soldadas desalinhadamente devem ser desconsiderados para ensaio.

2.3.1 Ensaio de Cisalhamento

Segundo a norma AWS C1.1-66 (1966), o ensaio de cisalhamento consiste na aplicação de tensão destrutiva nas peças (compostas por tiras ou chapas de metal), em uma máquina de ensaio de tração. Este ensaio é aplicável às junções soldadas por ultra-som, segundo KAISER (1978) e por resistência elétrica, segundo norma AWS C1.1-66 (1966). Por ser um ensaio normatizado para soldas por resistência, a teoria encontrada se refere a este processo. Na figura 2.12, tem-se um esquema do corpo-de-prova a ser ensaiado:

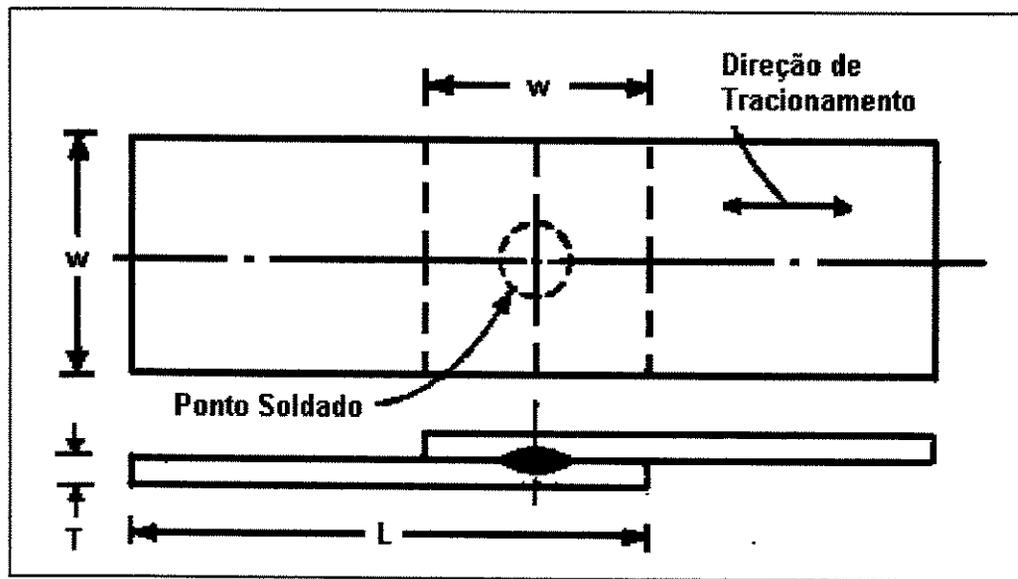


Figura 2.12 – Ensaio de Cisalhamento - dimensões W, L e T de acordo com a norma, para soldas por resistência (AWS C 1.1-66, 1966).

O ensaio de cisalhamento produz esforços unidimensionais no material, ou seja, a carga aplicada introduz um estado simples de tensão na parte útil deste, ao menos durante a zona elástica. Em um ensaio mecânico com esforço uniaxial, o escoamento determina o início da plasticidade em um material metálico. O início da plasticidade do material pode ser verificado através do levantamento da curva tensão-deformação convencional, formada pelas medidas de cargas e dos respectivos alongamentos durante o ensaio.

O caso de esforço ideal é quando o material não ultrapassa o limite de escoamento, para que não entre na zona plástica. Caso isto ocorra, deve-se verificar e controlar seu limite de resistência. É possível uma previsão teórica destes limites quando o material sofre esforços combinados, baseando-se nas propriedades mecânicas calculadas pelos ensaios unidimensionais de tensão.

O ensaio de cisalhamento caracteriza o material, e seus resultados devem ser comparados com a especificação do mesmo. Desta forma, verifica-se sua correspondência com a norma específica e sua aplicação ou não em determinados projetos, resistindo a esforços pré-determinados.

Conforme a norma ASME, Seção IX (1986), através deste ensaio, pode-se encontrar os valores de limite de resistência ao cisalhamento, para juntas soldadas, assim como a carga máxima atingida (SOUZA, 1982, GEDEON, 1987). As informações retiradas deste tipo de ensaio são: resistência máxima da amostra, modo de falha (cisalhamento do metal soldado ou rasgamento do metal base) e tipo de fratura (frágil ou dúctil). No caso da solda por resistência, pode-se medir o diâmetro do ponto cisalhado. Algumas informações importantes para a realização do ensaio são: espessura do material, resistência à tração do metal, ductilidade e composição química.

As figura 2.13 e 2.14 mostram como se conduzir uma medição correta do diâmetro dos pontos soldados por fusão (elípticos e irregulares, respectivamente) e como se calcular o diâmetro médio destes pontos (média aritmética entre os diâmetros máximo e mínimo), para posterior comparação entre parâmetros de soldagem. Esta técnica de medição foi retirada da norma ANSI/AWS D8.7-88.

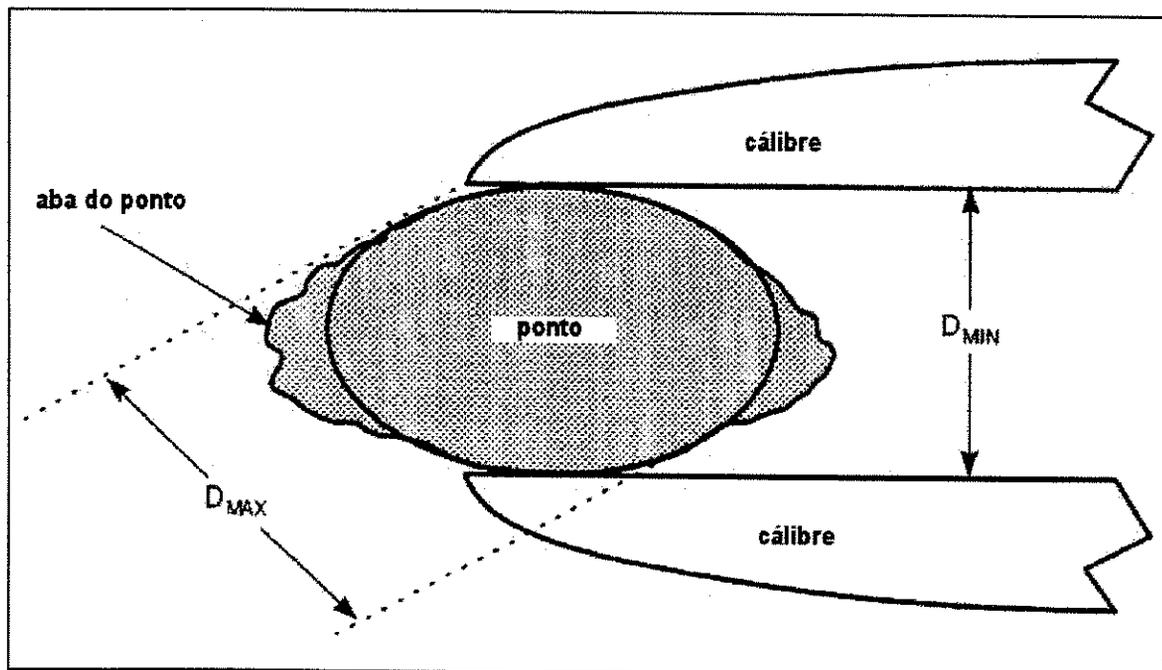


Figura 2.13 – Medição do Diâmetro Médio de Pontos Elípticos Soldados (ANSI/AWS D 8.7 – 88, 1988).

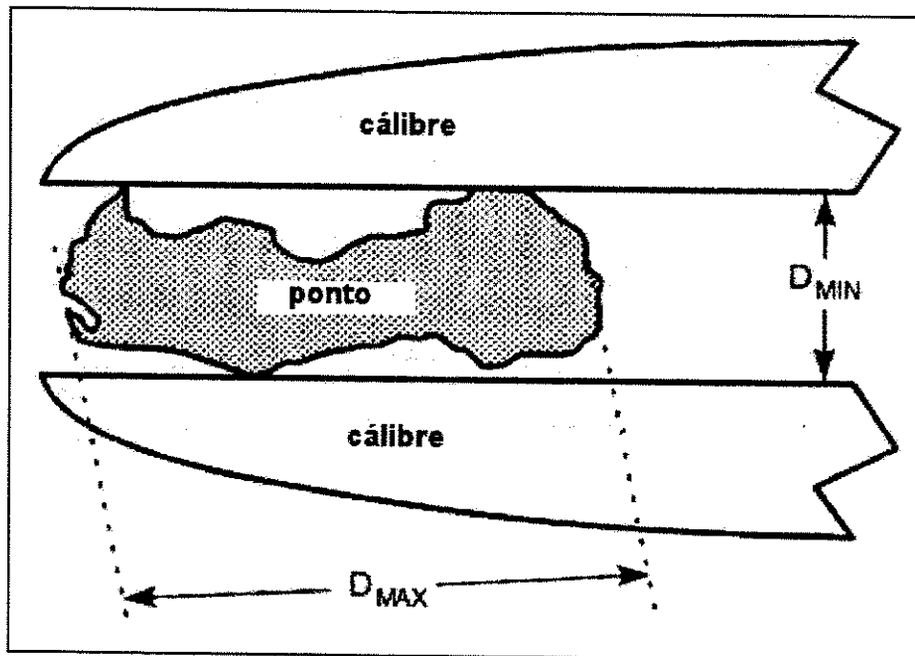


Figura 2.14 - Medição do Diâmetro Médio de Pontos Irregulares Soldados (ANSI/AWS D 8.7 – 88, 1988).

Na figura 2.15, tem-se uma classificação dos possíveis formatos dos pontos soldados por resistência a ponto, que são úteis para a avaliação do tipo de fratura e para medição do diâmetro dos pontos, após um ensaio de cisalhamento. Esta classificação está de acordo com a norma AWS/ANSI/SAE D8.9-97.

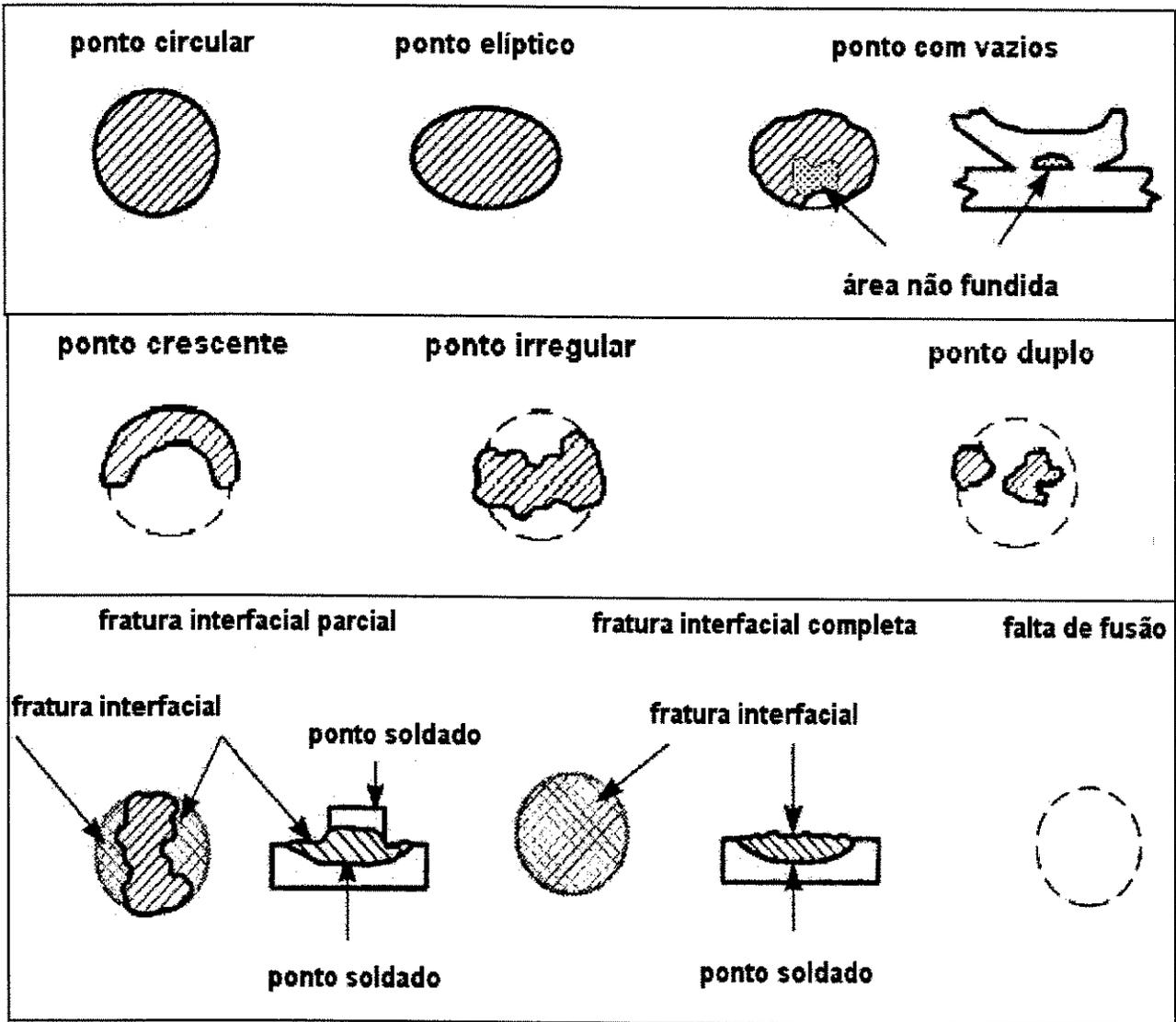


Figura 2.15 – Classificação dos Tipos de Pontos Soldados por Resistência (AWS/ANSI/SAE D 8.9 - 97, 1997).

2.3.2 Ensaio de Arrancamento

O ensaio consiste de um arrancamento destrutivo de uma junção soldada, composta por tiras de metal unidas por um único ponto, como na figura 2.16, onde uma das tiras é fixada, enquanto a outra é dobrada a 180° e arrancada com um instrumento apropriado.

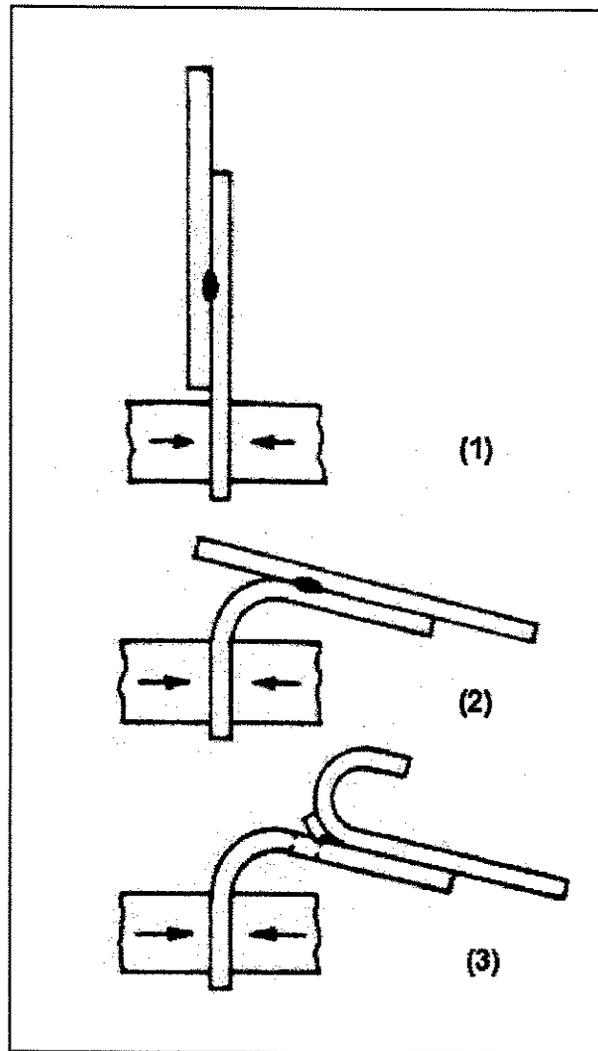


Figura 2.16 – Ensaio de Arrancamento (AWS C 1.1 – 66, 1966).

- 1. Fixação de uma das peças soldadas em morsa, ou outro suporte;**
- 2. Dobramento da amostra;**
- 3. Arrancamento da peça com pinça ou outra ferramenta.**

Pode-se extrair as seguintes informações deste ensaio: tamanho da zona fundida para soldas por resistência (quanto mais próximo o diâmetro do ponto do diâmetro da face do eletrodo, melhor a qualidade da solda), modo de fratura, forma do ponto (se o ponto tem o formato de um “V” e contém algum metal da parte oposta, a solda pode ser considerada de qualidade, enquanto que um ponto totalmente circular sugere características de solda frágil), e penetração. Caso haja falta de penetração, o metal de uma das partes não será arrancado inteiramente. A irregularidade

de forma do metal arrancado também indica penetração insuficiente. Para esta verificação pode-se utilizar as informações da figura 2.14.

Segundo KAISER (1978), este ensaio pode ser aplicado para as junções soldadas por ultra-som, assim como para a soldagem por resistência a ponto. Todavia, segundo o fabricante de equipamentos de ultra-som AMTECH, este ensaio é desaconselhável para este tipo de soldagem.

Conforme a norma AWS C1.1-66 (1966), o ensaio de arrancamento pode ser realizado no chão-de-fábrica, com um mínimo de equipamento, e é considerado um ensaio complementar ao ensaio de cisalhamento. A limitação deste ensaio é a variação nos resultados, em decorrência do ferramental utilizado. Pode ser aplicado a materiais de qualquer espessura até 3,17 mm.

2.3.3 Ensaio de Resistência Elétrica

O ensaio de resistência elétrica consiste na medição da resistência de junções, com a utilização de um ohmímetro, sendo cada uma de suas extremidades de medição fixadas em cada uma das peças. O valor da resistência é encontrado através da passagem de uma corrente elétrica através do ponto de junção entre as peças.

Este ensaio tem a finalidade de verificar o valor da resistência elétrica da junção para determinada aplicação, principalmente para as junções de metais dissimilares, bastante utilizadas em aplicações elétricas (SILVEIRA, 1987).

Segundo KAISER (1978), em uma base de peso, a resistividade elétrica do alumínio é de aproximadamente 200% a do cobre. O cobre IACS (International Annealed Copper Std., referente à resistência de um arame de 1,0 m e peso de 1,0 g, de 0,15328 Ω , a 20°C) possui 100% de condutividade elétrica a 20°C. Em uma base volumétrica, a condutividade elétrica do alumínio varia entre 57 e 62% da do IACS, dependendo da liga. Em aplicações práticas, a condutividade do alumínio varia entre 60 a 80% do IACS. Isto ocorre porque a proporção superfície/massa de chapas de alumínio (e de outras formas) é maior do que a de similares de cobre.

2.4 Metalografia Complementar

Para análise de junções soldadas é bastante interessante a utilização da metalografia, através da qual pode-se encontrar possíveis imperfeições que podem influenciar as propriedades mecânicas e elétricas da junção (VOORT, 1984).

Em qualquer estudo de soldagem, a macroestrutura da junção é estabelecida pelo tipo de processo empregado, os parâmetros de operação e o tipo de material utilizado, e pode ser relacionada com o tamanho e forma do metal soldado, profundidade de penetração, estrutura do material e dureza. Em soldas por fusão, na área do metal soldado e na área afetada pelo calor, pode-se encontrar mudanças na composição do material, no tamanho e orientação dos grãos, na microestrutura e na dureza. Em soldas no estado sólido, pode-se caracterizar a interface de difusão dos materiais, verificando-se uma possível formação de compostos intermetálicos, os quais podem prejudicar a união.

2.5 Planejamento Experimental e Método da Superfície de Resposta

O planejamento experimental fatorial é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Segundo BUTTON (1999), todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são testados e analisados através deste planejamento. Pode-se encontrar efeitos de influência de uma variável sobre a outra, através da análise de interação entre elas.

Este tipo de planejamento é utilizado em estágios iniciais de pesquisa, permitindo o estudo de diversas variáveis (fatores) influentes ou não, com um número reduzido de experimentos.

Com este primeiro experimento, pode-se definir quais são realmente as variáveis de influência e estudar seus efeitos sobre a variável de resposta escolhida. Conforme JURAN (1993), este delineamento de experimentos simples fornece uma rotina das pequenas alterações

sistemáticas ocorridas no processo de produção, fazendo com que o processo forneça informações sobre ele mesmo, ao mesmo tempo em que desenvolve produtos de acordo com os padrões. Algumas pequenas alterações nos fatores são permitidas, tendo suas conseqüências detectadas na presença de diversas variações naturais que envolvem o processo.

Ainda de acordo com este autor, as estatísticas dos efeitos das variáveis são ortogonais umas às outras, ou seja, as magnitudes e sinais de cada estatística não são influenciados pelas magnitudes e sinais das demais, o que torna a análise dos resultados do planejamento fatorial objetiva.

O planejamento fatorial 2^3 apresenta 3 fatores (variáveis) e 2 níveis pré-determinados para cada fator, configurando um modelo de efeitos fixos. Segundo MONTGOMERY (1984), os 7 graus de liberdade gerados pelas 8 combinações de fatores deste planejamento estão associados com os efeitos principais dos 3 fatores A, B e C, as interações entre dois fatores AB, AC e BC, e a interação entre os três fatores ABC.

Após a obtenção dos resultados numéricos do planejamento fatorial, pode-se introduzir um teste de hipóteses para se definir a magnitude da influência das variáveis e de suas interações sobre a variável de resposta:

$$\begin{aligned}H_0 : \tau_i &= 0 \\H_0 : \beta_j &= 0 \dots \\H_0 : (\tau\beta)_{ij} &= 0 \dots\end{aligned}$$

para, pelo menos, um i , um j , ou um par i,j e assim por diante, onde τ , β , etc, representam os efeitos das variáveis dos processos A, B e C, e as outras hipóteses representam os efeitos das combinações entre estas duas a duas e finalmente, o efeito da combinação entre as três (MONTGOMERY, 1984). Este teste de hipótese é utilizado somente como um indicativo.

Como seguimento ou complementação ao planejamento experimental fatorial, pode ser utilizado o Método da Superfície de Resposta (MSR). De acordo com MYERS (1995), a metodologia da superfície de resposta é uma técnica estatística e matemática utilizada para o

desenvolvimento, melhoria e otimização de processos, principalmente em situações onde diversas variáveis de entrada influenciam potencialmente uma medida de performance ou uma característica de qualidade (variável de resposta).

Segundo JURAN (1993), a superfície de resposta é a representação matemática ou gráfica da conexão entre importantes variáveis independentes, fatores controlados e uma variável dependente. Sendo que a maioria dos processos possui diversas variáveis dependentes, as respostas são normalmente uniformes e podem ser graduadas aproximadamente com curvas simples, como famílias de círculos ou de parábolas. A superfície de resposta é inicialmente desconhecida, podendo-se obter melhorias quando se descobre a direção a seguir.

Inicia-se a otimização de processos através do MSR com experimentos exploratórios, que visam a determinação das importâncias relativas dos fatores na variável de resposta e a obtenção de direções promissoras para melhora desta variável. Nesta fase, os planos adotados são também fatoriais, geralmente de dois níveis, incluindo-se alguns pontos centrais replicados, para estimação da variância do erro experimental. A ordem de realização de cada experimento deve ser aleatória, o que permite o estudo estatístico do erro, sem maiores preocupações com a forma de distribuição da resposta, validando-se as técnicas de mínimos quadrados e as conseqüentes análises de variância.

O resultado deste fatorial central indicará a estimação de uma superfície de resposta (um hiperplano ajustado aos dados, por mínimos quadrados). A partir do centro da região experimental, encontra-se a direção de maior aclave no hiperplano, ou seja, a direção do vetor gradiente, aplicado ao ponto central. Marca-se, arbitrariamente, alguns pontos nesta direção, para novos experimentos.

Caso o resultado destes novos experimentos mostrar valores sempre crescentes, realiza-se novos experimentos mais próximos aos pontos de maior resposta, com outro plano fatorial (de dois níveis, geralmente), com os fatores julgados mais importantes. Os fatores menos importantes podem ser temporariamente eliminados do estudo. Este procedimento é iterado, até se determinar uma região onde um ponto máximo possa ser encontrado.

Nesta região, realiza-se um plano experimental adequado para ajustar um polinômio de segundo grau (superfície de segundo grau), sendo este a função mais simples que permite estudar a curvatura da superfície (variação da resposta). Para se garantir uma aproximação razoável do modelo à resposta, a região experimental deve ser razoavelmente estreita.

Trata-se o método da superfície de resposta como sendo composto por dois estágios:

- 1) considera-se um modelo matemático de primeira ordem, executa-se um delineamento fatorial, ajusta-se os dados, delinea-se os contornos da superfície de resposta, e determina-se a direção da ascensão mais acentuada;
- 2) considera-se um modelo matemático de segunda ordem, executa-se um delineamento experimental central composto, ajusta-se os dados, delinea-se os contornos, efetua-se uma análise canônica (mudança do sistema de coordenadas para o ponto crítico estimado, por translação e rotação de eixos, de modo a se fazer coincidir os eixos do novo sistema de coordenadas com os eixos da superfície de segundo grau), e localiza-se uma condição ideal (otimizada).

Simplificando-se os passos deste método, e utilizando-se inicialmente de um planejamento fatorial, é necessário (JURAN, 1993):

- 1) definir o objetivo da pesquisa;
- 2) selecionar fatores (variáveis de influência) e amplitudes de variação (níveis das variáveis), compreendendo os aspectos técnicos do processo;
- 3) realizar um planejamento fatorial, com pontos centrais (para estimação da variância, segundo CARVALHO, (1996)) e ordem de realização aleatória;
- 4) analisar os resultados: calcular os efeitos e interações do delineamento fatorial, calcular os intervalos de confiança (95%, preferencialmente), calcular o efeito de curvatura que representa a diferença entre a média dos pontos do experimento fatorial e a média dos pontos centrais. Pode-se obter uma estimativa da variância quando as condições dos pontos centrais são repetidas três vezes;
- 5) determinar a direção da ascensão mais acentuada, perpendicular às linhas de contorno (planos ortogonais, que permitem a estimação estatisticamente independente entre termos lineares e

quadráticos). Quatro experimentos nesta direção indicam o centro de um segundo experimento. Analisar os dados para verificar uma possível falta de ajuste. Se a proporção do quadrado médio da falta de ajuste dividida pelo quadrado médio do erro puro for superior ao valor de F , pode haver evidência de falta de ajuste do modelo de primeira ordem, devendo-se utilizar o modelo de segunda ordem.

Segundo CARVALHO (1996), a técnica de superfície de resposta ajusta funções simples e polinomiais de baixo grau dos fatores experimentais. Os planos experimentais são ajustados de forma a gerar boas propriedades aos estimadores dos parâmetros dos polinômios. Ao se estudar as propriedades dos polinômios ajustados, sabe-se se o ponto ótimo é máximo, mínimo ou ponto de sela. Outra informação é sobre a sensibilidade do ajuste à variações dos fatores próximo ao ponto ótimo (variação esperada em direções escolhidas).

Ainda segundo CARVALHO (1996), na maioria das situações práticas, a verdadeira função de resposta é desconhecida. O campo da metodologia da superfície de resposta consiste de estratégia experimental para explorar o espaço do processo ou das variáveis, modelamento estatístico empírico para desenvolver uma relação aproximada apropriada entre o campo e as variáveis do processo, e métodos de otimização para se encontrar os níveis ou valores das variáveis do processo que gerem valores desejáveis de respostas (maximização ou minimização de valores).

Graficamente, pode-se encontrar a relação entre as variáveis de influência e a de resposta. Para cada valor das variáveis de influência, existe um valor correspondente para a variável de resposta. Esta perspectiva gráfica do problema é que induziu o nome do método: superfície de resposta.

Capítulo 3

Técnicas Experimentais

3.1 Introdução

Este capítulo traz uma descrição detalhada dos equipamentos e procedimento experimental utilizados para a realização da soldagem pelos processos de ultra-som e de resistência a ponto de três tipos diferentes de junções (alumínio/alumínio, cobre/cobre e alumínio/cobre), assim como dos ensaios mecânicos e elétrico que puderam caracterizá-las, para uma posterior comparação entre algumas de suas propriedades. É também descrita a parte metalográfica do trabalho, que complementou os resultados numéricos dos ensaios.

Os equipamentos de soldagem foram monitorados a cada solda, para se garantir a manutenção dos valores fixados dos parâmetros. O monitoramento dos processos se deu através de sistemas computadorizados de aquisição de dados, provenientes dos respectivos fabricantes dos equipamentos, assim como para o equipamento de ensaio de cisalhamento, de onde se colheu dados e gráficos através de programa computadorizado.

Dos sistemas de aquisição de dados de soldagem, pôde-se obter dados referentes às grandezas que representavam a física dos processos. Do programa de aquisição de dados do equipamento de ensaios, pôde-se colher gráficos demonstrativos do comportamento mecânico dos corpos-de-prova durante o ensaio de cisalhamento.

Depois de testados os sistemas de aquisição, foram feitas soldas para se determinar os parâmetros ótimos de soldagem para cada processo. Em seguida, estas junções soldadas foram levadas aos ensaios de cisalhamento, arrancamento e medição de resistência elétrica.

Finalmente, algumas destas junções foram submetidas à análise metalográfica para fins de complementação dos resultados do ensaio de cisalhamento.

3.2 Materiais Utilizados

As junções estudadas foram compostas dos seguintes materiais:

1 - Tiras de alumínio da série 1100-O, fornecidas pela empresa Redmetal, com dimensões:

- espessura: 1,8 mm;
- largura: 7,0 mm;
- comprimento: 5,0 cm.

As dimensões espessura e largura são de acordo com a norma NBR 14360 (Fio de Alumínio Nu de Seção Retangular – Especificação). A dimensão comprimento foi escolhida pela empresa Robert Bosch, segundo suas necessidades de produto.

A composição química da liga é descrita na tabela 3.1, segundo o fornecedor:

Tabela 3.1 - Composição Química da Liga de Alumínio.

Composição Química (partes por peso em %)						
Al	Si	Cu	Zn	Fe	Mn	Outros
99,0	0,95	0,20	0,10	(Si+Fe)	0,05	0,15

Seguem, na tabela 3.2, as propriedades mecânicas do material, e, na tabela 3.3, algumas propriedades físicas importantes para o trabalho, segundo SAE HANDBOOK (1995):

Tabela 3.2 – Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio.

Propriedades Mecânicas				
Lim. Resist. à Tração (MPa)		Lim. Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Dureza Brinell 500/10 HB (2)
Min	Máx	25	35	(20)
75	105			

Tabela 3.3 – Propriedades Físicas da Liga de Alumínio.

Propriedades Físicas		
Intervalo de Solidificação (°C)	Densidade a 20°C (Kg/m)	Condutividade Térmica (W/m.K)
640 - 655	10	222

Os valores de resistividade elétrica do material, a algumas temperaturas, são dados na tabela 3.4 (GIACOLETTO, 1977):

Tabela 3.4 – Variação da Resistividade Elétrica com a Temperatura.

Temperatura (°C)	Resistividade Elétrica ($\cdot 10^{-9} \Omega$.m)
- 23,15	22,401
21,85	27,401
300	59,0

Segundo SAE HANDBOOK (1995), esta liga é soldável pelo processo de resistência a ponto, utilizando-se, porém, de técnicas especiais. Com a calor excessivo da soldagem ou das condições de trabalho da peça, ocorre a oxidação com o calor.

2 - Tiras de cobre livre de oxigênio, da série 10200, têmpera mole, fornecido pela empresa Pirelli, com dimensões:

- espessura: 1,2 mm;
- largura: 7,0 mm;
- comprimento: 5,0 cm.

As dimensões espessura e largura são de acordo com a norma NBR 14193 (Fio de Cobre Nu de Seção Retangular – Especificação). A dimensão comprimento foi escolhida pela empresa Robert Bosch, segundo suas necessidades de produto.

A composição química da liga de cobre é mostrada na tabela 3.5, segundo o fornecedor:

Tabela 3.5 – Composição Química da Liga de Cobre.

Composição Química (partes por peso em %)				
Cu	Zn	Fe	Al	Outros
99,93	0,021	0,01	0,011	0,01

Seguem, na tabela 3.6, as propriedades mecânicas do material, e, na tabela 3.7, algumas propriedades físicas importantes para o trabalho, segundo SAE HANDBOOK (1995):

Tabela 3.6 – Propriedades Mecânicas da Liga de Cobre.

Propriedades Mecânicas			
Lim. Resist. à Tração (MPa)	Lim. Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Dureza (HF)
220	70	45	40

Tabela 3.7 – Propriedades Físicas da Liga de Cobre.

Propriedades Físicas		
Ponto de Fusão (°C)	Densidade a 20°C (g/cm ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)
1083	8,94	391

Os valores de resistividade elétrica do material, a algumas temperaturas, são dados na tabela 3.8 (GIACOLETTO, 1977):

Tabela 3.8 – Variação da Resistividade Elétrica com a Temperatura.

Temperatura (°C)	Resistividade Elétrica ($\cdot 10^{-9} \Omega$.m)
- 23,15	14,3
21,85	17,3
300	36,0

É uma liga de ótima ductilidade, altíssima pureza, livre de oxigênio, não sujeita ao trincamento por hidrogênio, e utilizada em condutores térmicos e elétricos, e componentes eletrônicos. É designada para uso onde o processo envolve aquecimento em atmosferas redutoras. De acordo com SAE HANDBOOK (1995), a soldagem por resistência elétrica desta liga não é recomendável, principalmente devido aos altos valores de condutividade térmica e elétrica.

Ambas as tiras apresentam geometria plana, com bordas sem rebarbas, esquadradas, e não torcidas. As superfícies são lisas, sem qualquer defeito superficial macroscópico.

3.3 Equipamentos Utilizados para os Ensaios

Os ensaios mecânicos de cisalhamento e de arrancamento e o ensaio de resistência elétrica foram realizados na Robert Bosch, em equipamentos calibrados e em boa condição.

3.3.1 Equipamento de Ensaio de Cisalhamento

O equipamento para ensaio de cisalhamento (tração) utilizado é proveniente do fabricante MTS, e possui capacidades de carga de 5.000 N e 100.000 N.

O equipamento foi calibrado segundo a norma NBR 6156, apresentando exatidão de 1%. Sua calibração, assim como a da célula de carga, foi realizada em fev/2000.

As dimensões dos corpos-de-prova não estão conforme as normas referentes a este ensaio, já que trata-se de um trabalho comparativo entre diferentes junções de mesmas dimensões, as quais pertencem a uma peça fabricada por indústria. As peças foram fixadas nas garras, e, de acordo com a norma NBR 8309, realizou-se a extração longitudinal das tiras unidas, com velocidade de alongamento de 20 mm/min. Teve-se a preocupação de se alongar os corpos-de-prova no sentido longitudinal de laminação, devido à maior resistência do material nesta direção.

O sistema computadorizado do equipamento gerou valores da força de extração, em Newtons, como também gráficos de extensão x carga e tempo x carga, mostrando o comportamento mecânico de alongamento dos corpos-de-prova no decorrer do ensaio.

3.3.2 Equipamento de Ensaio de Arrancamento

Para este ensaio bastante simples, utilizou-se, conforme a norma AWS C 1.1-66: morsa para fixação das peças, pinça para extração das tiras. Para se obter uma medição numérica e complementar deste ensaio, foi empregado um dinamômetro Kratos, aferido em ago/1999.

O dinamômetro foi fixado com uma garra na interface das peças em uma de suas extremidades, e a outra foi fixada em um suporte, posicionando-o verticalmente. Ao se solicitar a garra, forçando as partes a serem arrancadas, o dinamômetro registrou o valor da resistência ao arrancamento de cada amostra.

Algumas das junções mais resistentes (principalmente as de Cu/Cu) foram ensaiadas, quanto à resistência ao arrancamento, no equipamento de ensaio de cisalhamento, já que a força máxima de extração atingida no dinamômetro era menor do que a resistência ao arrancamento destas junções.

Para os ensaios de cisalhamento e de arrancamento, as dimensões escolhidas para os corpos-de-prova não seguiram a norma da AWS, pois tratou-se de um trabalho comparativo de propriedades entre peças já dimensionadas.

3.3.3 Equipamento de Medição de Resistência Elétrica

Para medição de resistência elétrica das junções, foi utilizado um micro-ohmímetro Keithley 580, aferido em dez/1999, com precisão de 0,05 μm .

As peças foram fixadas nas garras de medição pelas extremidades, de modo a se medir a resistência da junção em seu comprimento total. Outro fator verificado foi a temperatura de ensaio, já que o coeficiente de temperatura dos materiais varia de acordo com esta grandeza. Para este ensaio, foram utilizadas as normas NBR 6815 (Fios e Cabos Elétricos – Ensaio de Determinação da Resistividade em Componentes Metálicos) e NBR 6814 (Fios e Cabos Elétricos – Ensaio de Resistência Elétrica).

3.3.4 Equipamentos para Metalografia

Utilizou-se os seguintes equipamentos para a realização da metalografia das amostras:

- microscopia óptica (estereoscópio) Olympus BX 60: imagens das amostras soldadas por ultra-som (superfície soldada) e por resistência (penetração e diâmetro dos pontos), imagens das junções não soldáveis;
- microscopia eletrônica de varredura Cambridge: imagens das amostras soldadas por ultra-som e porcentagem dos elementos constituintes das superfícies soldadas.

3.4 Planejamento Experimental para a Soldagem por Ultra-Som

Para cada processo de soldagem, foi realizado um planejamento experimental independente, devido à não existência de interação entre qualquer um dos parâmetros regentes dos

dois processos. No final do trabalho, pôde-se comparar diretamente as propriedades de cada processo, já que as variáveis de resposta escolhidas eram as mesmas.

Para a realização das soldas por ultra-som, o procedimento experimental foi dividido em 5 fases:

1ª Fase - Pré-testes para verificação, no sistema de soldagem, dos parâmetros principais de soldagem e dos níveis das variáveis de controle (parâmetros principais).

Esta fase foi destinada à realização de pré-testes no processo, para início de otimização dos parâmetros de soldagem do equipamento. Todos os parâmetros foram controlados por computador.

Foram sendo realizadas soldas, como descrito adiante, até se encontrar junções visual e mecanicamente aceitáveis (sendo utilizado o critério de arrancamento manual para aceitação).

Estabelecidos, assim, os níveis de soldagem para os parâmetros do equipamento, seguiu-se, na fase seguinte, com a confecção de corpos-de-prova.

2ª Fase - Determinação da quantidade inicial de amostras do experimento de soldagem. Realização dos experimentos de soldagem, para obtenção dos corpos-de-prova.

Ao se decidir pela utilização de um planejamento experimental fatorial, composto por uma réplica, dois níveis e três fatores, foi possível a determinação da quantidade inicial de corpos-de-prova. A quantidade total de corpos-de-prova somente foi possível com o seguimento das soldagens e alimentação de resultados no método da superfície de resposta (MSR), de forma interativa.

O objetivo, com este planejamento, foi o de minimizar o número de soldagens, dando sustentação científica aos resultados, ao mesmo tempo (BUTTON, 1999; MONTGOMERY, 1984, 1993; WERKEMA, 1996). Além disso, o planejamento experimental fatorial, assim como um diagrama de Pareto, pôde determinar a significância (influência) de cada parâmetro, e das interações entre eles. Isto possibilitou a verificação quantitativa da influência de um parâmetro no outro.

As variáveis do processo de soldagem por ultra-som estudadas foram: Amplitude (2 níveis), Pressão Aplicada no Sonotrodo (2 níveis) e Energia de Soldagem (2 níveis).

Os valores (níveis) destas variáveis foram, como já mencionado, definidos em função do equipamento de soldagem existente na empresa (verificação da faixa aceitável de soldagem para cada parâmetro), na 1ª Fase do trabalho (início de otimização dos parâmetros).

Tão logo pronta a primeira quantidade de corpos-de-prova, estes foram levados aos ensaios (na fase seguinte), nos quais se basearam os resultados do trabalho.

3ª Fase - Realização dos ensaios mecânicos e do ensaio elétrico propostos. Alimentação do procedimento estatístico do MSR com as informações obtidas no ensaio de cisalhamento.

Após concluída a 2ª Fase, as propriedades dos corpos-de-prova soldados foram avaliadas através dos seguintes ensaios: cisalhamento, arrancamento e resistência elétrica.

Desta forma, obteve-se valores das propriedades mecânicas e elétrica: limite de resistência ao cisalhamento, limite de resistência ao arrancamento (através da adaptação do dinamômetro) e resistência elétrica, para as junções soldadas por ultra-som.

Com os resultados numéricos dos ensaios de cisalhamento, foi possível alimentar o programa estatístico de análise da superfície de resposta, o qual gerou novos parâmetros a serem soldados e, novamente, ensaiados. E assim sucessivamente, na fase seguinte, até se encontrar um ponto ou uma região ótima (com amostras mais resistentes ao cisalhamento) para soldagem das junções.

Foi escolhido o ensaio de cisalhamento para alimentação do MSR devido aos seguintes fatores:

- é o ensaio que melhor representa as exigências de resistência da peça em seu local de trabalho;
- o ensaio de arrancamento, pela norma, não gera resultados numéricos, enquanto que o MSR só pode ser alimentado por este tipo de resultado;
- o ensaio de arrancamento, devido a sua simplicidade de procedimentos e equipamentos, gera alta variância nos resultados, quando utilizado o dinamômetro para medição;
- o ensaio de resistência elétrica gerou resultados idênticos para a mesma junção, independente da variação dos níveis dos parâmetros. Assim, somente pôde ser realizada uma comparação

entre os processos de soldagem, e não entre amostras de mesmo material com variação de parâmetros.

4ª Fase – Nova soldagem de junções, de acordo com os resultados do MSR, até a conclusão da otimização dos parâmetros. Realização de análise metalográfica.

Nesta fase, foram realizadas as novas soldas, de acordo com os novos parâmetros gerados pelo programa de análise MSR, e, como citado anteriormente, foram encontradas as regiões ou os pontos ótimos para cada tipo de junção.

Posteriormente, os corpos-de-prova ensaiados foram analisados metalograficamente, para estudo das características metalúrgicas das junções, complementando assim os resultados obtidos nos ensaios. Para tanto, foram utilizadas técnicas de microscopia ótica e eletrônica, em laboratório da empresa e da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

5ª Fase - Análise dos resultados.

Para conclusão do trabalho, foi realizada uma análise comparativa quantitativa e qualitativa dos resultados obtidos da 2ª à 4ª Fase, chegando-se às conclusões sobre cada tipo de junção e, finalmente, para os dois processos estudados. Esta comparação somente foi possível através do emprego do planejamento estatístico adequado na 2ª Fase. Além da comparação, pôde também ser estudada a influência da variação de cada parâmetro no processo.

Para a otimização deste processo, de modo a se encontrar resultados mais verossímeis e econômicos, todos os 3 parâmetros escolhidos foram variados conjuntamente em níveis, já que, com a variação de um deles, há a variação dos outros dentro do processo, devido à física que rege o fenômeno. A economia em quantidade de corpos-de-prova no experimento se mostrou na possibilidade de verificação da influência dos parâmetros do processo todos ao mesmo tempo, fazendo-os variar imediatamente no primeiro experimento fatorial (podendo-se analisar criticamente os resultados logo no primeiro experimento). Ainda, se caso fosse variado somente um dos parâmetros a cada solda, o experimento poderia ser considerado incompleto e inverossímil (já que os parâmetros variam sempre conjuntamente). E mais, o procedimento correto consiste em se variar todas as variáveis ao mesmo tempo, já que estas podem se

influenciar mutuamente, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da outra (NETO, 1995).

Desta forma, foi escolhido o planejamento fatorial 2^3 , ou seja, um fatorial de 2 níveis (1 e 2) e 3 fatores (variáveis de influência, parâmetros). Para cada ensaio destrutivo e para cada junção de material foi aplicado um planejamento fatorial independente, como nas tabelas 3.9 e 3.10. Continuando com a economia do processo, a quantidade de réplicas escolhida foi de 1 réplica para cada experimento (com exceção da junção Al/Al, a qual, devido à grande variação nos resultados de cisalhamento apresentada, foi replicada duas vezes), o que pôde ser comprovado como número suficiente de amostras, devido ao emprego subsequente do MSR.

As tabelas a seguir (3.9 e 3.10) mostram a quantidade inicial de amostras para cada ensaio destrutivo (para o ensaio de resistência elétrica, foram utilizadas as amostras soldadas para o ensaio de cisalhamento) e tipo de junção:

1 - ensaio de cisalhamento

Tabela 3.9 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Cisalhamento.

Ultra-som	Al/Al	2^3
Ultra-som	Al/Cu	2^3
Ultra-som	Cu/Cu	2^3
	Total de amostras	24

2 - ensaio de arrancamento

Tabela 3.10 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Arrancamento.

Ultra-som	Al/Al	2^3
Ultra-som	Al/Cu	2^3
Ultra-som	Cu/Cu	2^3
	Total de amostras	24

Para os experimentos de soldagem, escolheu-se os níveis iniciais dos parâmetros dentro de faixas ótimas, nas quais se obteve soldas visualmente aceitáveis e com um mínimo de resistência mecânica, comprovada por um arrancamento manual imediatamente após o experimento

(procedimento adotado na produção da empresa). Estas faixas variaram para cada tipo de material e espessura das peças.

Os níveis foram escolhidos de sorte a cobrir uma área máxima de soldagem, tentando-se escolhê-los o mais afastados possível. Por outro lado, não puderam ser tão afastados de forma a resultar, nesta fase, em relações fortemente não-lineares. De qualquer forma, o planejamento fatorial é um modelo de efeitos fixos, assim, os resultados de sua análise não podem ser transferidos para outros níveis que não os analisados no planejamento. É importante salientar que, através de conhecimento prévio sobre o assunto, e com um senso de direção gerado com os pré-testes, foi facilitado o encontro dos valores para esses níveis.

Somando-se as quantidades de amostras para o planejamento fatorial (mostradas nas tabelas 3.9 e 3.10), o total encontrado foi de 48 observações. Em cada tentativa de soldagem, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável puderam ser investigadas (BUTTON, 1999). Os fatores estudados para o processo de ultra-som foram nomeados como abaixo:

- a. amplitude;
- p. pressão;
- e. energia,

cada um com níveis a1, a2; p1, p2; e1, e2.

A combinação dos fatores no planejamento pode ser vista na tabela 3.11, formando as 8 junções soldadas :

Tabela 3.11 – Combinação dos Fatores no Planejamento Experimental Fatorial.

	p1		p2	
	e1	e2	e1	e2
a1	alpe1	alpe2	alp2e1	alp2e2
a2	a2pe1	a2pe2	a2p2e1	a2p2e2

Foi utilizada uma seqüência aleatorizada de soldagem destes corpos-de-prova, através de sorteio. Tal feito aumentou a probabilidade de que o efeito de variáveis incontroláveis fosse

eliminados, além de ter permitido o aprimoramento da validade das estimativas da variância dos erros experimentais, tornando possível a aplicação de testes estatísticos de significância (JURAN, 1993).

Utilizou-se, após a realização do planejamento fatorial, o gráfico probabilístico de efeitos para verificar-se os valores dos efeitos de cada parâmetro (fator), e encontrar-se qual fator, ou qual combinação de fatores mais influenciou no experimento, e se os fatores e a combinação entre eles apresentaram ou não alguma influência. Com os resultados de cada planejamento experimental fatorial individual, pôde-se verificar as médias e variâncias de cada experimento, assim como a influência de cada fator individualmente e suas interações em conjunto.

Conforme já dito, este modelo de planejamento permitiu um número reduzido de experimentos, supondo que as hipóteses de normalidade foram satisfeitas. Além disso, como havia dois níveis para análise de cada fator, assumiu-se que a variável de resposta apresentava comportamento linear entre estes níveis. A utilização deste primeiro fatorial, somente com dois níveis, não fechou a otimização, mas sim se destinou a dar uma orientação, para se mover a região experimental em direção a melhores regiões. Quando, com a aplicação sucessiva de experimentos deste tipo, se chegou à região que pareceu conter um ponto ótimo, mudou-se para planos com maior quantidade de níveis, do tipo "superfície de resposta" (CARVALHO, 2000).

A partir dos gráficos gerados pelo planejamento experimental fatorial (com os efeitos mais importantes), para cada junção e processo, verificou-se a região onde as propriedades mecânicas ao cisalhamento mostraram-se melhores (superfície plana de ajuste de experimentos), e a partir de então, escolheu-se alguns pontos direcionados para esta região (caminhando-se, através do gradiente máximo da resposta), fazendo-se soldas com estes parâmetros ótimos, e assim sucessivamente, até se encontrar um ponto ou uma região otimizada. Esta exploração do caminho do gradiente máximo consistiu de poucos pontos, sem estrutura fatorial. Ao se assegurar uma região (ou ponto) ótima, lançou-se, então, nesta região, um outro plano de superfície de resposta (por exemplo, o central composto). Este plano permitiu a confirmação da região (ou ponto) ótima

e o estudo da variação de resposta em qualquer direção do espaço dos fatores (análise de sensibilidade).

Ou seja, o esquema de otimização proposto empregou planos aplicados em seqüência, que dependeram de resultados sucessivos entre o planejamento fatorial e o método da superfície de resposta. Este método foi realizado via computacional, utilizando-se o programa The SAS System, versão 6.12.

Verificou-se, durante todo o planejamento experimental, que possíveis influências resultantes de variáveis não controladas não afetassem as informações obtidas sobre os fatores de principal interesse, conforme JURAN (1993). No processo por ultra-som, assim como no processo por resistência, existiu a preocupação de se controlar a variação de outros fatores que poderiam interferir nos resultados, como a homogeneidade do material (foram realizadas três análises químicas aleatórias para cada material utilizado), a limpeza superficial das peças (foi realizada limpeza dos materiais anteriormente às soldagens por resistência), o cuidado na manutenção da tensão de rede constante (as soldas foram realizadas fora do horário de produção da empresa).

No processo por ultra-som, todas as outras variáveis não estudadas (pré-altura, altura, tempo, pressão e potência) puderam ser monitoradas via computador. Assim, pôde-se verificar qualquer alteração nos valores de entrada destas variáveis. Além disso, pôde-se contar com uma ajustagem inicial do equipamento (posterior à montagem), realizada por técnico do fabricante.

Deve-se, ainda, citar que, com os resultados do ensaio de arrancamento (que, de acordo com a norma, não gera resultados numéricos), foi realizada somente uma comparação entre os processos e as junções, e uma análise metalográfica de amostras realizadas com diferentes condições de soldagem (as que geraram máxima e mínima resistência ao arrancamento).

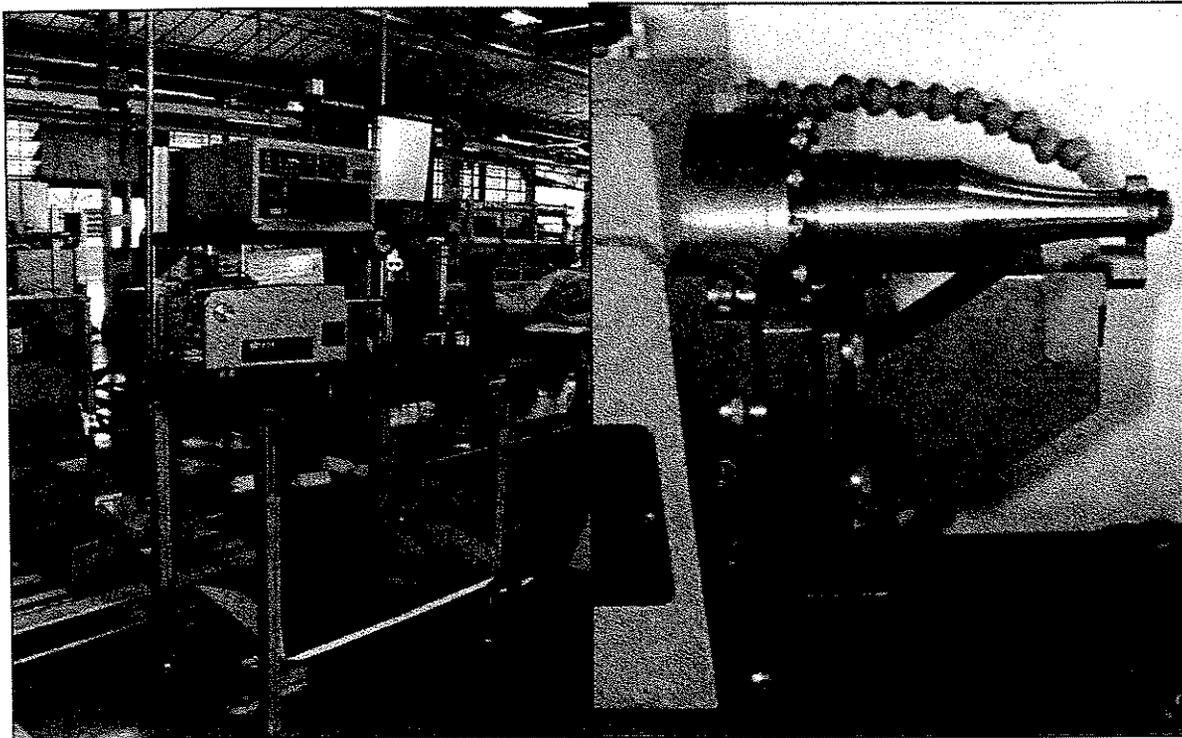
Os resultados deste planejamento serão mostrados no capítulo 4.

3.5 Descrição do Procedimento Experimental para o Processo de Ultra-Som

Os próximos itens trazem todo o procedimento experimental utilizado para a realização da soldagem e ensaios das junções unidas por ultra-som, assim como o equipamento utilizado para solda. Verifica-se que cada tipo de junção necessitou de certos cuidados e apresentou características específicas, que serão descritas dentro do item respectivo. Neste item, assim como no item 3.7 para a soldagem por resistência, traz-se, primeiramente, uma breve descrição dos passos iniciais anteriores à soldagem: ajuste e monitoramento dos equipamentos de soldagem; e, logo em seguida, uma descrição dos procedimentos para soldagem e para ensaios dos corpos-de-prova.

3.5.1 Equipamento de Soldagem por Ultra-Som

Os experimentos de soldagem por ultra-som foram realizados em equipamento cedido pela empresa Robert Bosch, tendo sido previamente escolhido conforme necessidade de tamanho e propriedades da peça, características dos materiais, monitoramento do processo e disponibilidade de utilização. O sistema de soldagem por ultra-som utilizado foi o ULTRAWELD-20, do fabricante americano AMTECH (American Technology Inc.). A figura 3.1 traz uma imagem deste equipamento e, mais especificamente, do conjunto sonotrodo e bigorna.



(1)

(2)

Figura 3.1 – (1) Equipamento de Ultra-Som. (2) Conjunto Sonotrodo e Bigorna.

De acordo com o manual do fabricante (AMTECH, 1998), o equipamento de soldagem por ultra-som apresenta um controle preciso de todas as funções de soldagem e parâmetros através dos botões programáveis no painel de controle, ou via computador acoplado. O equipamento possui um controlador de microprocessador e um módulo de fornecimento de potência que gera uma energia ultra-sônica de alta frequência.

O equipamento de soldagem é composto por um controlador/fornecedor de potência integrada, um conjunto seqüenciado de ultra-som, ferramental de aplicação e atuador mecânico.

O atuador mecânico é o sistema que rigidamente suporta e movimenta o conjunto de: conversor, “booster” (transformador de amplitude) e sonotrodo, conhecido como conjunto seqüenciado ultra-sônico. Um cilindro pneumático dirige o atuador na aplicação de uma pressão precisa às partes a serem soldadas durante o ciclo de soldagem.

As faixas de valores do equipamento para os parâmetros principais estudados são:

- amplitude: 10 - 200 μm ;
- energia: 0 – 5.000 J;
- pressão do sonotrodo: 0,068 – 6,82 bar.

As faixas destes parâmetros utilizadas no experimento foram:

- amplitude: 50 – 66 μm ;
- energia: 400 – 1100 J;
- pressão do sonotrodo: 1,03 – 4,20 bar.

3.5.2 Ajuste do Equipamento de Soldagem por Ultra-Som

Para verificação inicial do equipamento, foram necessários os seguintes procedimentos, seguindo-se o manual e instruções do fabricante:

1. verificação do estado do sonotrodo e da bigorna, não devendo estes apresentarem nenhum sinal de trincamento, esmerilhamento ou escoriação, resultantes de desalinhamento ou contato de ferramental;
2. verificação da existência de algum resto de material ou sujeira na cavidade de soldagem;
3. verificação do ajuste dos parâmetros;
4. verificação da existência imprópria de água ou contaminantes nos filtros de ar;
5. verificação da possibilidade de movimento livre do sonotrodo.

Para se assegurar confiança nos resultados de soldagem, o equipamento foi ainda ajustado conforme abaixo:

1. seleção correta da voltagem de operação do equipamento, de acordo com tensão fornecida pela rede elétrica da indústria;
2. calibragem do espaçamento entre as superfícies das ferramentas de soldagem e as adjacentes. Se estas superfícies estivessem em contato durante a aplicação de energia vibratória, poderiam causar danos no ferramental e no sistema de fornecimento de potência;
3. calibragem da amplitude de vibração;

4. medição da força aplicada;
5. verificação do paralelismo entre o sonotrodo e a bigorna;
6. verificação do torque de aperto do ferramental, para assegurar transmissão eficiente de vibração. A transmissão de energia vibratória entre as partes do conjunto requis uma interface bastante justa e limpa.

Além da necessidade de se seguir os ajustes do equipamento indicados pelo fabricante, testes iniciais foram realizados com os parâmetros, para se estabelecer as melhores faixas (faixas mais abertas, inicialmente) para se soldar junções específicas de cada tipo de material. Os principais ajustes paramétricos realizados foram: ajuste da força do sonotrodo, da potência e do tempo de soldagem.

Feitos estes ajustes, a combinação correta dos seguintes parâmetros foi conseguida, de modo a gerar soldas de boa qualidade: energia (Joules), pressão inicial de gatilho (bar – pressão 1), pressão de soldagem durante a aplicação de vibrações sônicas (bar – pressão 2), amplitude (microns).

Existiu também a necessidade de se monitorar outras variáveis do processo, que influenciaram a qualidade da solda. O controlador do sistema era capaz de monitorar 4 variáveis de soldagem durante cada ciclo: tempo de solda (segundos), pico de potência de soldagem (Watts), pré-altura das peças (milímetros), altura final das peças (milímetros). Cada uma destas variáveis pôde ser fixada em limites superior e inferior. Caso ocorresse alguma violação de um destes limites, o equipamento geraria um alarme. Estes limites eram conhecidos como janelas da qualidade, dentro das quais as soldas realizadas apresentavam-se com boa qualidade.

Os limites destas variáveis foram estipulados através de conhecimentos técnicos do usuário. Para a produção industrial, é possível, com a determinação estatística dos parâmetros através de maior quantidade de soldas, a geração dos limites inferior e superior para cada um destes parâmetros. Os dados de entrada e de saída destes podem ser adquiridos via porta RS232.

O modo de soldagem escolhido foi o de energia, no qual, ao se atingir o limite máximo de tempo, a energia ultra-sônica era cortada. Os outros modos disponíveis no equipamento, altura e tempo, não eram determinantes. Pelo modo de energia, o controlador do equipamento garantiu, portanto, que a quantidade certa de energia fosse transferida para as peças, otimizando a junção. Ao se realizar uma solda no modo de energia do equipamento, as diferenças das propriedades físicas das peças não afetam a qualidade das junções, assim como o desgaste da ferramenta de ultra-som.

Devido à necessidade de se garantir uma repetibilidade de resultados do equipamento, já que este encontrava-se em fase de testes na empresa e estava recém instalado, anteriormente à soldagem das junções deste trabalho, a empresa mediu os índices de capacidade C_{gm} e C_{gmk} (demonstrativos internos da empresa) do equipamento, encontrando-se valores acima do mínimo exigido.

3.5.3 Monitoramento dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Ultra-Som

Todos os parâmetros de soldagem foram monitorados através do sistema de aquisição de dados do equipamento (programa IA), um programa fornecido pelo fabricante, gerando os seguintes dados:

- parâmetros de entrada;
- parâmetros reais durante a solda (tempo de soldagem, pressão do sonotrodo, energia, amplitude, altura das peças, pré-altura das peças, pressão inicial e potência do processo);
- gráfico de potência em função do tempo.

3.5.4 Soldagem por Ultra-Som de Alumínio/Alumínio

Após os ajustes do equipamento de soldagem, foi iniciada a otimização dos parâmetros para soldagem de alumínio/alumínio, da seguinte maneira:

1. os valores de energia e de pressão de soldagem (pressão 2) para os testes iniciais foram fixados nos valores mínimos possíveis indicados pelo fabricante: 150 J para a energia e 1,03

- bar para a pressão do ar; o valor de amplitude foi fixado inicialmente em 50 μm , também segundo informações do fabricante;
2. as peças foram seguramente fixadas para soldagem, em suporte construído na empresa (este suporte foi projetado de modo a garantir o posicionamento regular horizontal das peças com relação ao equipamento de soldagem);
 3. iniciou-se o ciclo de soldagem;
 4. os valores de energia, amplitude e pressão de ar foram sendo aumentados conforme necessário, para se atingir a soldagem;
 5. tendo-se conseguido soldar, imediatamente após cada ciclo, a junção era inspecionada visualmente, até que se atingisse um padrão visual aceitável;
 6. após se atingir soldas visualmente aceitáveis, passou-se à realização de testes de arrancamento destas com um alicate (manualmente), até se encontrar soldas com maior dificuldade para arrancamento;
 7. os parâmetros foram sendo variados dentro das faixas encontradas no item 4, para se fixar os níveis de acordo com o planejamento experimental escolhido;
 8. realizou-se, assim, as soldas conforme o planejamento experimental fatorial para cada junção;
 9. as peças soldadas foram levadas ao laboratório para ensaios de resistência elétrica, cisalhamento e arrancamento;
 10. com os valores numéricos de resistência ao cisalhamento das junções ensaiadas, foi realizada a alimentação de dados do programa de análise estatística utilizado (SAS), o qual gerou graficamente uma direção ótima dentro do espaço possível de níveis utilizados, de acordo com a teoria desta análise descrita no capítulo 2;
 11. foram sendo realizadas novas soldas, novos ensaios de cisalhamento e novas realimentações do programa SAS de MSR, até se encontrar o ponto ou a região ótima de níveis de parâmetros;
 12. as amostras mais e menos resistentes ao cisalhamento e ao arrancamento foram levadas à análise metalográfica.

Para a soldagem por ultra-som, não foi necessária nenhuma preparação ou limpeza da superfície das peças, como citado no capítulo 2, pois o próprio movimento do sonotrodo “quebrou” qualquer tipo de camada superficial, segundo a teoria apresentada no capítulo 2. As

peças estavam, no entanto, livres de substâncias oleosas. Desta forma, foram imediatamente colocadas para soldagem, após marcação de número de amostra.

Durante a experimentação da soldagem desta junção, para se chegar nos níveis ideais dos parâmetros, encontrou-se alguns problemas, como:

- falta de solda em junções, com facilidade de arrancamento, devido a baixos valores de amplitude e energia;
- amassamento demasiado da peça de alumínio superior, por ser um metal bastante dúctil. Isso se deu devido a uma combinação de altas pressão e amplitude;
- adesão do alumínio no sonotrodo, devido à falta de limpeza deste no decorrer do experimental. Além da limpeza, aumentou-se, no equipamento, o tempo entre o final da passagem de energia e a abertura do sonotrodo.

Os parâmetros escolhidos para soldagem de alumínio/alumínio, para o planejamento fatorial inicial são mostrados na tabela 3.12:

Tabela 3.12 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.

	Amplitude (μm)	Pressão (bar)	Energia (J)
Nível 1	55	1,72	400
Nível 2	66	2,07	450

Os outros parâmetros escolhidos para soldagem, via realização de testes e instruções do fabricante, foram:

- janela de potência: 0 – 3600 J;
- janela de pré-altura: 0,50 – 14,99 mm;
- janela de altura: 0,00 – 14,99 mm;
- tempo entre o acionamento do pedal e a geração de energia ultra-sônica: 0,50 s;
- tempo entre o término da geração de energia e a abertura do sonotrodo: 0,10 s;
- janela de tempo: 0,25 – 1,5 s;
- pressão 1: 1,72 bar.

3.5.5 Soldagem por Ultra-Som de Cobre/Cobre

A soldagem de cobre/cobre por ultra-som foi a mais fácil de ser realizada dentre as junções, pois alguns dos problemas apresentados nas outras soldagens não apareceram neste caso, como a deformação do material, a dificuldade de parametrização para se encontrar junções visualmente aceitáveis, a fraca resistência mecânica (arrancamento e cisalhamento) das junções e a adesão do metal no sonotrodo. Um problema encontrado foi a dificuldade de manuseamento das peças após a soldagem, devido ao grande calor atingido, assim como uma pequena geração de gás.

Para esta soldagem, algumas modificações em relação às outras junções foram feitas:

- os valores de energia, pressão de soldagem (pressão 2) e amplitude iniciais foram fixados em: 500 J, 2,00 bar e 60 μm , baseadas nas faixas de valores encontradas para a soldagem alumínio/cobre;
- pôde-se encontrar uma ampla faixa de níveis dos parâmetros, dentro dos quais os resultados dos ensaios de cisalhamento e arrancamento eram bastante satisfatórios e com pouca variação entre si.

Os parâmetros escolhidos para soldagem de cobre/cobre, para o planejamento fatorial inicial são mostrados na tabela 3.13:

Tabela 3.13 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.

	Amplitude (μm)	Pressão (bar)	Energia (J)
Nível 1	60	4,13	1000
Nível 2	65	4,48	1050

Os outros parâmetros escolhidos para soldagem, via realização de testes e instruções do fabricante, foram semelhantes aos das soldagens anteriores, com exceção da pressão 1, que foi fixada em 3,44 bar.

3.5.6 Soldagem por Ultra-Som de Alumínio/Cobre

Basicamente, seguiu-se as mesmas etapas da soldagem alumínio/alumínio descritas no item anterior, com algumas variações:

- os valores de energia e de pressão de soldagem (pressão 2) para os testes iniciais foram fixados nos valores de 200 J e 1,03 bar, respectivamente. O valor de amplitude foi fixado inicialmente em 55 μm . Alguns dos parâmetros tiveram um aumento em relação à soldagem da junção anterior, devido à maior dureza do cobre;
- o cobre foi colocado em contato com a bigorna, pois, por ser um material mais duro, suportou melhor a pressão do sonotrodo e da peça superior, gerando junções com bom visual (ao ser colocado em contato com a bigorna, o alumínio apresentava-se bastante mais deformado do que se colocado em contato com o sonotrodo);
- os valores de energia, amplitude e pressão de ar foram sendo aumentados conforme necessário, para se atingir a soldagem de junções visual e mecanicamente aceitáveis.

Os problemas encontrados durante a soldagem desta junção, para se chegar nos níveis ideais dos parâmetros, foram:

- grande facilidade de arrancamento manual das soldas, devido à baixa adesão de um metal no outro, para soldas com baixos e médios valores de amplitude e energia;
- menor resistência ao arrancamento, quando comparada à soldagem da junção alumínio/alumínio, por serem metais dissimilares;
- adesão do alumínio no sonotrodo, a altos valores de pressão e amplitude;
- deformação excessiva do alumínio em torno do cobre, à altas pressão e amplitude, enquanto que o cobre apresentava-se intacto (durante o arrancamento, o alumínio era “rasgado”);
- grande dificuldade de se conseguir junções de maior resistência ao arrancamento, enquanto que suas resistências ao cisalhamento eram aceitáveis.

Os parâmetros escolhidos para soldagem de alumínio/cobre, para o planejamento fatorial inicial são mostrados na tabela 3.14:

Tabela 3.14 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.

	Amplitude (μm)	Pressão (bar)	Energia (J)
Nível 1	55	1,72	750
Nível 2	58	2,07	800

Os outros parâmetros escolhidos para soldagem, via realização de testes e instruções do fabricante, foram os mesmos para a soldagem alumínio/alumínio.

3.5.7 Ensaios das Amostras Soldadas por Ultra-Som

O ensaio de cisalhamento das junções soldadas por ultra-som foi monitorado pela máquina de ensaios, obtendo-se as curvas de comportamento destas no decorrer do ensaio. Algumas junções Al/Al e Cu/Cu romperam no metal base, enquanto que outras romperam no ponto de solda. Todas as junções Al/Cu romperam no ponto de solda.

Os ensaios de arrancamento das junções Al/Al e Cu/Cu foram realizados na máquina de ensaio de tração. Os ensaios para as junções Al/Cu foram realizados com a ajuda do dinamômetro, devido à menor resistência desta junção a este ensaio.

Os ensaios de resistência elétrica de todas as junções foram realizados anteriormente aos ensaios destrutivos, gerando valores praticamente iguais para cada tipo de junção.

Os resultados dos ensaios são mostrados e analisados no capítulo 4.

3.5.8 Preparação para Metalografia das Amostras Soldadas por Ultra-Som

Para comparação dos resultados, tornou-se útil a utilização de metalografia dos corpos-de-prova. Foram escolhidas para análise as condições de soldagem, para cada tipo de junção, que forneceram maiores e menores valores de resistência ao cisalhamento e ao arrancamento.

Com o objetivo de se realizar uma análise da interface das amostras, estas foram embutidas com baquelite Buhler, cortadas na secção central da interface, lixadas (lixas de 100, 600, 800 e 1200 µm de granulação), polidas (panos de 6, 3, 1 e 0,25 µm de granulação – o cobre foi também polido com pano especial de Nylon). Para a verificação da interface na microscopia óptica, algumas amostras foram atacadas com reagentes Adler (cobre) e Keller (alumínio). Entre cada lixamento e polimento com lixas e panos diferentes, as amostras foram limpas com ultra-som e detergente.

Em outras amostras, nas mesmas condições de soldagem, foi analisada metalograficamente a superfície arrancada ou cisalhada do ponto de solda. A superfície aberta, logo após o ensaio destrutivo, era protegida com micro-óleo anti-corrosivo. Em todos os casos, as regiões das amostras retiradas para análise compunham-se de micrografias representativas das junções.

Foram realizadas duas análises diferentes nos corpos-de-prova:

1ª Análise: Microscopia Eletrônica de Varredura – Análise da linha de interface das junções

Nesta análise, pôde-se verificar, nas amostras embutidas:

- existência de vazios (porosidade causada pelo processo);
- provável existência de compostos intermetálicos formados pelo processo;
- existência de outros elementos químicos, correspondentes à inclusões de impurezas ou arraste das lixas e panos de polimento;
- extensão de vazios na secção central do ponto soldado;
- existência de camadas contínuas de óxidos devido à não limpeza do material;
- comportamento da linha de interface (continuidade, linearidade, etc.).

De acordo com as imagens obtidas para estas amostras, foi possível uma comparação entre as duas condições de soldagem extremas.

2ª Análise: Microscopia Eletrônica de Varredura – Análise da porcentagem de elementos químicos na interface das amostras alumínio/cobre

Nesta análise, foi possível se estudar a quantidade (em porcentagem) de cada elemento químico existente na superfície dos pontos soldados e arrancados ou cisalhados. Verificando-se a quantidade de cada elemento químico na superfície, pôde-se chegar à correlações entre esta porcentagem e ao valor de resistência ao arrancamento e ao cisalhamento das junções.

Na tabela 3,15 abaixo, tem-se um resumo das amostras analisadas:

Tabela 3.15 – Amostras Analisadas Metalograficamente.

Junção	Amostra	Tipo de análise
Al/Al	Maior lim arrancamento	1ª
Al/Al	Menor lim arrancamento	1ª
Al/Al	Maior lim cisalhamento	1ª
Al/Al	Menor lim cisalhamento	1ª
Cu/Cu	Maior lim arrancamento	1ª
Cu/Cu	Menor lim arrancamento	1ª
Cu/Cu	Maior lim cisalhamento	1ª
Cu/Cu	Menor lim cisalhamento	1ª
Al/Cu	Maior lim arrancamento	1ª
Al/Cu	Menor lim arrancamento	1ª
Al/Cu	Maior lim cisalhamento	1ª
Al/Cu	Menor lim cisalhamento	1ª
Al/Cu	Maior lim arrancamento	2ª
Al/Cu	Menor lim arrancamento	2ª
Al/Cu	Maior lim cisalhamento	2ª
Al/Cu	Menor lim cisalhamento	2ª

Todas as amostras levadas para metalografia foram retiradas do primeiro planejamento experimental fatorial, de modo a facilitar uma visualização clara das diferenças geradas entre as diferentes condições de soldagem. Caso as amostras fossem retiradas dos planejamentos seguintes, correspondentes à pequenas variações de forças de extração, não seria facilitada a visualização destas diferenças.

3.5.9 Medições e Testes Complementares Para a Soldagem por Ultra-Som

Como complementação das informações da soldagem por ultra-som, foram ainda realizadas as seguintes medições e testes:

- medição da temperatura de soldagem dos três tipos de junção, para uma amostra de cada, com a utilização de um termômetro digital Digitron T228 e um termopar tipo K (chromel – alumel). As junções escolhidas foram as de maior resistência ao cisalhamento;
- medição de microdureza de uma junção Al/Cu, para verificação da variação de dureza ao se aproximar da interface e do valor da dureza na interface. Para a medição da dureza nos metais base e na interface, foi utilizado um micro-durômetro Wilson Tukon, modelo MO (calibrado em dez/1999), com carga de 1 g. A amostra escolhida foi a que apresentou máxima resistência ao arrancamento;
- soldagem de junções Al/Al, Al/Cu e Cu/Cu com limpeza superficial prévia (com acetona). As amostras escolhidas foram as de maior resistência ao cisalhamento. Após a soldagem, as amostras tiveram sua interface analisada no MEV. O objetivo deste teste era a verificação do resultado do limite de cisalhamento das junções e de alguma variação microscópica na interface destas em relação às amostras não limpas.

Os resultados destes itens acima são apresentados no capítulo 4.

3.6 Planejamento Experimental para a Soldagem por Resistência

Para este processo de soldagem, decidiu-se pela realização única de um planejamento experimental fatorial, independente do processo de soldagem por ultra-som. Esta escolha deveu-se ao fato de que, para a soldagem por resistência, já existem diversas tabelas publicadas contendo valores dos níveis ideais de parâmetros para cada material (apesar de se encontrar variações consideráveis de equipamento para equipamento, e de não se ter encontrado tabelas para o cobre). Por ser este um processo bastante conhecido, não considerou-se necessária a utilização do MSR para otimização de parâmetros. Além disso, notou-se, durante os experimentos de soldagem, a

existência de faixas bastante estreitas para soldagem de junções com qualidade visual e mecânica, o que tornaria o MSR praticamente redundante.

Para a realização das soldas por resistência, o procedimento experimental foi dividido em 5 fases, semelhantemente ao processo por ultra-som:

1ª Fase - Pré-testes para verificação, no sistema de soldagem, dos parâmetros principais de soldagem e dos níveis das variáveis de controle (parâmetros principais).

Neste caso, somente alguns dos parâmetros puderam ser controlados por computador (corrente de soldagem, tempo de soldagem e ângulo de fase do tiristor), através de programa computacional do fabricante, e somente para a soldagem de alumínio/alumínio. O parâmetro pressão era controlado por manômetro.

Para a soldagem de alumínio/cobre, foi utilizado um equipamento mais antigo, sem a possibilidade de monitoramento, porém, o único capaz de soldar esta junção, dentre os equipamentos disponíveis para o trabalho.

As tentativas de soldagem de cobre/cobre, em três equipamentos de soldagem disponíveis, foram negativas, devido a diversos fatores, citados no capítulo 4.

2ª Fase - Determinação da quantidade inicial de amostras do experimento de soldagem. Realização dos experimentos de soldagem, para obtenção dos corpos-de-prova.

As variáveis do processo de soldagem por resistência estudadas foram: Corrente de Soldagem (2 níveis), Pressão Aplicada nos Eletrodos (2 níveis) e Tempo de Soldagem (2 níveis).

3ª Fase - Realização dos ensaios mecânicos e do ensaio elétrico propostos.

4ª Fase – Realização de análise metalográfica.

5ª Fase - Análise dos resultados.

A quantidade inicial de amostras para cada ensaio destrutivo (para o ensaio de resistência elétrica, foram utilizadas as amostras soldadas para o ensaio de cisalhamento) e tipo de junção é dada nas tabelas 3.16 e 3.17:

1 - ensaio de cisalhamento

Tabela 3.16 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Cisalhamento.

Resistência	Al/Al	2 ³
Resistência	Al/Cu	Soldagem não validada
Resistência	Cu/Cu	Soldagem não validada
	Total de amostras	8

2 - ensaio de arrancamento

Tabela 3.17 – Planejamento Fatorial Para o Ensaio de Arrancamento.

Resistência	Al/Al	2 ³
Resistência	Al/Cu	Soldagem não validada
Resistência	Cu/Cu	Soldagem não validada
	Total de amostras	8

A escolha dos níveis para a soldagem de alumínio/alumínio se deu conforme descrição para a soldagem por ultra-som, no item 3.4. Os fatores estudados para o processo de ultra-som foram nomeados como abaixo:

- cr. corrente de soldagem;
- pr. pressão;
- tr. tempo de soldagem,

cada um com níveis cr1, cr2; pr1, pr2; tr1, tr2.

A combinação dos fatores no planejamento é idêntica à descrita para a soldagem por ultra-som, assim como a análise dos resultados encontrados com o planejamento.

Existiu a preocupação de se controlar a variação de outros fatores que poderiam interferir nos resultados, e principalmente a limpeza mecânica ou com acetona das peças a serem soldadas.

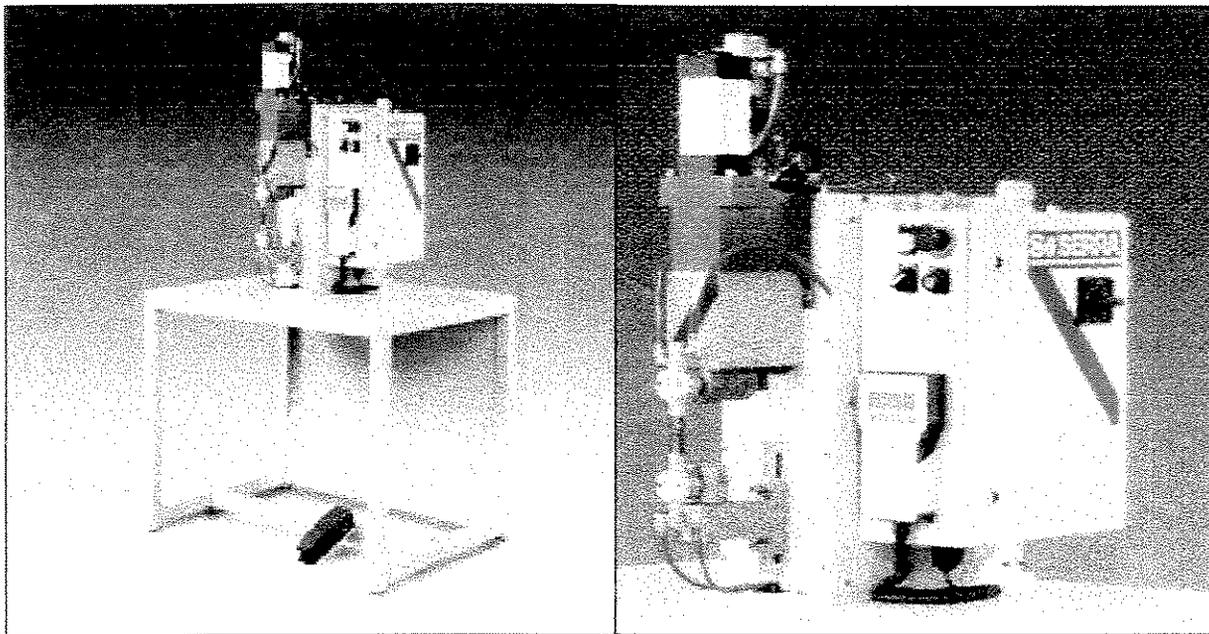
Os resultados deste planejamento serão mostrados no capítulo 4.

3.7 Descrição do Procedimento Experimental para o Processo de Resistência

Os próximos itens trazem o procedimento experimental utilizado para a realização da soldagem de alumínio/alumínio e os problemas encontrados na soldagem das outras junções. São citados os equipamentos disponíveis para a realização e as tentativas de soldas.

3.7.1 Equipamentos de Soldagem por Resistência

O equipamento de soldagem por resistência elétrica a ponto de alumínio/alumínio utilizado foi o Serra Bucher (comando 1Avwb), do fabricante espanhol SERRA SOLDADURA, de potência de 30 KVA. Uma imagem do equipamento pode ser vista na figura 3.2.



(1)

(2)

Figura 3.2 – (1), (2) Equipamento de Soldagem por Resistência.

As partes elétricas do equipamento de soldagem a ponto compõem-se de um transformador de soldagem (para voltagens baixas e altas taxas de corrente necessárias para a soldagem), uma unidade de potência (regula a voltagem aplicada ao primário do transformador por meio de um controle preciso da espera entre o zero da onda de voltagem e o instante onde os tiristores são colocados em funcionamento, fazendo com que a quantidade total de energia seja controlada pela determinação exata do tempo em que a voltagem for aplicada no transformador), e um “timer” de soldagem (controla todos os tempos envolvidos no processo de soldagem, além das variáveis principais, como potência, tempo de passagem de corrente, tempo de pressão, tempo de espera e tempos sem passagem de corrente relacionados aos eletrodos).

Neste trabalho, foi escolhido o modo de soldagem por corrente constante, ou seja, um modo de programação no qual a corrente é diretamente inserida em kA, calculando o tempo de espera para passagem de corrente necessário, medindo a corrente de soldagem atual e ajustando dinamicamente o tempo de espera para passagem de corrente ao longo do tempo de soldagem para compensar os desvios do valor desejado de corrente de soldagem. Desta forma, o desvio padrão do tempo verdadeiro da corrente de soldagem durante todo o tempo de soldagem não foi afetado por variações de magnitude envolvidas: voltagem de linha principal, resistência dos cabos secundários ou indutância magnética do circuito secundário.

A unidade de tempo utilizada no equipamento é ciclos de linha de potência, ou seja, 60 Hz correspondem a 60 ciclos, e um ciclo corresponde a 16.666 ms. O tempo de ciclos é fixo.

A potência do equipamento é variável, e decorrente da corrente fixada. Os parâmetros de potência são também importantes, principalmente na determinação do ângulo de ignição, durante os tempos de soldagem. As faixas de valores permitidas para os parâmetros de potência eram:

1) graus: 00 a 99, onde 00 equivale a um ângulo de ignição de 130 graus elétricos e 99 equivale a um ângulo de 31 graus elétricos. O ângulo de fase, numa senóide, representa a quantidade de pulsos até se atingir a corrente de soldagem estipulada, para o modo corrente contínua. A função deste ângulo de fase é diminuir a média da potência de entrada, fazendo com que ela não atinja seu máximo durante a solda.

2) **kA**: 1,0 a 15,0, correspondente ao parâmetro corrente de soldagem, com precisão de 0,1 kA.

As faixas de valores do equipamento para os outros parâmetros principais estudados eram:

- tempo de soldagem: 1 a 30 ciclos;
- pressão dos eletrodos: 0,0 a 10,0 bar.

As faixas destes parâmetros utilizadas nos experimentos foram:

- corrente de soldagem: 10 a 15 kA;
- tempo de soldagem: 3 a 8 ciclos;
- pressão dos eletrodos: 1,0 a 3,0 bar.

Para a soldagem de alumínio/cobre, utilizou-se um equipamento Soltronic manual, de potência de 50 KVA, devido à não possibilidade de soldagem desta junção em um equipamento de menor potência como o anterior.

As faixas de parâmetros utilizadas no experimento foram:

- quantidade de pulsos: 1;
- potência: 45 a 90%;
- tempo de pré-pressão: 5 a 16 ciclos;
- tempo de soldagem: 5 a 14 ciclos;
- tempo de pós-pressão: 5 a 16 ciclos;
- pressão dos eletrodos: 3,0 a 4,0 bar.

Para a soldagem cobre/cobre, as tentativas foram realizadas em três equipamentos diferentes: Serra Bucher de 30 KVA, Soltronic de 50 KVA e Serra Bucher de 100 KVA. Em nenhum destes equipamentos foi possível a união dos metais, devido a fatores descritos no item 3.7.6.

As faixas de parâmetros empregadas no experimento, utilizando-se os três equipamentos, variaram em:

- quantidade de pulsos: 1;
- potência: 40 a 90%;
- corrente de soldagem: 10 a 20 kA;
- tempo de pré-pressão: 3 a 10 ciclos;
- tempo de soldagem: 3 a 15 ciclos;
- tempo de pós-pressão: 3 a 10 ciclos;
- pressão dos eletrodos: 3,0 a 4,0 bar.

3.7.2 Ajuste dos Equipamentos de Soldagem por Resistência

Antes de iniciar as soldagens, alguns fatores foram verificados, nos equipamentos de soldagem da Serra Bucher e da Soltronic, para se garantir junções de qualidade:

- 1) verificação da potência do controle, igual à 24 Vdc externa (somente para os equipamentos da Serra Bucher);
- 2) verificação da voltagem de sincronização do equipamento (somente para os equipamentos da Serra Bucher);
- 3) checagem dos fornecedores de potência;
- 4) verificação do estado dos eletrodos;
- 5) verificação do alinhamento dos eletrodos;
- 6) verificação do funcionamento do manômetro medidor da pressão dos eletrodos;
- 7) verificação da água de resfriamento dos eletrodos;
- 8) verificação do ajuste dos parâmetros.

Após estas verificações, tentou-se encontrar uma combinação correta dos parâmetros, dentro de faixas adequadas para se soldar junções de qualidade: pressão dos eletrodos (bar), corrente de soldagem (kA), tempo de soldagem (ciclos). As faixas de valores destas variáveis foram estipuladas através de conhecimentos técnicos do usuário, e da utilização de tabelas existentes para a soldagem por resistência, para cada tipo de material.

Para os equipamentos da Serra Bucher, o controlador de soldagem calcula o ângulo de ignição para obtenção da corrente. Caso necessário, este ângulo é corrigido dinamicamente durante os tempos de soldagem. No final, o controlador compara as correntes programada e medida, gerando um código de erro no caso de falha. No caso do equipamento da Soltronic, não é possível a escolha de modos de soldagem.

3.7.3 Monitoramento dos Parâmetros do Processo de Soldagem por Resistência

Os parâmetros de soldagem possíveis de monitoramento através do sistema de aquisição de dados do equipamento da Serra Bucher (SERRATRON 1Avwb), programa fornecido pelo fabricante, são: corrente de soldagem (kA) e grau de ignição do tiristor (graus). O parâmetro tempo (em ciclos) não pode ser monitorado, e é o parâmetro que serve como base para o funcionamento do equipamento, ou seja, a cada tempo programado (e, portanto, real), a corrente pode ou não atingir o valor desejado (e por isto, ela é monitorada). A pressão dos eletrodos foi obtida através do manômetro instalado.

Do sistema de aquisição de dados de soldagem, pôde-se obter as seguintes informações:

- parâmetros de entrada;
- parâmetros reais durante a solda de corrente de soldagem e grau do tiristor.

No equipamento de soldagem da Soltronic, não é possível nenhum tipo de monitoramento, e por isso, este foi utilizado somente quando os equipamentos da Serra Bucher não eram capazes de soldar as junções, devido à capacidade de potência (equipamento de 30 KVA de baixa potência para soldagem de cobre) ou ao excesso de pressão (equipamento de 100 KVA de alta pressão, fazendo com que as peças saíssem danificadas).

3.7.4 Soldagem por Resistência de Alumínio/Alumínio

A soldagem de alumínio/alumínio foi iniciada no equipamento da Serra Bucher de 100 KVA. Após vários testes com diminuição da velocidade de descida do pistão do cilindro pneumático, concluiu-se que o equipamento estava danificando demasiadamente as peças de alumínio, apesar do mínimo valor de pressão fixado (com a diminuição da pressão no nível mínimo do manômetro, a passagem da corrente se inicia sem que os eletrodos estejam pressionando a peça, causando estouros devido a curto-circuitos). Conseguiu-se algumas soldas com boa resistência mecânica, mas apresentando alta porcentagem de diminuição de espessura, o que, em um ensaio de tração, “rasgava” as peças no metal base. Os valores limites de cisalhamento encontrados eram praticamente 50% dos valores para o ultra-som da mesma junção.

Desta forma, passou-se a utilizar o equipamento do mesmo fabricante, de menor potência (30 KVA), e com a possibilidade de que a corrente atingida por este equipamento não fosse suficiente.

Após os ajustes deste equipamento, foi iniciada a otimização dos parâmetros, da seguinte maneira:

1. os valores iniciais de potência (corrente de soldagem), pressão dos eletrodos e tempo de soldagem foram fixados nos valores mínimos possíveis indicados pelo fabricante: 5 kA, 1,00 bar e 2 ciclos, respectivamente;
2. as peças foram limpas com acetona, para se evitar qualquer tipo de óleo ou camada superficial de sujeira, que poderiam prejudicar o processo (não foi realizada limpeza mecânica neste caso, pois as mesmas soldas realizadas sem esta limpeza apresentaram soldabilidade, enquanto que as limpas mecanicamente não se uniam);
3. as peças foram colocadas sobre o eletrodo inferior, horizontalmente, sem qualquer tipo de suporte, o qual poderia “roubar” uma pequena parte da corrente de soldagem;
4. iniciou-se o ciclo de soldagem;

5. imediatamente após cada ciclo, a junção era inspecionada visualmente, até que se atingisse um padrão visual aceitável. Os valores de corrente, pressão e tempo foram sendo aumentados conforme necessário, para se atingir uma união mais forte das partes;
6. após se atingir soldas visualmente aceitáveis, passou-se, como no processo de ultra-som, à realização de testes de arrancamento destas com um alicate, até se encontrar soldas com maior dificuldade para arrancamento;
7. os parâmetros foram sendo variados dentro das faixas encontradas no item 5, para se fixar os níveis de acordo com o planejamento experimental escolhido;
8. realizou-se, assim, as soldas conforme o planejamento experimental fatorial para cada junção numerada;
9. as peças soldadas foram levadas ao laboratório para ensaios de resistência elétrica, cisalhamento e arrancamento;
10. as amostras mais e menos resistentes ao cisalhamento e ao arrancamento foram levadas à análise metalográfica.

Alguns problemas foram detectados durante os pré-testes para se encontrar os níveis dos parâmetros, e em seguida, foram adotadas medidas:

- solda fraca: aumento da corrente, aumento do tempo (o tempo não pode ser demasiadamente aumentado, pois assim, a corrente não se concentra para formar um ponto), aumento da força dos eletrodos, verificação da adequação do resfriamento, verificação da existência de sujeira entre as peças e entre as peças e os eletrodos;
- expulsão de material: diminuição da corrente, diminuição do tempo de soldagem, aumento da força dos eletrodos, verificação da existência de sujeira;
- marcas profundas no material: diminuição da corrente, diminuição do tempo de soldagem, diminuição da força dos eletrodos, verificação da adequação do resfriamento e da existência de sujeira;
- má distribuição da corrente dos eletrodos: diminuição do diâmetro, usinagem de raio suave;
- adesão de alumínio nos eletrodos: limpeza dos eletrodos a cada solda.

Os parâmetros escolhidos para soldagem de alumínio/alumínio, para o planejamento fatorial inicial são mostrados na tabela 3.18:

Tabela 3.18 – Níveis dos Parâmetros para Planejamento Fatorial.

	Corrente (kA)	Pressão (bar)	Tempo (ciclos)
Nível 1	12,0	1,5	4
Nível 2	13,0	2,0	5

Os outros parâmetros escolhidos para soldagem, através da realização de testes e instruções do fabricante, foram:

- número de pulsos: 1;
- tempo de aproximação: 15;
- tempo de aperto: 15;
- tempo de resfriamento: 10;
- tempo de subida dos eletrodos: 10;
- pressão 1: 1,72 bar;
- diâmetro da face dos eletrodos: 3,5 mm.

3.7.5 Soldagem por Resistência de Cobre/Cobre

A soldagem de cobre/cobre foi a mais complicada, desde que este material puro era extremamente condutivo, não aceitando uma concentração suficiente de energia na interface entre as peças. As tentativas foram iniciadas no equipamento da Serra Bucher de 100 KVA. Como das outras vezes, este equipamento, mesmo com a menor pressão possível ajustada, danificou as peças.

Tentou-se, a seguir, a utilização do equipamento do mesmo fabricante, de potência de 30 KVA, mas neste caso, a corrente fornecida foi extremamente baixa para soldagem. Como última tentativa, empregou-se o equipamento da Soltronic, onde nenhuma união foi conseguida.

Os procedimentos de soldagem dos pré-testes tiveram algumas características particulares:

1. abrasão mecânica das peças, com a qual se verificou melhor soldabilidade;
2. ampla faixa de combinações dos parâmetros;
3. os valores iniciais de potência, pressão dos eletrodos e tempo de soldagem foram fixados em: 45 kVA, 3,0 bar e 2 ciclos, respectivamente;
4. imediatamente após cada ciclo, a junção era inspecionada visualmente, e em nenhuma delas foi formado um ponto fundido.

Alguns problemas foram detectados durante os pré-testes para se encontrar os níveis dos parâmetros, e em seguida, foram adotadas medidas:

- solda fraca: aumento da corrente, aumento do tempo, aumento da força dos eletrodos;
- expulsão de material pelas laterais: diminuição da corrente, diminuição do tempo de soldagem;
- peças queimadas: diminuição da corrente de soldagem;
- adesão do cobre no eletrodo superior de tungstênio, arrancando parte deste material: diminuição da corrente de soldagem;
- fuga de corrente para a lateral das peças, formando uma pequena fusão nesta localidade: diminuição do diâmetro do eletrodo superior.

As faixas dos níveis dos parâmetros combinadas foram:

- número de pulsos: 1;
- potência de soldagem: 22,5 a 45,0 kVA;
- tempo de pré-pressão: 5 a 16 ciclos;
- tempo de pós-pressão: 5 a 16 ciclos;
- tempo de soldagem: 2 a 14 ciclos;
- pressão: 3,0 a 3,5 bar;
- diâmetro da face do eletrodo superior: 3,0 a 4,0 mm, e eletrodo arredondado (raio de 75 mm); diâmetro da face do eletrodo inferior: 3,0 a 4,0 mm, e eletrodo plano.

3.7.6 Soldagem por Resistência de Alumínio/Cobre

Tentou-se obter a soldagem de alumínio/cobre em ambos os equipamentos da Serra Bucher. O equipamento 100 KVA apresentou os mesmos problemas da soldagem de alumínio/alumínio. Já o equipamento de 30 KVA mostrou-se insuficiente para a soldagem do material cobre.

A alternativa foi a soldagem no equipamento da Soltronic, onde os ajustes dos parâmetros eram feitos por meio de botões. Este equipamento conseguiu soldar as junções, pois foi capaz de fornecer maior potência (corrente de soldagem), sem danificar as peças.

Após os ajustes deste equipamento, foram iniciados os pré-testes, da seguinte maneira:

1. os valores iniciais de potência de soldagem, pressão dos eletrodos e tempo de soldagem foram fixados nos seguintes valores iniciais: 50 kVA, 3,00 bar e 3 ciclos, respectivamente;
2. as peças foram limpas com lixa e acetona (notou-se, para esta solda, que, para a obtenção de junções mais resistentes, e para diminuição da variação dos resultados do ensaio de cisalhamento, tornou-se necessária uma abrasão mecânica, produzindo superfícies uniformes sem óxidos);
3. os valores iniciais dos parâmetros foram sendo aumentados, até se atingir soldas visualmente e mecanicamente aceitáveis.

Alguns problemas com relação à soldagem de metais dissimilares foram detectados durante os pré-testes, e em seguida, foram sendo adotadas medidas para se tentar solucioná-los:

- pouca aderência dos metais: troca dos eletrodos (eletrodo plano em contato com o alumínio e eletrodo de menor raio em contato com o cobre), para gerar melhor equilíbrio térmico na interface;
- expulsão do alumínio: diminuição da potência de soldagem;
- adesão do cobre no eletrodo superior de tungstênio: suavização do raio do eletrodo.

Ainda que estes cuidados foram observados, obteve-se junções de baixa resistência mecânica (valores de aproximadamente 50% dos encontrados com a soldagem por ultra-som), tanto no arrancamento, como no cisalhamento (melhor do que para o arrancamento), apesar da boa aparência destas. Devido a esta dificuldade de soldagem a ponto de metais dissimilares e, conseqüentemente, a estes resultados insuficientes encontrados, logo de início concluiu-se que as junções soldadas por ultra-som apresentariam maior confiabilidade. Assim, não se considerou necessário um planejamento experimental para esta junção a ponto.

Os parâmetros conseguidos para soldagem de alumínio/cobre foram:

- número de pulsos: 1;
- potência de soldagem: 37,5 kVA;
- corrente aproximada de soldagem: 7,5 kA;
- tempo de pré-pressão: 6 ciclos;
- tempo de pós-pressão: 6 ciclos;
- tempo de soldagem: 5 ciclos;
- raio do eletrodo superior (arredondado): 75,0 mm;
- eletrodo inferior: plano;
- pressão de soldagem: 3,00 bar.

3.7.7 Ensaio das Amostras Soldadas por Resistência

O ensaio de cisalhamento das junções alumínio/alumínio soldadas por resistência mostrou alguns rompimentos no metal base e outros no ponto de solda. As junções alumínio/cobre romperam somente no ponto de solda.

Os ensaios de arrancamento das junções alumínio/alumínio foram realizados na máquina de ensaio de tração, gerando amostras abertas para medição do diâmetro do ponto de solda. Os ensaios de resistência elétrica foram realizados anteriormente aos ensaios destrutivos. Os resultados dos ensaios são mostrados e analisados no capítulo 4.

3.7.8 Preparação para Metalografia das Amostras Soldadas por Resistência

Para complementação da análise dos resultados, foi utilizada a metalografia dos corpos-de-prova de alumínio/alumínio. Foram escolhidas para análise as condições de soldagem que forneceram maiores e menores valores de resistência ao cisalhamento e ao arrancamento.

As amostras não destruídas foram preparadas da seguinte maneira: embutimento e lixamento até a lixa de granulometria 1200. Foram cortadas numa seção anterior à central, para que pudessem ser lixadas, passo a passo, até se localizar exatamente a área central do ponto fundido. Para esta metalografia, utilizou-se uma mistura de substâncias como reagente: HCl, HNO₃ e HF. As outras amostras, já ensaiadas destrutivamente, nas mesmas condições de soldagem, foram também analisadas microscopicamente.

Foram realizadas duas análises diferentes nos corpos-de-prova:

1ª Análise: Microscopia Óptica – Medição da penetração da solda

Nesta análise, pôde-se medir, nas amostras embutidas, a penetração do ponto de solda nas duas partes do metal base, e comparar este dado entre cada condição de soldagem das junções.

2ª Análise: Microscopia Óptica – Medição do diâmetro médio do ponto

Nesta análise, para as amostras abertas, foi possível se medir o diâmetro médio dos pontos soldados, e correlacioná-los com cada condição de soldagem.

Para ilustração da região soldada do ponto (grãos alongados), reagiu-se uma amostra com uma mistura do reagente Poulton's e HNO₃ e ácido crômico, após polimento com pano de 1,0 µm. Outras imagens, de junções cobre/cobre que não obtiveram soldabilidade, são também mostradas no capítulo de resultados.

Na tabela 3.19, tem-se um resumo das amostras alumínio/alumínio analisadas:

Tabela 3.19 – Amostras Analisadas Metalograficamente.

Junção	Amostra	Tipo de análise
Al/Al	Maior lim arrancamento	1ª
Al/Al	Menor lim arrancamento	1ª
Al/Al	Maior lim cisalhamento	1ª e 2ª
Al/Al	Menor lim cisalhamento	1ª e 2ª

Capítulo 4

Resultados e Discussões

São apresentados, neste capítulo, os resultados obtidos dos procedimentos de otimização dos parâmetros, assim como os melhores valores das propriedades mecânicas de cisalhamento e de arrancamento e da propriedade de resistência elétrica das junções de alumínio/alumínio, alumínio/cobre e cobre/cobre, soldadas através dos processos de ultra-som e de resistência a ponto. Ainda no final do capítulo, os resultados obtidos são comparados entre os dois processos.

4.1 Soldagem por Ultra-Som

A soldagem por ultra-som das junções foi analisada segundo os seguintes parâmetros, escolhidos por serem os mais representativos do processo: amplitude do sonotrodo, pressão do sonotrodo e energia de soldagem. Para que se pudesse obter as melhores junções soldadas, foi realizada uma otimização da combinação destes parâmetros, através de um planejamento fatorial inicial, seguido por um método de otimização de processos, alimentando-se um programa estatístico, por etapas, com valores da variável de resposta escolhida para estudo. Este método, conhecido como MSR (Método da Superfície de Resposta), gerou uma faixa estreita de variação para cada parâmetro do processo, dentro da qual as junções soldadas apresentaram-se com maior resistência ao cisalhamento (variável de resposta do processo, neste trabalho) e aceitáveis visualmente, isto é, apresentando deformação de espessura menor que 10%, que é a porcentagem aceita como deformação máxima das junções para o ultra-som (KAISER, 1978).

A parte de cálculos estatísticos gerada pelo programa de análise de MSR, o SAS, está descrita no anexo I. A partir do planejamento fatorial completo inicial, encontram-se, neste anexo, as etapas de soldagem para cada junção até o encontro da região otimizada. A grande vantagem de utilização deste método de otimização é que, além de se obter, como resultado final, um ponto ou uma região ideal para soldagem, o usuário pode se utilizar de bom senso experimental e teórico, já que o seguimento ou não de algumas das etapas é escolhido por ele, gerando economia de material e tempo, e fazendo com que algumas otimizações de soldagem de junções apresentem maior quantidade de etapas do que outras, como também diferentes quantidades de pontos a serem soldados.

Cada etapa do MSR teve o objetivo de gerar novas combinações de parâmetros de soldagem na direção de aumento do valor da variável de resposta, no caso, a resistência ao cisalhamento. Algumas vezes, esta direção de aumento da variável de resposta gerava junções deformadas e, portanto, não aceitáveis visualmente. Este fato impediu que, a cada etapa seguinte, se seguisse nesta direção possível de aumento, e sendo assim, o valor da resposta foi mantido em um patamar mais baixo, gerando, porém, amostras aceitas industrialmente.

Após a otimização da região ideal de soldagem, através da resposta resistência ao cisalhamento, foram também estudadas e comparadas as propriedades de resistência ao arrancamento e a propriedade de resistência elétrica das junções. Estas propriedades foram medidas a partir das amostras retiradas do primeiro planejamento fatorial. Como contribuição para explicação dos resultados encontrados para cada combinação de parâmetros, foram realizadas micrografias das amostras de maior e menor resistência mecânica. Nos itens abaixo, seguem os resultados e discussões para cada junção soldada por este processo: as faixas escolhidas de otimização dos parâmetros e os resultados dos ensaios das junções.

4.2 Soldagem da Junção Alumínio/Alumínio

Iniciando-se a otimização dos parâmetros amplitude, pressão e energia do processo, para a junção alumínio/alumínio, foi primeiramente realizado o planejamento experimental fatorial

completo. Neste planejamento, foram empregadas duas réplicas para o ensaio de cisalhamento, pois este apresentava alta variabilidade inicial de resultados. Os resultados obtidos de resistência ao cisalhamento, resistência ao arrancamento e resistência elétrica, após os ensaios, são apresentados na tabela 4.1, para as diferentes combinações de amplitude, pressão e energia, geradas pelo planejamento fatorial. Os níveis escolhidos para cada parâmetro foram encontrados de acordo com a realização de pré-testes, descrita no capítulo 3. Os resultados dispostos nesta tabela, para cada propriedade das junções, serão discutidos nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, após o término, neste item, do procedimento de otimização dos parâmetros para a resposta cisalhamento.

1) 1ª Solda

Tabela 4.1 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Al/Al		μm	Bar	J	N	N	mΩ
amostra	parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento	arrancamento	resistência elétrica
1.1	a1p1e1	55	1,72	400	762,4	85,3	0,19
1.2	a1p1e1	55	1,72	400	743,1		
2.1	a1p2e1	55	2,07	400	822,7	65,2	0,19
2.2	a1p2e1	55	2,07	400	707,6		
3.1	a1p1e2	55	1,72	450	800,8	65,1	0,19
3.2	a1p1e2	55	1,72	450	765,7		
4.1	a1p2e2	55	2,07	450	909,1	86,3	0,19
4.2	a1p2e2	55	2,07	450	914,3		
5.1	a2p1e1	66	1,72	400	849,5	87,8	0,19
5.2	a2p1e1	66	1,72	400	898,8		
6.1	a2p2e1	66	2,07	400	858,5	132,5	0,19
6.2	a2p2e1	66	2,07	400	792,7		
7.1	a2p1e2	66	1,72	450	867,5	84,6	0,19
7.2	a2p1e2	66	1,72	450	896,2		
8.1	a2p2e2	66	2,07	450	916,2	133,8	0,19
8.2	a2p2e2	66	2,07	450	916,5		

Baseando-se nos resultados encontrados de resistência ao cisalhamento na tabela 4.1, alimentou-se o programa estatístico SAS para análise através do MSR. As primeiras informações fornecidas pelo programa foram os valores de influência das variáveis de entrada e de suas interações. Encontrou-se que os parâmetros do processo (variáveis de entrada) que mais influenciaram a soldagem foram a pressão e a energia, seguidos pela interação entre elas.

Foram estes parâmetros, portanto, utilizados para a continuação do procedimento de otimização pelo programa. O parâmetro amplitude foi mantido constante, e fixado no nível mais alto, de 66 μm , pois foi neste nível que se conseguiu maiores resistências. Os novos pontos a serem soldados gerados pelo programa foram, então, baseados nestas novas informações: maior influência da pressão e energia, e amplitude constante no nível alto.

Os novos pontos foram soldados, e seus resultados alimentaram o programa estatístico, e assim sucessivamente para as etapas seguintes, até se encontrar a região otimizada, que pode ser vista na figura 4.1. O gráfico mostrado nesta figura representa a superfície de resposta final do processo de soldagem desta junção. Nos eixos horizontais, foram colocados os parâmetros de maior influência encontrados: pressão e energia, nas mesmas unidades utilizadas na tabela 4.1, bar e Joules, respectivamente. O eixo vertical representa a variável de resposta, a resistência ao cisalhamento, em Newtons. A escala numérica na lateral direita do gráfico traz os valores de cisalhamento encontrados durante o experimento, e que contribuíram para a otimização do processo. Os valores nesta escala estão também em Newtons. Os níveis coloridos no gráfico representam a variação da resistência ao cisalhamento em função dos parâmetros influentes, pressão e energia.

Analisando-se esta figura 4.1, verifica-se a existência de uma região de sela (ponto de sela), mostrada pela cor amarela. Esta região indica um patamar entre as direções crescente e decrescente de cisalhamento. A partir deste patamar, pode-se dizer: seguindo-se os tons laranja e vermelho, encontra-se a direção de aumento da resistência ao cisalhamento; seguindo-se os tons verdes, encontra-se a direção de decrescimento desta propriedade.

O objetivo da construção deste gráfico foi a localização da região ou ponto ótimo do processo, o qual indicasse a maior resistência possível de cisalhamento das junções. Portanto, a informação a ser retirada deste gráfico é que as junções mais resistentes encontram-se no nível de cisalhamento de 960 N, representada graficamente pelo tom vermelho mais escuro. Esta seria, conseqüentemente, a melhor região do gráfico para se soldar as junções alumínio/alumínio, com as combinações de: altos níveis de pressão e energia e alto nível de energia e baixo nível de pressão.

O problema encontrado nas junções soldadas com estas combinações de parâmetros foi uma deformação de espessura acima de 10% nas peças, tornando-as inaceitáveis no quesito qualidade (KAISER, 1978). A utilização da combinação de alta energia e alta pressão na soldagem deformou excessivamente as peças pois foram introduzidas cargas cíclicas longas na junção, provavelmente devido ao longo tempo necessário para se atingir a alta energia. As cargas cíclicas, segundo literatura consultada, causaram má qualidade visual das soldas (AMTECH, 2000). A alta pressão provocou grande deformação devido à alta ductilidade do material. A combinação de alta energia e baixa pressão também deformou as peças, já que estas não puderam ser fixadas suficientemente pela pressão do sonotrodo, podendo se movimentar para fora da região de soldagem (eixo sonotrodo/bigorna), ao serem pressionadas. Assim, além de não se conseguir gerar pontos soldados corretamente localizados, as deformações acima de 10% eram causadas nas bordas destes, devido à pressão do sonotrodo estar atuando próxima à regiões de maior facilidade de escoamento de material.

Desta forma, não se podendo soldar com estas combinações de parâmetros, estabeleceu-se a região ideal como sendo a região de sela, ou seja, onde a combinação de parâmetros gerou amostras com deformação aceitável, e com a maior resistência ao cisalhamento possível. Estipulada esta região, o programa gerou mais pontos para confirmação de resultados, que são mostrados no anexo I. Estes pontos, após ensaiados, mostraram resistência ao cisalhamento dentro da mesma faixa já encontrada na região de sela do gráfico da figura 4.1. Pôde-se, com isto, construir a tabela 4.2, que mostra as faixas otimizadas dos parâmetros.

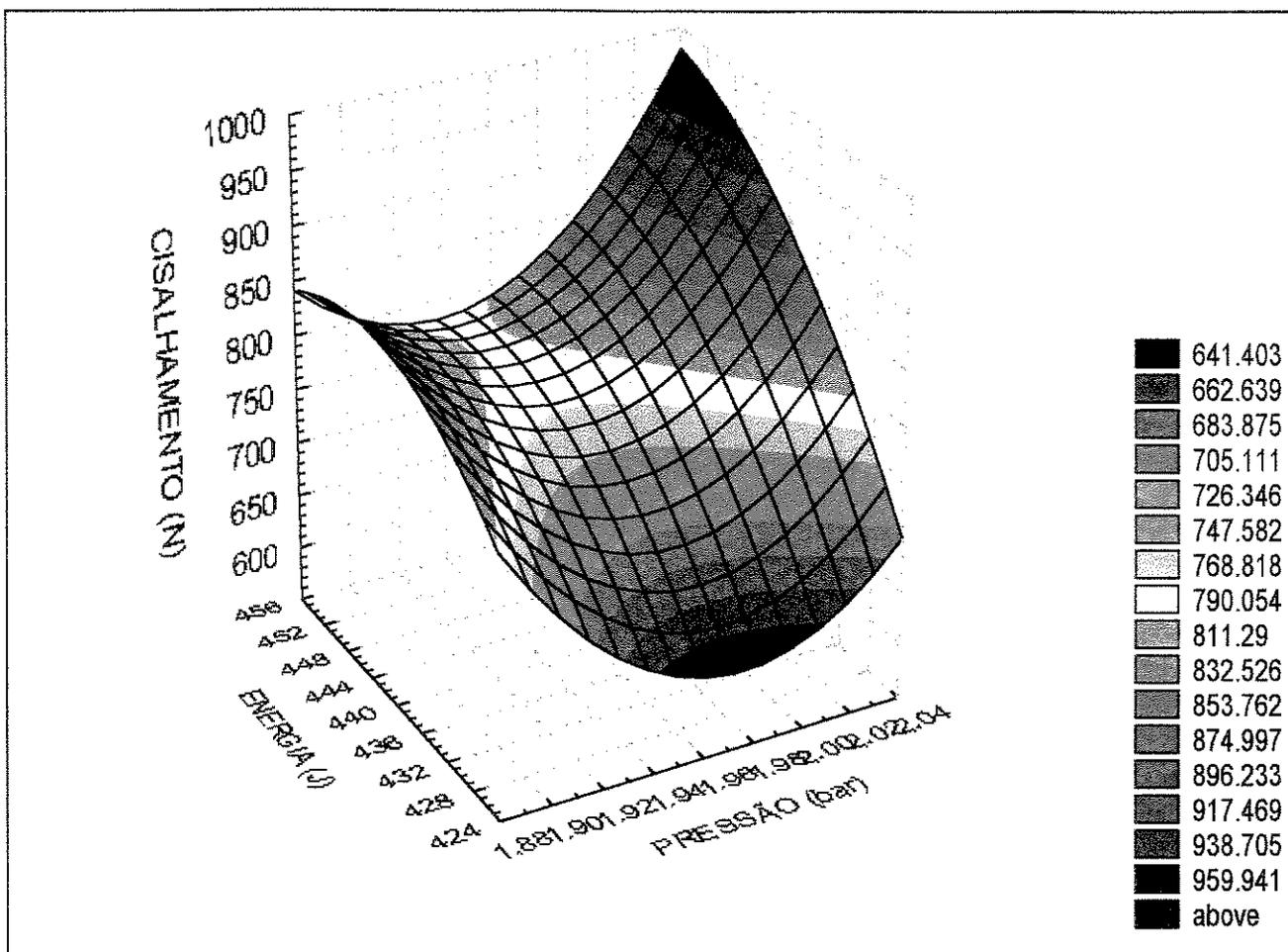


Figura 4.1 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Alumínio.

Tabela 4.2 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Al/Al	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
Faixa ótima	66	1,85 - 2,10	445 - 455	775,0 – 845,0

4.2.1 Resultados do Ensaio de Cisalhamento

Os resultados de resistência ao cisalhamento da junção alumínio/alumínio, para o primeiro planejamento fatorial são mostrados na tabela 4.1, enquanto que os valores obtidos com os parâmetros otimizados são mostrados na tabela 4.2. Para aceitação dos valores da tabela 4.2,

tomou-se como base o valor mínimo de resistência mecânica necessário na direção deste esforço, estipulado pela engenharia da empresa, de 100 N. Baseando-se nesta especificação, com os resultados mostrados na tabela 4.2 para o cisalhamento, podem ser considerados altos e suficientes os valores obtidos na soldagem. Os resultados apresentaram uma variação de 29,5% entre a menor e a maior resistência encontrada. De qualquer forma, esta variação não influenciou a utilização da junção quanto à especificação mínima de cisalhamento.

As amostras soldadas com as combinações de parâmetros do planejamento fatorial inicial, da tabela 4.1, não apresentaram ruptura no ponto de solda, mas somente no metal base ou um rasgamento no ponto soldado. Ainda assim, os valores encontrados para cisalhamento estão 250% abaixo do valor da resistência ao cisalhamento do alumínio puro 1100-O, para a espessura de 1,8 mm, que é de aproximadamente 2800 N (calculado para a área de soldagem da junção, de 49,0 mm²), tabelado por KAISER (1978). Para estas junções soldadas, a deformação de espessura foi de aproximadamente 5%, valor considerado aceitável para a qualidade da junção. Estes resultados de rompimento no metal base e de rasgamento estão de acordo com a teoria exposta por KAISER (1978).

No trabalho experimental realizado por TSUJINO (1993), através do processo de soldagem por ultra-som de extremidades, suas junções de chapas de alumínio de 6 mm de espessura alcançaram valores de resistência ao cisalhamento também inferiores à resistência do alumínio como metal base. O autor, assim como neste trabalho, observou deformação pequena de espessura das peças.

Ambos os resultados, de rompimento no metal base e de rasgamento no ponto soldado mostram uma solda bem formada, de boa qualidade e aprovada para aplicação. Esta boa formação do ponto pode ter sido devido à alta capacidade de difusão da estrutura cristalina C.F.C. (cúbica de face centrada) do alumínio, quando comparada à outras estruturas cristalinas. Tomando-se a teoria da difusão como base para o processo de soldagem por ultra-som, sabe-se que os metais C.F.C. apresentam movimento dos átomos se difundindo substancialmente através de “jumps” ativados termicamente dentro da rede de outro elemento ou dele mesmo em locais vagos, pelo mecanismo de vacâncias (VAN VLACK, 1982). Esta facilidade de difusão pode ter gerado as

soldas resistentes ao cisalhamento encontradas.

Analisando-se a influência dos parâmetros de soldagem, com a utilização dos resultados encontrados na tabela 4.1 para cisalhamento, notou-se as seguintes características:

- para o nível alto de amplitude (66 μm), os valores de resistência ao cisalhamento foram mais altos. Facilitando o processo de difusão, a alta amplitude utilizada no processo permitiu um deslocamento maior das camadas superficiais, controlando-se, ao mesmo tempo, uma deformação excessiva. Este maior deslocamento das camadas superficiais causou um aumento da temperatura local devido ao atrito, facilitando, conseqüentemente, a movimentação para difusão dos átomos. A excelente ductilidade da estrutura C.F.C. favoreceu o deslocamento destas camadas e assim, a difusão através da rede de átomos (VAN VLACK, 1982);
- a combinação dos níveis altos da pressão e da energia, conforme explicado anteriormente, geraram junções de alta resistência ao cisalhamento, mas deformaram excessivamente a espessura do alumínio. Estes altos níveis dos parâmetros favoreceram a formação de junções resistentes, devido à formação de regiões bastante regulares e contínuas ao longo da interface, que podem ser visualizadas na figura 4.2 (1). Nesta figura, pode-se observar a linha de interface da junção, composta por diversos pontos de contato entre uma peça e outra. Já na figura 4.2 (2), com maior aumento, encontrou-se regiões de pequenos vazios, algumas irregularidades de forma na interface, mas de menor tamanho quando comparadas à amostra que resultou na menor força de cisalhamento (figura 4.3);
- a combinação de níveis baixos de amplitude, pressão e energia formaram junções de menor resistência, devido ao fato da insuficiência de deslocamento das camadas superficiais, por falta de amplitude, insuficiência de energia para ativação dos átomos e falta de pressão para manter as peças em contato atômico, fomentando, assim, a difusão dos átomos. Os parâmetros mais baixos de amplitude e energia usados para soldagem desta junção provavelmente não foram suficientes para gerar atrito e calor necessários para aumento da difusão dos átomos, formando uma junção menos resistente mecanicamente. A baixa pressão combinada com a baixa energia podem também não ter sido suficientes para quebrar por completo a camada de óxido das superfícies das peças, formando vazios contínuos, como vistos nas micrografias da figura 4.3. Esta figura mostra de forma representativa a junção de menor resistência ao cisalhamento, soldada com níveis de

amplitude e energia baixos. Para esta junção, encontrou-se uma região contínua e concentrada de vazios, com maior comprimento e profundidade do que a interface da amostra da figura 4.2. Isto pode ser melhor visualizado comparando-se as figuras correspondentes a iguais aumentos: 4.2.2 e 4.3.1 e 4.3.2.

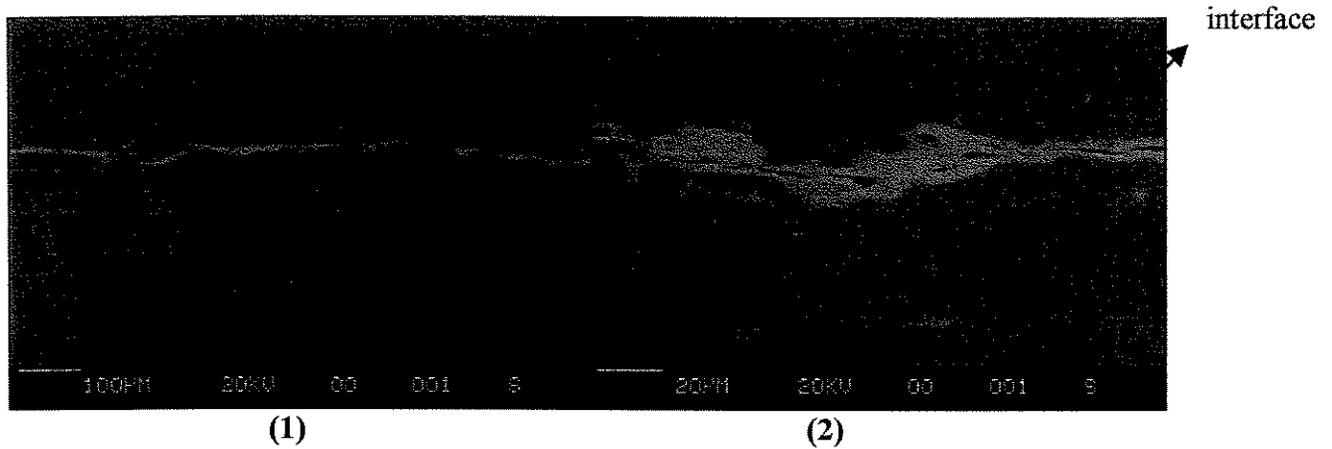


Figura 4.2 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Maior Resistência ao Cisalhamento. (1) 800x. (2) 4700x.

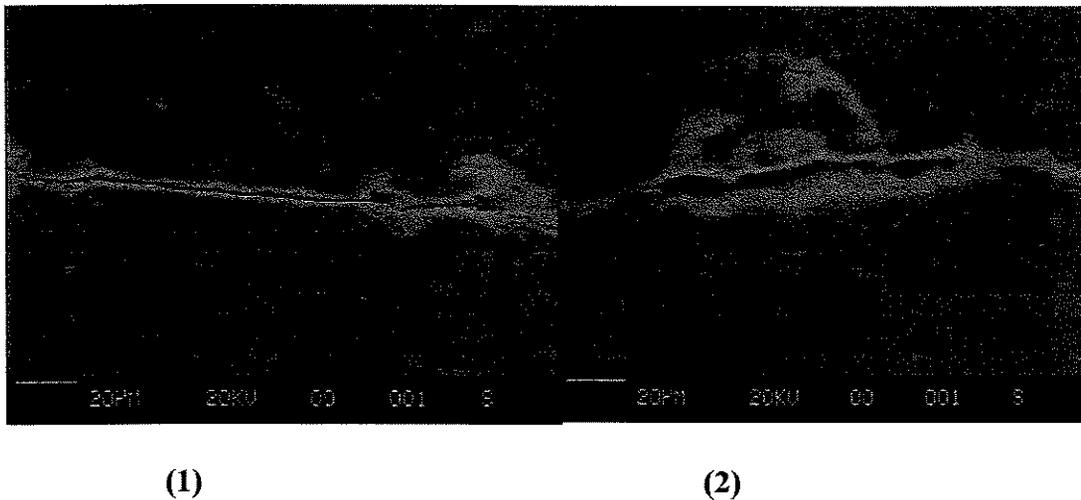


Figura 4.3 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Menor Resistência ao Cisalhamento. (1) 4700x. (2) 4700x.

4.2.2 Resultados do Ensaio de Arrancamento

Conforme explicado no capítulo 2, o ensaio de arrancamento é normalizado para soldagem por resistência (AWS C 1.1 – 66, 1966), e como resultado, tem-se informações qualitativas da solda, como “arranca ou não arranca”, formato do ponto, ductilidade do ponto, etc. No caso deste trabalho, na tentativa de se obter mais um valor numérico para se avaliar as propriedades das junções, foi utilizado o dinamômetro para medição da resistência ao arrancamento (capítulo 3). Os valores de resistência encontrados na tabela 4.1 não foram satisfatórios a ponto de ultrapassar o valor especificado pela empresa, de 100 N. Estes resultados podem ser explicados com base na afirmação de AMTECH (2000): o ensaio de arrancamento não é apropriado para junções soldadas por ultra-som, principalmente o ensaio realizado no ângulo de 180°, como no caso deste trabalho, pois não fornece resistência suficiente no sentido do esforço de arrancamento. Ao se realizar um ensaio de arrancamento, os pontos individuais de união formados ao longo da interface da solda são arrancados um a cada vez, ou seja, estes pontos de união na região soldada não se somam para fortalecer a junção. Apesar desta informação, empregou-se o arrancamento para a obtenção de informações práticas e rápidas, logo após a soldagem das junções.

Nota-se também, na tabela 4.1, uma grande variabilidade dos resultados, de 105,5% entre as amostras mais e menos resistentes. Esta grande variação encontrada nos resultados ocorreu pois, de acordo com a literatura (AMTECH, 2000), dentro de um ponto soldado, os pontos individuais de união difusos encontram-se em diferentes posições na interface de cada junção. A variabilidade do ensaio se deveu, inclusive, à simplicidade dos equipamentos utilizados e a sua realização manual.

A figura 4.4 mostra a junção que apresentou menor resistência ao arrancamento, soldada com níveis baixos de amplitude e pressão. Na micrografia desta junção, nota-se a presença de vazios contínuos ao longo da interface, com comprimento maior do que o comprimento dos vazios encontrados na junção da figura 4.2.2, de maior resistência. Esta linha contínua de vazios gera uma pequena interação entre as peças, e, conseqüentemente, uma difusão insuficiente.

Devido à grande variabilidade nos resultados encontrados no ensaio de arrancamento, torna-se difícil construir uma relação confiável entre a resistência ao arrancamento e os níveis dos parâmetros. De modo geral, notou-se, pela tabela 4.1, que o arrancamento mostrou-se mais resistente para as amostras soldadas com maiores níveis de amplitude e pressão.

Não se podendo admitir relações entre as variáveis de entrada e a resposta do planejamento fatorial, este ensaio deve ser considerado como complementar ao de cisalhamento, e servir como uma primeira qualificação da solda, logo após a soldagem, como realizado neste trabalho. O arrancamento manual das amostras recém-soldadas deve servir como orientação para continuação ou não da utilização dos níveis dos parâmetros.

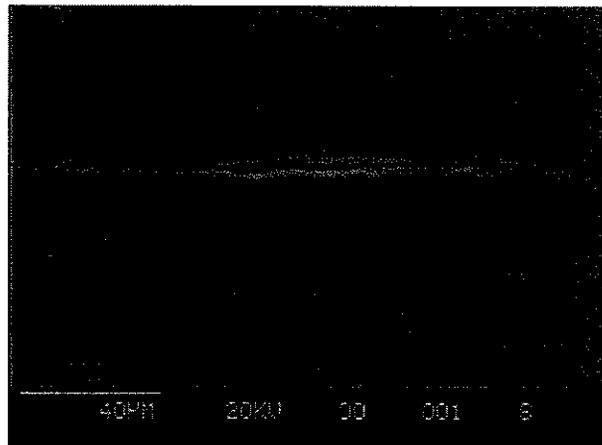


Figura 4.4 – Interface da Junção Alumínio/Alumínio de Menor Resistência ao Arrancamento. 2300x.

4.2.3 Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados de medição de resistência elétrica das junções apresentaram-se praticamente iguais para todas as condições de soldagem do planejamento fatorial inicial, considerando-se a precisão do micro-ohmímetro utilizado, conforme visto na tabela 4.1. Sendo assim, não foi possível uma comparação desta propriedade entre as junções soldadas com as diferentes combinações de parâmetros.

Segundo a literatura pesquisada, os fatores que poderiam influenciar os valores de resistência elétrica, no caso deste trabalho, são a condição estrutural da junção e a temperatura de trabalho da peça. Provavelmente, não houve uma mudança considerável da estrutura da junção (encruamento ou recristalização), introduzida pela deformação causada pela pressão do sonotrodo, de modo a gerar variações nas medições de resistência elétrica. Ou ainda, a profundidade das camadas das peças que sofreram modificação de estrutura é ainda pequena para que o micro-ohmímetro pudesse captar diferenças de medição.

Deve-se citar, ainda, que uma possível existência de defeitos no material ou na junção também pode aumentar sua resistência elétrica. A existência de vacâncias, deslocamentos e átomos intersticiais são os fatores mais influentes para esta ocorrência. Como os resultados desta propriedade não variaram, concluiu-se que, provavelmente, não havia nenhum destes defeitos de forma representativa, de modo a aumentar a resistência elétrica.

Com relação à faixa de temperatura de trabalho das junções, esta varia de -32°C a 230°C . Como, teoricamente, a resistência elétrica de um material aumenta com o aumento da temperatura, foi necessária a transformação dos valores de resistência medidos à 20°C , de modo a fornecer os valores desta propriedade nas temperaturas extremas de trabalho da peça. Na tabela 4.3, encontra-se os valores calculados para a resistência corrigida na faixa de temperaturas de trabalho, através da utilização da equação 4.1 para transformação de temperatura. Na tabela, são também mostrados os valores de resistividade correspondentes, isto é, a resistência elétrica por unidade de comprimento e área da seção transversal (PELED, 1994):

$$R(T) = R(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (4.1)$$

onde: $R(T)$ = resistência no valor da temperatura corrigida, em Ω ;

$R(T_0)$ = resistência em um valor arbitrário de temperatura, em Ω ;

α = coeficiente de temperatura à T_0 , em $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

T = temperatura na qual foi efetuada a medição, em $^{\circ}\text{C}$;

T_0 = temperatura especificada, em $^{\circ}\text{C}$.

Tabela 4.3 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Temperatura (°C)	Resistência corrigida (mΩ)	Resistividade ($\cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$)
-32	0,15	0,040
20	0,19	0,045
230	0,35	0,055

Vê-se, na tabela 4.3, que a resistência do material aumentou quase linearmente com o aumento da temperatura, conforme cálculos realizados com a equação 4.1. A altas temperaturas, neste caso a 230°C, o valor da resistência praticamente dobrou, o que pode limitar a utilização da peça quando da ocorrência de passagens altas de corrente (a corrente máxima especificada de projeto é de 300 A), devido ao aumento do calor retido na peça, e conseqüente modificação de sua estrutura.

4.3 Soldagem da Junção Cobre/Cobre

Para início de otimização dos parâmetros, foi realizado o planejamento fatorial inicial, com uma réplica, cujos resultados de resposta, resistência ao cisalhamento, resistência ao arrancamento e resistência elétrica são apresentados na tabela 4.4, para as diferentes combinações de parâmetros de soldagem. Os níveis dos parâmetros escolhidos foram provenientes da soldagem de pré-testes da junção, conforme descrito no capítulo 3. Os resultados das propriedades mecânicas medidas serão discutidos nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.4.

1) 1ª Solda

Tabela 4.4 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Cobre/Cobre.

Cu/Cu		μm	Bar	J	N	N	$\text{m}\Omega$
Amostra	parâmetros	amplitude	Pressão	energia	cisalhamento	arrancamento	resistência elétrica
1	a1p1e1	60	4,13	1000	1729,8	279,2	0,18
2	a1p2e1	60	4,48	1000	1845,1	271,5	0,18
3	a1p1e2	60	4,13	1050	1761,8	285,0	0,18
4	a1p2e2	60	4,48	1050	1781,0	323,7	0,18
5	a2p1e1	65	4,13	1000	1793,9	444,3	0,18
6	a2p2e1	65	4,48	1000	1768,2	633,2	0,18
7	a2p1e2	65	4,13	1050	1890,0	305,6	0,18
8	a2p2e2	65	4,48	1050	1877,1	310,8	0,18

Assim como na otimização da junção alumínio/alumínio, a variável de resposta escolhida para a alimentação do programa estatístico de análise por MSR foi a resistência ao cisalhamento. As etapas seguidas pelo programa são apresentadas no anexo I.

No caso da soldagem da junção cobre/cobre, com o cálculo do teste de hipótese realizado pelo SAS (anexo I), logo em seguida ao planejamento fatorial inicial, não se verificou maior influência de nenhuma variável de entrada em específico. Isto significa que há uma variação pequena da resposta com as diferentes combinações dos níveis dos parâmetros. Sendo assim, ao se calcular a variação para a resposta cisalhamento entre o menor e o maior valor encontrado, de acordo com os resultados da tabela 4.4, concluiu-se que a porcentagem é pequena, de 9,3%. Esta pequena variação pode ser também verificada nas micrografias das junções soldadas que apresentaram a maior e a menor resistência, mostradas nas figuras 4.5.1 e 4.5.2, respectivamente. Observando-se as interfaces das micrografias, é difícil de se notar grandes diferenças com relação à existência e tamanho de vazios, e formato da interface. Tanto o resultado do teste de hipótese, como a pequena variação de porcentagem calculada, contribuíram para a diminuição do número de etapas do SAS para esta junção.

Ao se prosseguir com a segunda etapa do programa, na qual foram gerados mais 4 pontos para soldagem (anexo I), viu-se que os resultados de cisalhamento destes pontos também eram bastante próximos, com variação de 10,0%, e muito acima da especificação de projeto, de 100 N.

Considerando-se estes resultados, decidiu-se pela não continuação da otimização e não construção da superfície de resposta, para economia de experimentos. A tabela 4.5 mostra as faixas de parâmetros escolhidas dentro das quais se obteve os melhores resultados de cisalhamento. Todas as amostras mostraram diminuição de espessura de aproximadamente 5%, para qualquer combinação de parâmetros.

Tabela 4.5 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Cobre/Cobre.

Cu/Cu	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	Cisalhamento
Faixa ótima	65	3,80 – 4,48	1000-1050	1715,0 – 1890,0

Na tabela 4.5, verifica-se que a amplitude escolhida foi de 65 μm , pois este nível gerou as melhores respostas de cisalhamento, conforme visualizado na tabela 4.4. Com relação ao parâmetro pressão, o valor inferior escolhido pelo SAS para otimização foi menor do que o nível baixo do planejamento fatorial (tabela 4.4), pois constatou-se, durante a realização dos pré-testes, que, a partir deste valor de pressão (3,80 bar), os valores da variável de resposta obtidos foram semelhantes, para junções soldadas não danificadas. Quanto à energia, as uniões cobre/cobre poderiam ter sido soldadas com valores mais altos do que os da faixa otimizada. Porém, valores mais altos de energia não trariam igual aumento da variável de resposta. Visou-se, assim, a economia de energia do processo. Abaixo desta faixa de energia, as junções não apresentavam o mesmo desempenho mecânico.

4.3.1 Resultados do Ensaio de Cisalhamento

Os resultados de resistência ao cisalhamento para esta junção são mostrados na tabela 4.4. Todas as junções foram aprovadas quanto à especificação de engenharia, de 100 N, e romperam no metal base, garantindo uma boa qualidade da solda. Não foi encontrado na literatura o valor de resistência ao cisalhamento de uniões cobre/cobre soldadas por ultra-som para termos de comparação.

As junções deste material foram as que apresentaram maior facilidade de soldagem com relação à busca de parâmetros iniciais para os pré-testes, assim como para sua otimização, conseguindo-se encontrar junções visualmente aceitáveis e com boa resistência mecânica ao cisalhamento, através da soldagem de uma menor quantidade de amostras do que para os outros casos. Isto se deveu, provavelmente, à facilidade de soldagem deste material pelo ultra-som, que pode ter ocorrido devido a sua alta difusão (maior do que a do alumínio). O cobre também possui uma estrutura cristalina C.F.C., e seu tamanho de raio atômico é menor do que o do alumínio, o que propicia uma maior difusão. Este metal apresenta, além disso, altas forças de atração interatômicas, quando comparadas a outros metais. Talvez daí venha a grande quantidade de aplicações de soldagem por ultra-som para o cobre.

Os altos valores de resistência ao cisalhamento deveram-se, inclusive, ao fato do cobre ser bastante adaptável ao trabalho a frio, que aqui ocorre com a pressão do sonotrodo sobre as peças. Seus cristais, por serem dúcteis, podem sofrer uma deformação considerável sem fraturar (ASM, 1990).

Como era esperado, devido às altas resistências mecânicas das junções que apresentaram tanto a menor quanto a maior resposta, suas interfaces apresentaram poucos vazios, longa continuidade de união, interface mais retilínea, e pouca variação visual entre as condições de soldagem, conforme pode ser visto nas figuras 4.5.1 e 4.5.2.



Figura 4.5 – Interfaces das Junções Cobre/Cobre. (1) Maior Resistência ao Cisalhamento. 2300x. (2) Menor Resistência ao Cisalhamento. 2300x.

Com relação à influência dos parâmetros de soldagem no resultado de cisalhamento, apesar de não se ter encontrado maior efeito de algum deles em específico, notou-se, pela tabela 4.4, que o nível alto do parâmetro pressão gerou melhores resultados. Isto pode ter ocorrido devido à existência de maior contato interfacial, admitindo maior difusão de uma peça na outra, sem danificar as junções. A combinação de níveis altos dos 3 parâmetros gerou o melhor resultado, que é, ainda, bastante próximo dos outros, mostrando o pequeno efeito das variáveis de entrada na resposta.

4.3.2 Resultados do Ensaio de Arrancamento

Na tabela 4.4 são também mostrados os resultados do ensaio de arrancamento, que apresentaram-se bastante favoráveis quando comparados com o valor especificado de projeto (100 N). A variação entre o menor e o maior resultado foi alta (133,0%), porém, nenhum deles foi menor do que 100% do valor de projeto. Parte da variação de resultados neste ensaio pode também ser visualizada nas figuras 4.6.1 e 4.6.2, que trazem micrografias das amostras soldadas com as combinações de parâmetros que geraram a maior e a menor resistência, respectivamente. Nota-se uma maior quantidade de vazios contínuos na amostra de menor resistência (figura 4.6.2), quando comparada à amostra da figura 4.6.1.

Os valores maiores de arrancamento possivelmente foram alcançados devido às propriedades favoráveis do cobre com relação à difusão e reação ao trabalho a frio (alta ductilidade), já explicados no item 4.3.1. Para o caso deste ensaio, também não se encontrou propriedades mecânicas tabeladas para comparação.

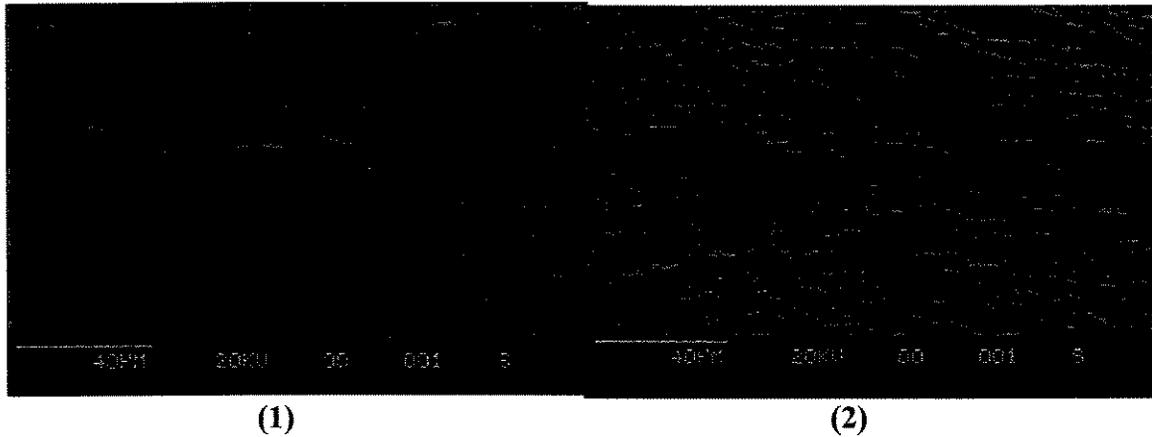


Figura 4.6 - Interfaces das Junções Cobre/Cobre. (1) Maior Resistência ao Arrancamento. 2300x. (2) Menor Resistência ao Arrancamento. 2300x.

4.3.3 Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados deste ensaio são vistos na tabela 4.4. Assim como para a junção alumínio/alumínio, nota-se que não há praticamente variação de resultados entre as amostras soldadas com diferentes combinações de parâmetros do planejamento fatorial. Provavelmente, as modificações estruturais não foram grandes a ponto de causar variações nas propriedades elétricas da junção.

As medições de resistência elétrica das junções foram realizadas a 20°C, sendo, portanto, necessário se transformar estes valores para as temperaturas de trabalho da peça, especificadas por projeto. Utilizou-se, para isto, o coeficiente de temperatura do cobre e a equação 4.1, sendo os resultados mostrados na tabela 4.6. Nesta tabela são também mostrados os valores de resistividade elétrica correspondentes.

Tabela 4.6 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica Para Diferentes Temperaturas Para a Junção Cobre/Cobre.

Temperatura (°C)	Resistência corrigida (mΩ)	Resistividade ($\cdot 10^{-6} \Omega.m$)
-32	0,14	0,018
20	0,18	0,019
230	0,33	0,025

Na tabela 4.6, verifica-se que os valores mais baixos de resistência elétrica encontrados a 230°C para esta junção, em comparação às junções alumínio/alumínio, aumentam o leque de aplicações desta união para utilização em casos onde a passagem de corrente é mais elevada.

4.4 Soldagem da Junção Alumínio/Cobre

Iniciando-se o procedimento de otimização dos parâmetros deste processo, para a junção alumínio/cobre, foi primeiramente realizado um planejamento experimental fatorial completo. Utilizou-se, para este caso, uma única réplica. Os resultados das propriedades de resistência ao cisalhamento, resistência ao arrancamento e resistência elétrica são apresentados na tabela 4.7, para as combinações dos parâmetros provenientes do planejamento fatorial. Igualmente às outras soldagens, os níveis dos parâmetros foram escolhidos durante soldagem dos pré-testes, conforme descrito no capítulo 3. Os resultados das propriedades serão comentados nos itens 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3.

1) 1ª Solda

Tabela 4.7 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Cobre.

Al/Cu		μm	Bar	J	N	N	mΩ
Amostra	parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento	arrancamento	resistência elétrica
1	a1p1e1	55	1,72	750	544,7	66,4	0,19
2	a1p2e1	55	2,07	750	589,6	49,4	0,19
3	a1p1e2	55	1,72	800	544,7	46,5	0,19
4	a1p2e2	55	2,07	800	743,4	60,1	0,18
5	a2p1e1	58	1,72	750	570,4	46,9	0,19
6	a2p2e1	58	2,07	750	672,9	61,1	0,19
7	a2p1e2	58	1,72	800	685,7	60,3	0,19
8	a2p2e2	58	2,07	800	698,5	58,1	0,19

Utilizando-se os resultados do ensaio de cisalhamento, alimentou-se o programa SAS, que gerou novos pontos a serem soldados na direção de aumento desta propriedade, em cada etapa seguinte. Os novos pontos podem ser visualizados no anexo I. Aí, podem ser encontrados os cálculos dos efeitos das variáveis e de suas interações, a partir dos valores retirados do primeiro planejamento fatorial. Estes cálculos mostraram que não houve efeito predominante de qualquer uma das variáveis, ou seja, ao se continuar as soldagens das junções, nas etapas seguintes, variou-se todos os parâmetros de soldagem conjuntamente até se chegar na região otimizada do processo, que pode ser vista nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7. Estes gráficos representam a superfície de resposta para a combinação dos parâmetros do processo, dois a dois.

Nos eixos dos gráficos, estão mostrados os parâmetros principais, com as mesmas unidades da tabela 4.7. As escalas na parte inferior aos gráficos representam os níveis da variável de resposta de força de cisalhamento, encontrados durante o experimento, em Newtons. As cores na escala indicam a variação da resistência ao cisalhamento em função dos parâmetros do processo apresentados em cada um dos gráficos.

Ao se analisar o gráfico da figura 4.6, amplitude x energia, verifica-se a existência de uma região delimitada pela linha de cor cinza, no nível de 630,25 N de resistência ao cisalhamento. Esta região foi a que apresentou maior valor de resistência, ou seja, é uma região de máximo do processo. Esta região engloba amplitudes entre 58,5 μm e 61,0 μm e energias entre 770 J e 800 J, aproximadamente.

O gráfico da figura 4.7, pressão x energia, indica também uma região de máximo do processo, de 627,51 N, delimitada pela cor cinza, e que engloba pressões entre 1,85 bar e 1,95 bar e energias entre 775 J e 790 J, aproximadamente.

Considerando-se as informações dos dois gráficos em conjunto, conseguiu-se encontrar uma região de máximo para o processo, dentro da qual as faixas dos níveis dos parâmetros

variaram como a seguir: amplitude - 58,5 μm a 61,0 μm ; pressão - 1,85 bar a 1,95 bar; energia - 775 J a 790 J. Dentro destas faixas de parâmetros, as uniões soldadas apresentaram a maior resistência ao cisalhamento quando ensaiadas.

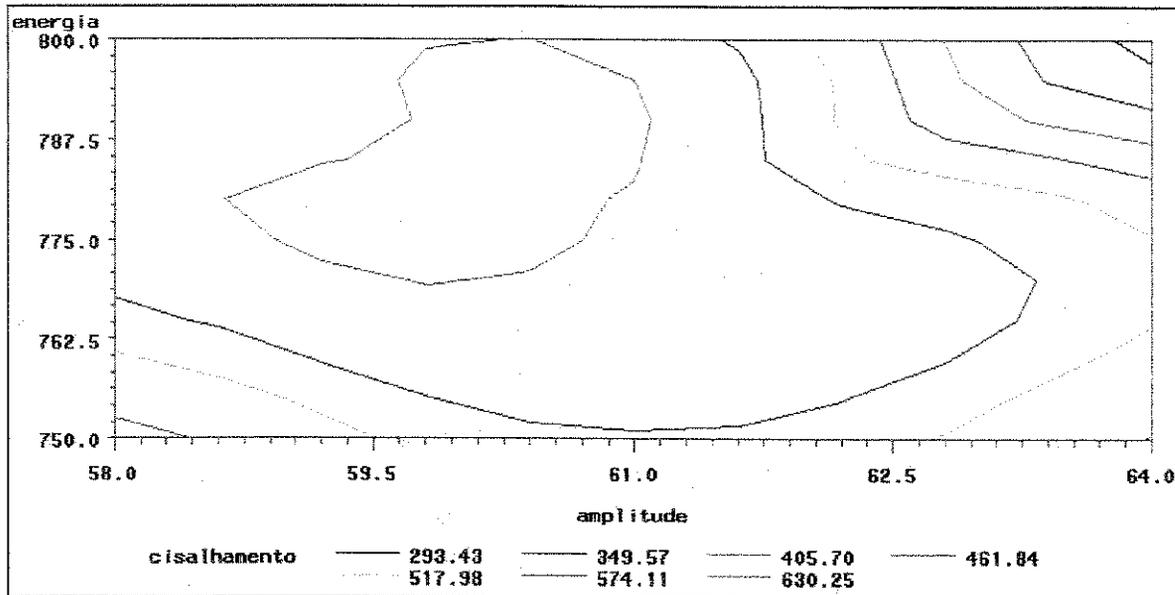


Figura 4.7 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Cobre Para os Parâmetros Amplitude (μm) e Energia (J). Resposta Força de Cisalhamento (N).

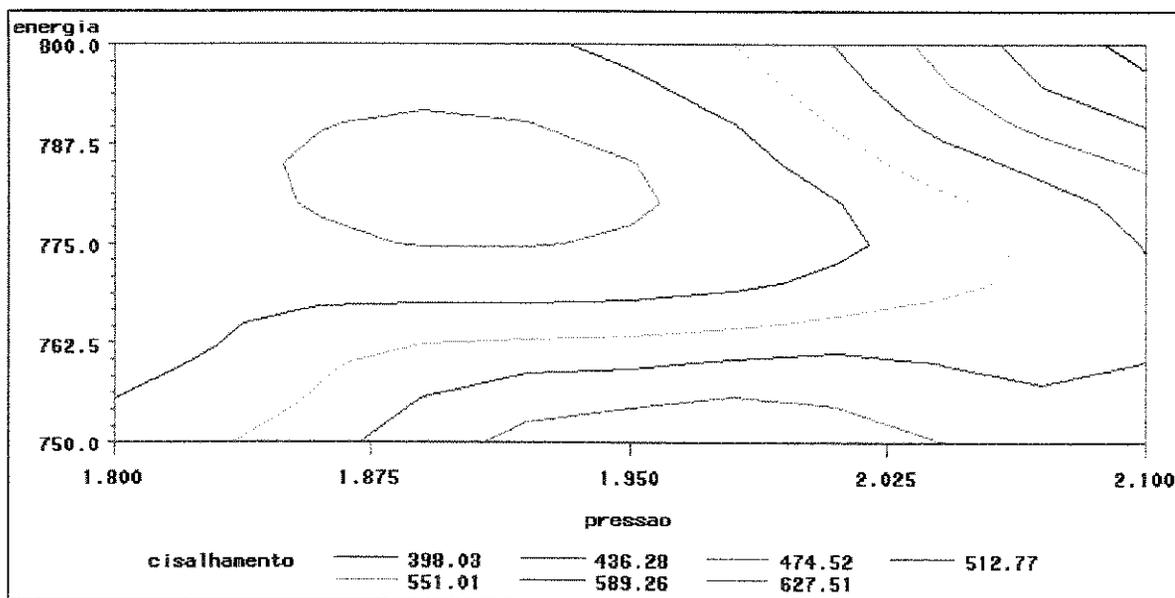


Figura 4.8 – Superfície de Resposta da Otimização da Soldagem de Alumínio/Cobre Para os Parâmetros Pressão (bar) e Energia (J). Resposta Força de Cisalhamento (N).

Foram soldados mais pontos para confirmação da região otimizada, mostrados no anexo I, sendo que, durante a realização destas soldas, verificou-se, ainda, a possibilidade de aumento da resistência ao se aumentar a energia, utilizando-se uma amplitude um pouco mais baixa. Além de conseguir um pequeno aumento da resistência das junções, pôde-se encontrar junções com menor diminuição de espessura do que no caso das junções soldadas dentro da região otimizada. Em ambos os casos, as deformações de espessura foram abaixo de 10%. Escolheu-se, portanto, soldar com níveis maiores de energia e menores de amplitude. A tabela 4.8 mostra as faixas dos parâmetros escolhidas para soldagem:

Tabela 4.8 – Região Otimizada do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Cobre.

Al/Cu	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
Faixa ótima	57 – 59	1,92 – 1,95	800-810	679,1 – 705,5

4.4.1 Resultados do Ensaio de Cisalhamento

Os resultados do ensaio de cisalhamento para o planejamento fatorial inicial são mostrados na tabela 4.7, e os resultados obtidos da otimização dos parâmetros na tabela 4.8. Observou-se que todos os valores ultrapassaram o limite mínimo especificado por projeto, de 100 N. Os resultados apresentaram uma variação de 36,5% entre o menor e o maior valor de resposta. Esta variação foi maior do que a variação de resultados para a soldagem de materiais similares, devido à maior dificuldade de soldagem de dissimilares, já que estes apresentam variações estruturais e de rugosidade superficial entre si, fatores importantes no processo de ultra-som. Ainda assim, esta variação não afetou a aprovação das junções com relação ao cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento encontrada para a junção alumínio/cobre apresentou-se menor do que os valores encontrados experimentalmente por KAISER (1978). Possivelmente

porque este utilizou alumínio temperado, conferindo maior resistência à junção, e também devido à possibilidade de utilização de maiores níveis de pressão e amplitude sem danificar o metal.

Ainda com relação à baixa resistência ao cisalhamento encontrada, a possibilidade da interação alumínio/cobre ter formado um composto intermetálico foi levada em consideração. Apesar da maioria dos autores afirmar a não formação de intermetálicos, SILVEIRA (1987) encontrou indícios destes elementos dentro da interface de suas soldas no estado sólido, a temperaturas abaixo de 150°C, o que poderia ter ocorrido neste experimento, respondendo a questão do porquê das resistências ao cisalhamento (e, no item seguinte, ao arrancamento) serem baixas para esta junção.

Quase a totalidade das amostras rompeu no ponto de solda, representando a dificuldade de união de dissimilares, mesmo pelo processo de ultra-som. Quando há ausência da fase θ (intermetálica), quebradiça na interface, o cisalhamento da junção se dá no metal base (alumínio), segundo MOZHAISKAYA (1991). Segundo trabalho realizado por TSUJINO (1993), a resistência de suas junções alumínio/cobre soldadas nas extremidades por ultra-som atingiu praticamente o valor de resistência do metal alumínio, demonstrando a não formação de intermetálicos.

Uma dificuldade experimental encontrada foi a diferença de dureza dos metais, ou seja, ao se aumentar a pressão e a amplitude (grandezas físicas mecânicas), o alumínio deformou-se mais facilmente do que o cobre, invalidando a junção. Este material não retorna a sua forma original após aquecimento, além de ser bastante maleável e dúctil. O cobre, por sua vez, necessitava de alguma deformação nas camadas superficiais para que pudesse ser soldado ao alumínio, o que foi difícil de se conseguir, devido à maior dureza do cobre. A diminuição de dureza da superfície do cobre, medida durante a realização deste trabalho, deu uma boa indicação com relação à integridade da junção, já que a deformação, não suficiente para formação da junção, ocorreu em maior quantidade e extensão no alumínio. Conforme teoria pesquisada, o cobre puro amolece na faixa de temperatura entre 200°C e 425°C (CEBRACO, 2000), o que dificultou ainda mais a formação da união, cuja temperatura de soldagem medida foi de 117°C. A pressão e a amplitude,

variadas em conjunto, foram os parâmetros mais difíceis para escolha dos níveis, devido a este motivo. A energia era o parâmetro menos preocupante com relação a esta característica da junção.

Analisando-se a influência dos parâmetros de soldagem na tabela 4.7, do primeiro planejamento fatorial, notou-se que:

- as junções mais resistentes foram soldadas com combinações de parâmetros nas quais a amplitude apresentava o nível mais alto. Esta amplitude alta, provavelmente, foi necessária para que se pudesse movimentar as camadas superficiais do cobre, facilitando a difusão dos metais. A presença dos níveis altos de pressão foi útil para manter um contato íntimo dos átomos dos metais, garantindo a união entre pontos de contato;
- as junções menos resistentes foram soldadas com níveis mais baixos dos parâmetros, que mostraram-se menos eficientes para a fixação das amostras, manutenção do contato atômico entre elas durante soldagem e ativação térmica para facilitação da difusão de átomos.

Como pode ser visto na tabela 4.9, que ilustra a influência dos parâmetros, foram calculadas, através da utilização de microscopia eletrônica de varredura, as porcentagens dos elementos presentes na superfície cisalhada e arrancada de cada um dos metais, para as condições de maior e menor resistência aos dois ensaios.

Tabela 4.9 – Resultados das Porcentagens dos Elementos nas Superfícies dos Metais.

Condição	Peça aberta	% alumínio	% cobre
Máx F cisalhamento	Alumínio	94,69	5,31
	Cobre	25,23	74,76
Mín F cisalhamento	Alumínio	95,29	4,71
	Cobre	19,31	80,69
Máx F arrancamento	Alumínio	96,63	3,37
	Cobre	26,48	73,52
Mín F arrancamento	Alumínio	95,42	4,58
	Cobre	25,40	74,60

Deve-se dizer que todas as amostras foram analisadas com margem de erro dentro da faixa aceitável para este tipo de análise (10%), e que os outros elementos que foram encontrados nas superfícies (O₂, Na, Ca, Fe) foram desconsiderados da porcentagem total de elementos, para efeito de cálculo.

Analisando-se a tabela 4.9, para as amostras cisalhadas, pôde-se verificar que a porcentagem de cobre na superfície do alumínio e vice-versa foi maior para as peças que romperam com maior força de cisalhamento. Ou seja, as junções mais resistentes apresentaram maior difusão de um elemento no outro, garantida pela combinação de níveis altos dos parâmetros.

4.4.2 Resultados do Ensaio de Arrancamento

O maior problema mecânico encontrado nas junções alumínio/cobre foi a falta praticamente completa de resistência ao ensaio de arrancamento. Conforme visto na tabela 4.7, as junções soldadas e arrancadas apresentaram insuficiência de união, gerando valores de arrancamento bastante baixos, menores do que o valor especificado pela engenharia da empresa.

Isto pode ter ocorrido devido à maior dificuldade de soldagem de dissimilares, mesmo no estado sólido, devido à diferença de suas propriedades atômicas. Ainda, como citado no capítulo 3, o ensaio de arrancamento, segundo AMTECH (2000), não é apropriado para este tipo de junção, sendo possível se encontrar resultados baixos de resistência a este esforço.

Para este ensaio, foi também calculada, por microscopia eletrônica, a porcentagem de elementos nas superfícies arrancadas, como pode ser visto na tabela 4.9. Para estas amostras, a peça de cobre mais resistente ao arrancamento apresentou maior quantidade de alumínio do que a peça menos resistente. Para a peça de alumínio, isto não ocorreu, ou seja, encontrou-se maior quantidade de cobre na peça de alumínio que rompeu com maior força. Isto pode ser explicado de duas maneiras. A força na direção do arrancamento para se arrancar o cobre do alumínio não foi suficiente para retirar grande quantidade deste material, sobrando mais cobre no alumínio do que

no caso da outra peça, cuja força de arrancamento foi maior e retirou, assim, maior quantidade de material. De outro lado, para as peças de cobre, a de maior resistência ao arrancamento apresentou maior quantidade de alumínio, pois houve maior difusão do que na peça de menor resistência.

4.4.3 Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados deste ensaio são mostrados na tabela 4.7. Nota-se que não há praticamente variação de resultados entre as amostras. Da mesma forma que para as outras junções, não houve fatores, como diferenças microestruturais e existência de defeitos, que pudessem variar o valor desta propriedade.

As medições da tabela 4.7 foram realizadas a 20°C, devendo-se, então, transformar seus resultados para os valores de temperatura especificados pela empresa, utilizando-se, neste caso, o coeficiente de temperatura do alumínio, que apresenta maior resistividade, tornando-o material limitante para passagem de corrente e conseqüente aquecimento, e a equação 4.1. Os resultados são mostrados na tabela 4.10:

Tabela 4.10 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Cobre.

Temperatura (°C)	Resistência corrigida (mΩ)	Resistividade ($\cdot 10^{-6} \Omega.m$)
-32	0,15	0,040
20	0,19	0,045
230	0,35	0,055

Caso tenha havido formação de compostos intermetálicos nas junções, poderá haver algum problema de aquecimento localizado durante a utilização da peça, acelerando a degradação das conexões elétricas. O aumento da camada de intermetálicos ocorre quando a junção é mantida acima da temperatura de 150°C, como é o caso desta peça, quando utilizada em veículos. Outro fator possível de causar este problema de formação de intermetálicos em junções no estado sólido é a existência de camada de óxido na interface (NAKAMURA, 1977).

A possível formação de intermetálicos nas junções alumínio/cobre deste trabalho pode ainda ser aumentada com o aquecimento à temperaturas de aproximadamente 125°C, por passagem de corrente (SILVEIRA, 1987). Existem, ainda, outros fatores não comprovados, relacionados com cada processo de soldagem no estado sólido em específico, que podem interferir na estrutura da junção ao se passar uma corrente elétrica. Sendo assim, esta complexidade do comportamento das junções bimetálicas soldadas para utilização elétrica faz com que sejam necessários métodos de avaliação destas em trabalho, considerando a degradação causada pelos compostos intermetálicos.

4.5 Medições e Testes Complementares

- **Medição da Temperatura de Soldagem das Junções**

Conhecendo-se a importância da temperatura nos processos de soldagem e para obtenção de maior quantidade de dados sobre as junções soldadas por ultra-som, foi realizada a medição da temperatura de soldagem das uniões de alumínio/alumínio, alumínio/cobre e cobre/cobre. Esta medição de temperatura é importante no que diz respeito ao processo de formação da junção por meio de difusão. Sabe-se que a velocidade de difusão aumenta com a temperatura, e que, à temperatura ambiente, esta taxa é bastante baixa para os metais alumínio e cobre.

Outro fator importante, sobre o qual a temperatura é responsável, é a formação de componentes intermetálicos nas interfaces das junções de metais dissimilares. A partir de certo valor de temperatura, estes elementos começam a ser formados, e podem prejudicar a resistência mecânica das junções. Na teoria do ultra-som apresentada no capítulo 2, alguns autores afirmam que não há qualquer possibilidade de formação destes intermetálicos, já que a temperatura atingida no processo é de aproximadamente 30% a da temperatura de fusão dos metais. Porém, como visto anteriormente, SILVEIRA (1987) citou que, em seus experimentos, alguns indícios de intermetálicos foram encontrados em junções alumínio/cobre à temperaturas abaixo de 125°C,

devido também à interação de outros fatores (considerando ainda a temperatura como fator mais importante).

Neste trabalho, todas as medições foram realizadas para as junções soldadas com os maiores níveis do parâmetro energia dentro do planejamento fatorial, ou seja, tentando-se alcançar os maiores valores de temperatura. Estas junções correspondem aos maiores valores de resistência ao cisalhamento de cada caso. O termopar para medição (ligado a um termômetro digital) foi colocado dentro de um furo aberto nas peças superiores, junto à interface soldada. Os valores de temperatura encontrados são mostrados na tabela 4.11:

Tabela 4.11 – Valores de Temperatura para a Soldagem por Ultra-Som.

Junção	Quantidade de calor fornecida (J)	Temperatura de soldagem (°C)
Alumínio/alumínio	450	77
Alumínio/cobre	800	117
Cobre/cobre	1050	160

Estes valores de temperatura da tabela 4.11 não alcançam 30% dos valores de temperatura de fusão de cada um dos metais. E sendo assim, as temperaturas de soldagem não parecem fatores contribuintes para a formação de intermetálicos para a junção alumínio/cobre, apesar de se ter encontrado junções com valores baixos de resistência ao cisalhamento e arrancamento. Do mesmo modo, tornam-se necessários outros fatores, como pressão elevada e tempo para difusão, para fomentar a criação de intermetálicos nas junções de alumínio/cobre. Neste caso, devido às temperaturas baixas e tempo curto de solda, pode não ter havido formação de outras substâncias. Já através da microscopia eletrônica, foi possível a visualização de regiões ao longo desta interface com outras formações, como na figura 4.9, o que se supõe como formação de outro componente estrutural. Porém, torna-se necessária a utilização de raio-X ou de espectrometria dispersiva para identificação.

Outro fato importante encontrado na tabela 4.11 é o da temperatura alcançada pela junção cobre/cobre ser maior do que a da junção alumínio/alumínio, menos condutiva termicamente. Isto se deveu à maior quantidade de energia (1050 J) e pressão (4,48 bar) fornecidas para a soldagem de cobre/cobre. Calculando-se a relação entre temperatura e energia fornecida para as junções, encontrou-se que a junção cobre/cobre dissipou mais calor do que a junção alumínio/alumínio, que atingiu, proporcionalmente, uma temperatura mais elevada para a quantidade de energia de soldagem.

Deduz-se, pela tabela 4.11, que, por ter atingido temperaturas de soldagem mais altas, a junção cobre/cobre teve seu processo de difusão mais facilitado do que para as outras duas junções, contribuindo, com isto, para a maior resistência mecânica encontrada para esta junção, tanto para o ensaio de cisalhamento como para o ensaio de arrancamento. Apesar desta temperatura mais alta do que para as outras junções, ela é ainda baixa para ocorrência de difusão facilitada no cobre, cujos cálculos são realizados, na teoria, a partir de temperaturas de 450°C (SMITHELLS, 1976). Além disso, o tempo em que esta temperatura é mantida no ultra-som também é curto, decaindo rapidamente após a passagem das ondas vibratórias, e dificultando a difusão.

- **Medição da Microdureza de uma Junção Alumínio/Cobre**

A medição de microdureza de uma junção alumínio/cobre teve como objetivo a verificação da variação de dureza ao se aproximar da interface, a partir de medições realizadas no metal base. A amostra escolhida para esta medição foi a que apresentou máxima resistência ao cisalhamento, pelo fato de ter sido soldada com o maior nível de energia, fazendo-a atingir temperaturas máximas, o que poderia favorecer a formação de outras estruturas nos materiais.

Primeiramente, não foi possível se obter medições de microdureza exatamente sobre as regiões diferenciadas interfaciais encontradas no MEV, como as da figura 4.9, pois o aumento do microscópio acoplado ao microdurômetro era de somente 500 vezes, enquanto que estas regiões eram visualizadas eletronicamente com aumentos de, no mínimo, 1000 vezes. Ressalta-se,

inclusive, que as interferências externas (vibrações causadas por outros equipamentos) nas medições com cargas de 1,0 g foram bastante altas, gerando variações grandes nos valores de microdureza. Assim, teve-se que desconsiderar várias medições realizadas. Tomou-se o cuidado, porém, de que as diagonais do penetrador estivessem exatamente dentro da região de interface, sem sofrer influências devido à diferente deformação do cobre puro e do alumínio puro, que pudessem distorcer as medições.

Como não se conseguiu medir dentro da interface exatamente sobre estas regiões diferenciadas, mediu-se dentro da interface aleatoriamente, podendo-se ter realizado penetrações sobre vazios, regiões diferenciadas ou na própria interface de solda dos metais difundidos.

Ao se analisar a tabela 4.12, concluiu-se que, ao se aproximar da interface, o valor de microdureza dos materiais aumentou, tanto para o alumínio como para o cobre. Ao longo da interface, em cada material, a dureza manteve-se aproximadamente constante. Isto confirma o endurecimento da região próxima à interface de soldagem, devido ao trabalho mecânico sofrido por esta região durante a pressão do sonotrodo. Teoricamente, também poderia-se supor que, devido à difusão de um material no outro, a região da interface mostrou maior dureza com o preenchimento de vazios dentro de cada material, e também com o aumento da densidade do material ligado.

As pequenas variações de microdureza do cobre e do alumínio próximas à interface podem ter sido favorecidas também pelos altos coeficientes de transferência de calor destes elementos, sendo o do cobre comparativamente maior, o que pode explicar sua maior variação de microdureza em porcentagem. Calculando-se através da média de microdurezas em cada região, o alumínio apresentou um aumento de microdureza de 71,25% ao se aproximar da região da interface. O cobre apresentou um aumento de 86,31% ao se aproximar da interface.

Tabela 4.12 – Valores de Microdureza para a Junção Alumínio/Cobre.

Região medida	Microdureza metal base central (HV 0,001)	Microdureza Próximo à interface (HV 0,001)	Interface
Alumínio	16,82 16,82 15,90 22,39	26,28 24,50 25,67 24,50	
Interface			31,28 42,57 35,77 43,89
Cobre	46,72 61,30 55,12 46,72	61,30 59,13 59,13 63,59	

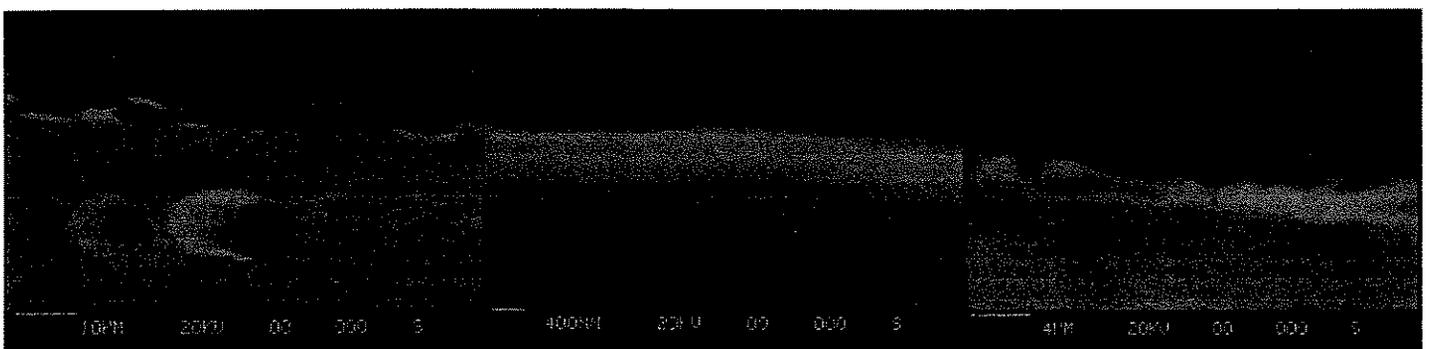


Figura 4.9 – Interface da Junção Alumínio/Cobre Utilizada Para Ensaio de Microdureza.

- **Soldagem de Junções com Limpeza Superficial**

Os resultados de cisalhamento das junções com limpeza superficial são mostrados na tabela 4.13. Os valores encontrados estão próximos aos valores da resistência mecânica das junções não limpas soldadas com os mesmos parâmetros (retirados do planejamento fatorial inicial), o que indica, conforme AMTECH (2000), que o fator limpeza superficial não é imprescindível ao processo.

Tabela 4.13 – Resistência ao Cisalhamento de Junções com Limpeza Superficial.

Junção	Alumínio/Alumínio	Alumínio/Cobre	Cobre/Cobre
Resistência ao cisalhamento (N)	679,3	690,0	1838,4

De acordo com a tabela 4.13, os valores das junções alumínio/cobre e cobre/cobre encontram-se dentro das faixas de valores das regiões otimizadas de cada junção. Isto indica que as amostras não limpas e as amostras limpas são tratadas da mesma forma na soldagem por ultrassom, com a única diferença da necessidade de um intervalo de tempo maior para soldagem das amostras não limpas, conforme explicado no capítulo 2. Este intervalo de tempo menor pode ser constatado nos gráficos gerados pelo programa IA, do fabricante do equipamento de soldagem. A figura 4.10 mostra o gráfico do comportamento da potência no tempo do processo de soldagem da junção alumínio/cobre, com limpeza superficial. A figura seguinte (fig. 4.11) traz o mesmo gráfico de potência do processo, de uma junção soldada com os mesmos parâmetros, porém sem limpeza superficial. Os gráficos de potência para as outras junções apresentaram comportamento semelhante.

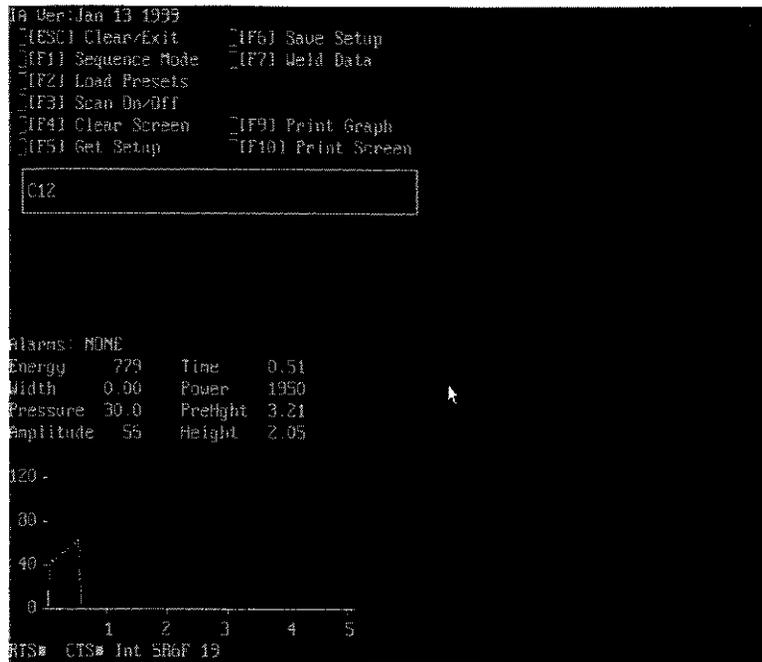


Figura 4.10 – Gráfico Potência x Tempo da Soldagem de Junção com Limpeza Superficial.

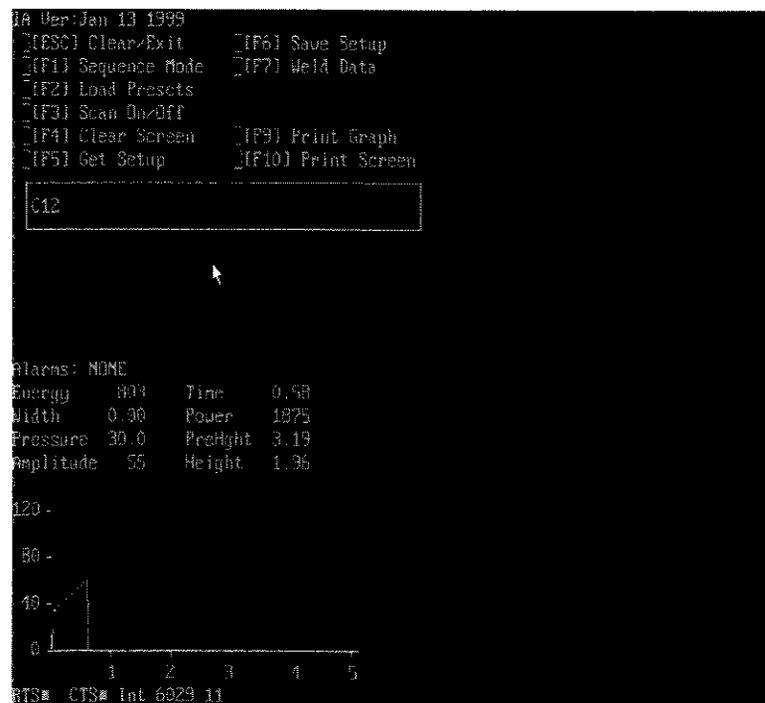


Figura 4.11 – Gráfico Potência x Tempo da Soldagem de Junção sem Limpeza Superficial.

Comparando-se os gráficos, pôde-se constatar um aumento na duração de tempo do processo para a junção sem limpeza superficial de 0,07 s, como também um aumento menos acentuado da curva de potência, que atingiu 1875 W. Já a junção com limpeza superficial apresentou uma curva de potência mais acentuada, pois, em menor espaço de tempo alcançou maior nível de potência (1950 W).

Quanto à metalografia das junções soldadas com limpeza superficial, não se notou praticamente nenhum fator que mostrasse uma melhoria concreta na parte visual da junção. Ou seja, esta apresentou, igualmente a uma junção não limpa, vazios internos não soldados ao longo da interface, existência de oxigênio na interface, podendo indicar a presença de óxidos (geralmente pretos na microscopia), e existência de outros elementos na junção que poderiam ser provenientes do polimento mecânico. A figura 4.12 apresenta uma junção alumínio/alumínio limpa, visualizada através do MEV, contendo um vazio ao longo da interface não soldada. Conclui-se que não é uma porosidade do material, pois o vazio está seguindo a linha da interface, representando uma região não soldada. As outras junções limpas apresentaram as mesmas ocorrências.

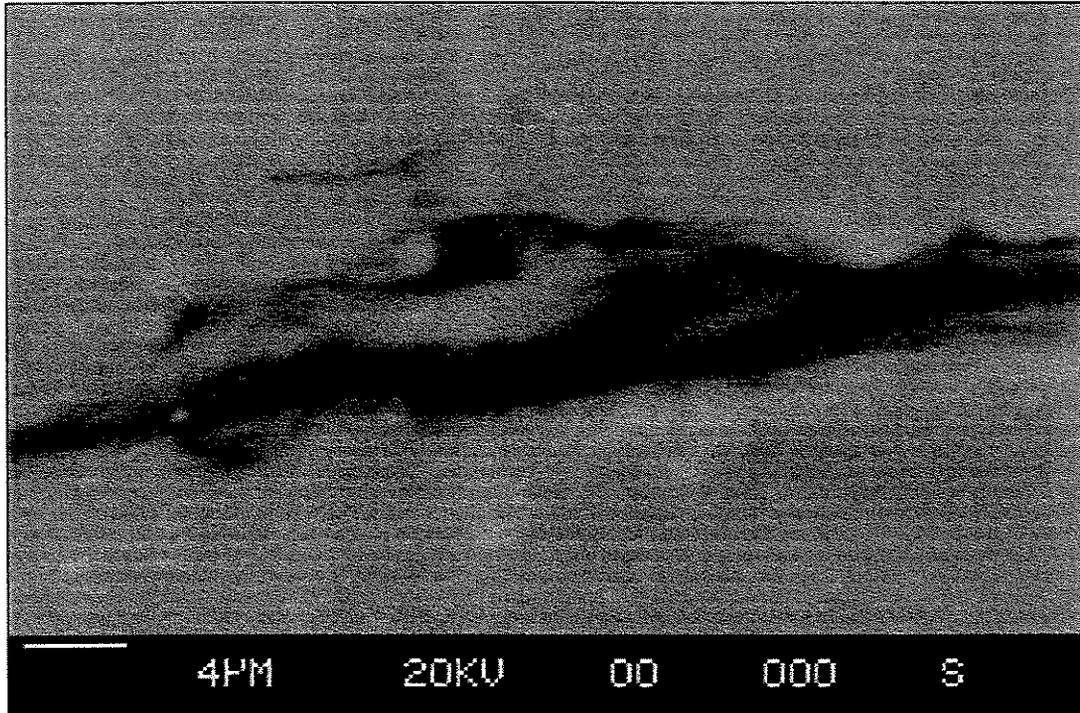


Figura 4.12 – Interface de Junção Alumínio/Alumínio com Limpeza Superficial.

4.6 Soldagem por Resistência a Ponto

No item 4.7, é apresentado o planejamento fatorial completo para a junção alumínio/alumínio, utilizado como procedimento experimental para se analisar a influência dos parâmetros na soldagem, e para se ensaiar as junções, em seguida, por cisalhamento, arrancamento e resistência elétrica. O planejamento fatorial utilizado foi idêntico ao utilizado para a soldagem por ultra-som, porém, não foi realizada a otimização do processo através do MSR, pela falta de necessidade encontrada.

Para as outras junções (alumínio/cobre e cobre/cobre), das quais não se obteve resultados satisfatórios devido ao material escolhido e aos equipamentos de soldagem disponíveis, são apresentadas justificativas para a falta de junção, proveniente dos problemas detectados, nos itens 4.8 e 4.9.

4.7 Soldagem da Junção Alumínio/Alumínio

A soldagem por resistência a ponto, por ser um método já bastante difundido, reserva tabelas de soldabilidade entre diversos materiais, e para algumas aplicações mais utilizadas, fornece tabelas contendo os principais parâmetros de soldagem para cada liga em específico. Os materiais mais usuais cujos parâmetros de soldagem encontram-se tabelados são o aço inox, o aço carbono e o alumínio. Os parâmetros são dispostos de acordo com a espessura do material a ser soldado.

Para tanto, resolveu-se pela não otimização do processo de soldagem através do MSR, o que geraria custo de experimento e tempo. As tabelas de parâmetros dos fabricantes dos equipamentos de soldagem serviram como base para o início da realização dos pré-testes, até se encontrar níveis de soldagem satisfatórios. Estes níveis mostraram-se suficientes para se encontrar faixas ideais de soldagem da junção.

Outro motivo para a não realização da análise por MSR foi o tamanho das faixas de parâmetros encontradas para o planejamento fatorial inicial, bastante estreitas. Fora das faixas, as soldas se mostraram de resistência insuficiente ou muito danificadas na espessura. Conseguiu-se, portanto, uma variação muito pequena dos parâmetros, dentro da qual encontrou-se resultados satisfatórios para as junções. Sendo assim, não houve razão para qualquer tipo de otimização, mas somente para a realização de um planejamento fatorial inicial e a verificação dos efeitos das variáveis principais e das interações entre elas.

Os parâmetros a serem analisados no planejamento fatorial, como descrito no capítulo 3, foram: corrente de soldagem, tempo de soldagem e pressão dos eletrodos. A faixa ótima de variação conseguida para a corrente e para a pressão dos eletrodos foi mais aberta do que para o parâmetro tempo, dentro de cada escala de unidades. Este parâmetro, portanto, aparentou ser o mais influente, ou seja, a variável de resposta (resistência ao cisalhamento) demonstrou maior sensibilidade com a variação do tempo de soldagem.

O fatorial inicial foi realizado com uma réplica, e os resultados encontrados para resistência ao cisalhamento, resistência ao arrancamento e resistência elétrica podem ser vistos na

tabela 4.14, para as diferentes combinações dos parâmetros. As discussões sobre os valores das propriedades encontrados são mostradas nos itens 4.7.1, 4.7.2 e 4.7.3.

Tabela 4.13 – Resultados do Planejamento Experimental Fatorial Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Al/Al		kA	bar	ciclos	N	N	mΩ
Amostra	Parâmetros	corrente	pressão	tempo	cisalhamento	arrancamento	resistência elétrica
1	cr1pr1tr1	12,0	1,5	4	633,7	268,8	0,18
2	cr1pr2tr1	12,0	2,0	4	780,9	275,2	0,18
3	cr1pr1tr2	12,0	1,5	5	678,5	211,2	0,18
4	cr1pr2tr2	12,0	2,0	5	467,3	192,0	0,19
5	cr2pr1tr1	13,0	1,5	4	780,9	300,8	0,18
6	cr2pr2tr1	13,0	2,0	4	889,7	492,9	0,18
7	cr2pr1tr2	13,0	1,5	5	710,5	230,4	0,18
8	cr2pr2tr2	13,0	2,0	5	864,1	403,3	0,18

No anexo I, encontra-se o cálculo estatístico dos efeitos das variáveis de entrada e de suas interações, através do teste de hipótese t-Student, utilizando-se o programa JMP. Conforme comprovado nestes cálculos, nenhuma das variáveis de influência em específico causou efeito considerável na variável de resposta. O fator tempo foi o que mais poderia influenciar a resposta, mas seu efeito, apesar de maior que os outros, ainda foi insuficiente para passar no teste de hipótese, e ser considerado o parâmetro mais importante.

A região ideal para soldagem da junção alumínio/alumínio por resistência, conforme explicado anteriormente, e utilizando-se os próprios níveis do planejamento fatorial inicial, é mostrada na tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Região do Planejamento Experimental Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Al/Al	kA	bar	ciclos	N
Parâmetros	corrente	pressão	tempo	cisalhamento
Faixa ótima	12,0 – 13,0	1,5 – 2,0	4 – 5	467,3 – 889,7

4.7.1 Resultados do Ensaio de Cisalhamento

Os resultados de resistência ao cisalhamento variaram bastante, conforme visto na tabela 4.14, principalmente pelo fato de que a variável de resposta é dependente de um fator físico bastante complexo, que é a fusão. A variação entre o menor e o maior valor de resposta foi de 90,4 %, bastante alta, o que corresponde à afirmação anterior. Descartando-se a amostra 4, que aparenta ser um ponto fora da faixa de resposta, consegue-se reduzir esta variação para 40,4%, valor comparável a alguns resultados de junções soldadas por ultra-som. De qualquer modo, todas as junções foram aprovadas quanto à especificação de projeto, de 100 N.

A maior parte das amostras rompeu através de rasgamento do metal base, próximo ao ponto de solda, demonstrando boa soldabilidade das junções, como se pode ver na figura 4.13. Todavia, ao se comparar os valores de cisalhamento encontrados com os valores especificados por norma RWMA, que pede aproximadamente 3000 N de resistência ao cisalhamento para esta espessura de alumínio (sem definição da liga), concluiu-se a baixa resistência das junções aqui soldadas. Isto se deveu a algumas dificuldades descritas a seguir.

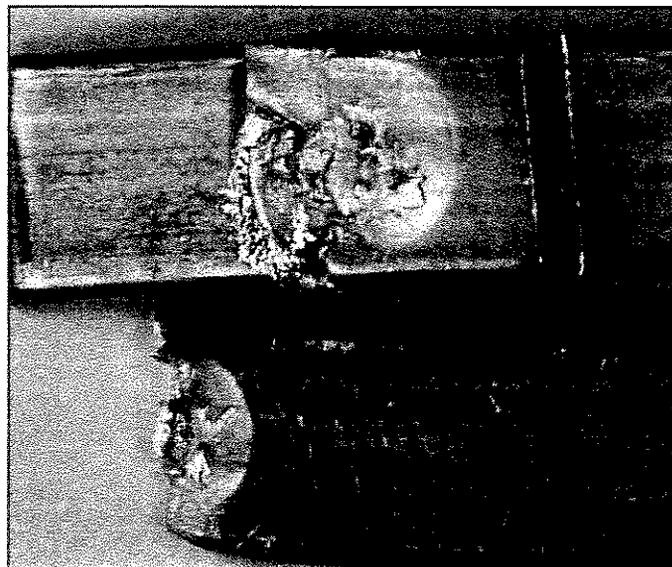


Figura 4.13 – Rasgamento do Alumínio no Ponto de Solda Cisalhado das Junções Alumínio/Alumínio. 7,5x.

Primeiramente, de acordo com MARQUES (1991) e MACHADO (1996), o alumínio

soldado é geralmente mais fraco do que o metal base da mesma composição, ainda mais o alumínio puro, que é mole e não foi ligado à elementos de liga que pudessem lhe conferir maior resistência.

Teoricamente, o material alumínio puro, de acordo com tabelas dos fabricantes de equipamentos, é um metal de difícil soldabilidade devido a sua alta condutividade elétrica. As correntes necessárias para soldagem foram altas, e ainda, encontrou-se dificuldade para a formação do ponto fundido, pois um ajuste exato de pressão e tempo de soldagem eram importantes para que o material fundido não fosse expulso do ponto, devido à alta maleabilidade do metal. A teoria diz que a soldabilidade da liga 1100 é considerada muito boa, exceto para soldagem por resistência a ponto (KAISER, 1978). As dificuldades da soldagem a ponto do alumínio aumentam com a diminuição da resistência mecânica do metal base e com o aumento da condutividade elétrica, características básicas da liga 1100-O. O alumínio puro tornou-se, então, possível de solda a ponto sob certas condições.

Além destes problemas inerentes ao tipo de liga escolhida, uma camada de alumínio foi sendo depositada gradualmente nas faces dos eletrodos de cobre, deixando-os com baixa condutividade, e causando a adesivagem destes nas peças, chegando até à fusão do metal base no eletrodo superior. Esta camada teve de ser retirada através de lixas abrasivas, porém sem causar danos no formato original dos eletrodos, segundo procedimento descrito por JEFFERSON (1997). Os óxidos apresentados na superfície do alumínio diminuía a vida dos eletrodos através da adesivagem. Além disso, estes mesmos óxidos aumentavam sua resistência elétrica, afetando a quantidade de calor produzida durante a soldagem por resistência. Assim era sempre necessário um aumento da potência do equipamento com o número de soldas, o que resultou numa variação ampla na resistência mecânica da junção dos pré-testes soldados (SAE HANDBOOK, 1995). Assim, todos os pré-testes foram soldados com um eletrodo diferente do eletrodo novo com o qual se soldou as amostras para o planejamento fatorial, além de que uma limpeza mecânica nos eletrodos ia sendo realizada a cada solda.

Outro problema que pode ter diminuído a resistência mecânica das junções foi que o alumínio, após a soldagem, geralmente apresenta poros, devido à rejeição de hidrogênio durante a solidificação, já que existe uma alta razão entre o volume de hidrogênio que pode ser absorvido pela poça de fusão e a grande solubilidade deste gás no alumínio a temperaturas elevadas. Estes poros diminuem a região soldada fundida, abaixando, assim, a resistência mecânica da solda. Algumas soldas apresentaram certa porosidade quando visualizadas por microscopia. Nenhuma porosidade foi considerada em grande quantidade para haver descarte das amostras do planejamento fatorial.

Outros fatores desfavoráveis para se ter conseguido valores baixos de resistência mecânica foram a limitação da sobreposição e largura necessárias para se formar um ponto de diâmetro suficientemente grande para esta espessura. Os valores sugeridos por MACHADO (1996) para a soldagem de junções alumínio/alumínio e os valores reais limites utilizados neste experimento são mostrados na tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Valores Sugeridos e Utilizados para Soldagem de Junções Alumínio/Alumínio de 1,8 mm de Espessura.

Parâmetro	Valor Sugerido	Valor Real Utilizado
Diâmetro do Eletrodo (mm)	6,7	3,5
Largura de sobreposição (mm)	17,4	7,0
Distância da borda (mm)	8,7	1,5
Diâmetro do ponto (mm)	7,30	aprox. 4,0

Na tabela 4.16, verifica-se que, inicialmente, o diâmetro do eletrodo sugerido deveria ser maior do que o real utilizado, formando, conseqüentemente, um ponto fundido de maior diâmetro. Para que este eletrodo de maior diâmetro pudesse ser empregado, a largura de sobreposição e a distância da borda sugeridas deveriam ser obedecidas. Esta tabela ajudou a responder o questionamento quando à diferença mecânica encontrada entre o experimento e as especificações da literatura. Todos os valores sugeridos dos parâmetros descritos na tabela poderiam ser aplicados se não fosse a limitação das dimensões da peça. Portanto, concluiu-se que, para se atingir os valores normatizados, este processo não foi ideal para soldagem destas junções de pequenas dimensões.

Além da diminuição da resistência mecânica da solda, esta pouca sobreposição contribuiu para a diminuição da vida dos eletrodos, os quais são pressionados sobre junções pouco firmadas umas sobre as outras. A pouca sobreposição causou, inclusive, expulsão do material da interface das peças. A quantidade de expulsão, já comentada no capítulo 3, foi causada também por excessivo calor gerado por altas correntes de soldagem e falta de pressão dos eletrodos para segurar o material fundido dentro de um anel de força. Em algumas das soldas foi verificada expulsão de material, causando vazios na junção, diminuindo sua resistência mecânica. Todas as soldas do planejamento fatorial foram rigorosamente controladas quanto a este fator.

Os outros parâmetros que conferem qualidade à solda foram também verificados. A indentação (deformação da superfície) de todas as soldas do planejamento fatorial atingiu aproximadamente 10% a 15% da espessura individual de cada peça, faixa de valores aceitável. A indentação aumentou com a corrente e a pressão dos eletrodos. Para estes valores entre 10% e 15% de indentação, não houve interferência na resistência ao cisalhamento da solda (WU, 1968). O eletrodo utilizado neste trabalho, com raio chanfrado, contribuiu para a pequena indentação.

Algumas das soldas dos pré-testes apresentaram distorção das tiras devido à pequena distância deixada entre os pontos e as bordas das peças. As soldas para o planejamento fatorial foram realizadas de modo a não ocorrer distorção nas peças. Outro fator de qualidade verificado foi a separação entre as tiras após a soldagem. Esta separação deve ser de no máximo 10% da espessura das duas peças, sendo que, neste trabalho, nenhuma amostra atingiu este valor de porcentagem. Quanto maior a separação, maior o momento fletor sobre a junção quando solicitada pelo cisalhamento, prejudicando os resultados do ensaio.

A figura 4.14 mostra uma junção soldada com qualidade: pouca indentação, circularidade do ponto, e nenhuma distorção das peças. Na figura 4.15, vê-se uma imagem de um ponto de solda com indentação de aproximadamente 16% e formação de vazio dentro do ponto de solda. A indentação foi causada pela alta corrente aplicada na peça, de 13,5 kA, ao se realizar os pré-testes. O grande vazio foi causado por falta de pressão (1,5 bar) para “segurar” o material fundido dentro

do ponto, não correspondendo ao alto valor de corrente aplicado e ao baixo tempo de solda. Houve um aquecimento muito rápido da interface entre as chapas, não permitindo a dissipação de calor para o restante do material, expulsando-o para fora da interface.

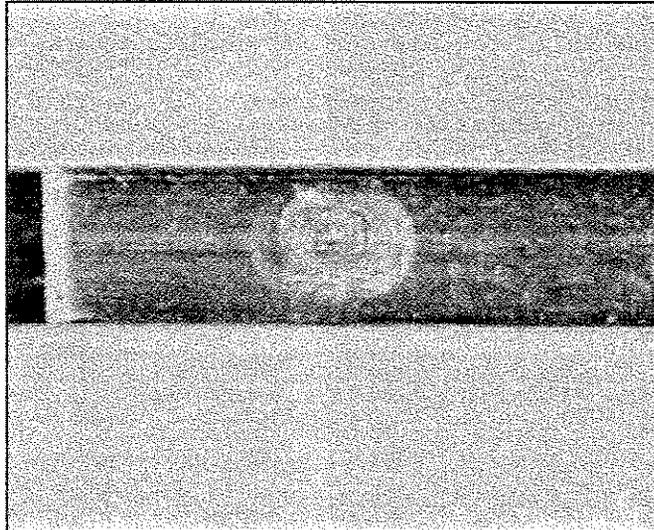


Figura 4.14 – Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Resistência a Ponto. 5,0 x.

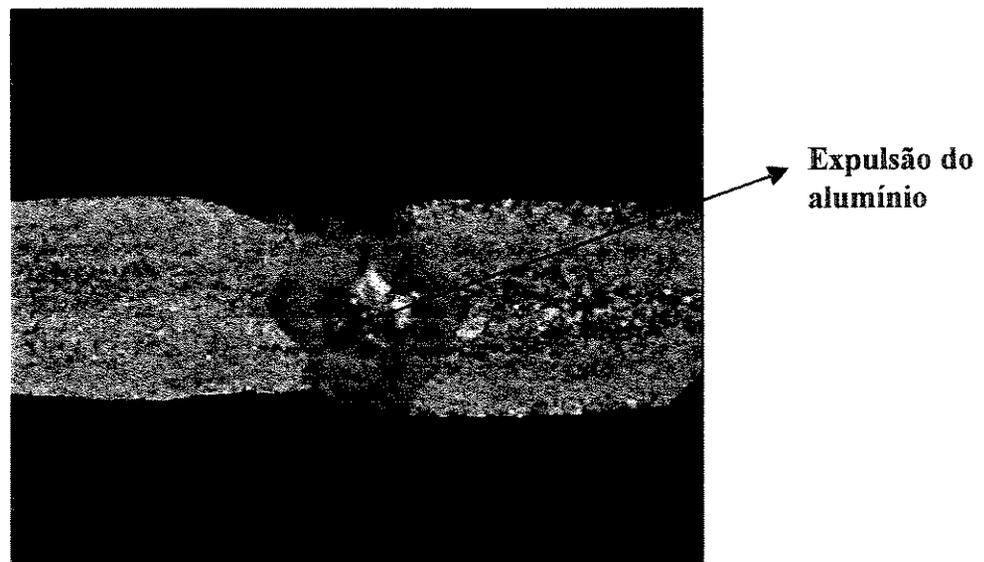
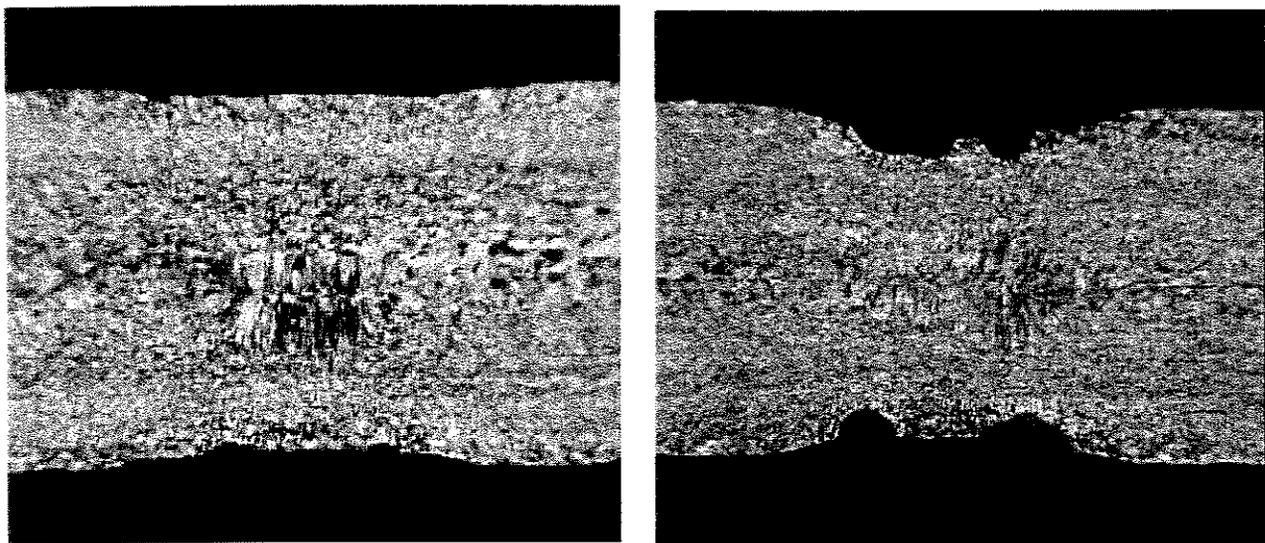


Figura 4.15–Presença de Indentação e Vazios na Solda de Junção Alumínio/Alumínio. 5,0 x.

Outras características de qualidade que foram observadas, de modo a aumentar a resistência ao cisalhamento, foram a penetração e a simetria da poça de solda com relação à

interface. Através de microscopia óptica, mediu-se a penetração do ponto de solda nas duas partes do metal base para as amostras que apresentaram maior (1) e menor (2) resistência ao cisalhamento. As amostras são mostradas na figura 4.16 (1) e 4.16 (2), permitindo uma comparação entre cada condição de soldagem das junções.



(1)

(2)

Figura 4.16 – Interfaces das Junções Alumínio/Alumínio. (1) Maior Resistência ao Cisalhamento. 30x. (2) Menor Resistência ao Cisalhamento. 30x.

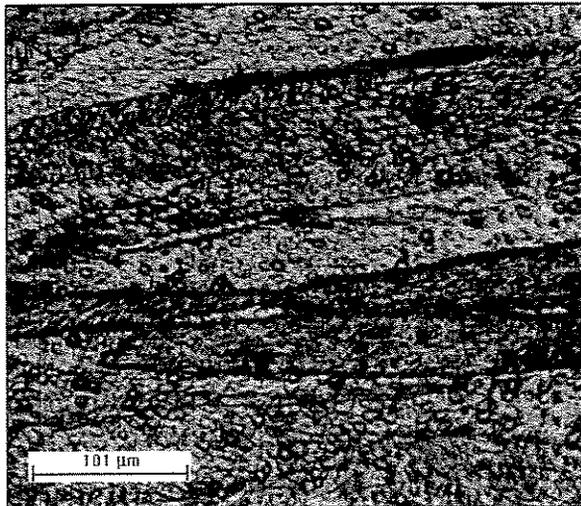
A amostra da figura 4.16 (1), referente à maior resistência ao cisalhamento, apresentou uma penetração maior nas peças, confirmando os resultados do ensaio mecânico. Os valores da penetração e do diâmetro encontrados para estas amostras, com condições de maior e menor resistência ao cisalhamento, são vistos na tabela 4.17. A penetração para uma solda de qualidade aceita é de 20% a 80% da espessura das peças. Em todos os casos, as amostras analisadas microscopicamente apresentaram penetrações dentro desta faixa. As lentes de solda mostraram-se bem formadas, consistindo de simetria da poça de fusão nos eixos vertical e horizontal, uniformidade e alinhamento do ponto, a partir da interface das peças. Analisando-se a tabela 4.14, notou-se que os maiores valores de resistência ao cisalhamento ocorreram para as junções

soldadas com maior valor de corrente, dependendo também dos níveis alto e baixo dos parâmetros tempo e pressão. Esta maior corrente foi capaz de concentrar maior quantidade de calor na interface entre as peças, fundindo mais material, e com isso, aumentando o diâmetro do ponto.

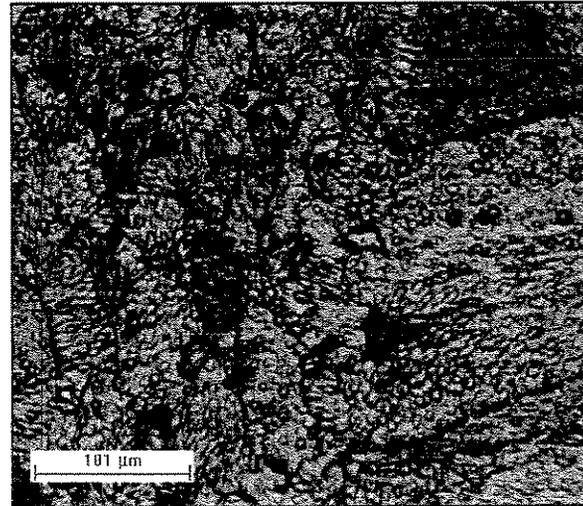
Tabela 4.17 – Características dos Pontos Soldados Cisalhados.

Amostra	Maior resistência	Menor resistência
Penetração Total (mm)	0,74	0,66
Diâmetro do Ponto (mm)	4,94	3,67

Como ilustração, na figura 4.16, pode-se visualizar os grãos colunares formados na zona fundida, alinhados para o centro do ponto. Na figura 4.17 (1), tem-se a mesma amostra, com maior aumento, mostrando os grãos colunares, na zona fundida, e na figura 4.17 (2), é mostrada a zona de ligação, com os grãos recristalizados do metal base. O conjunto destas estruturas indica as formações existentes em um ponto soldado por fusão.



(1)



(2)

Figura 4.17 – Microestruturas da Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Fusão. (1) Grãos Colunares na Zona Fundida. (2) Crescimento Epitaxial na Zona de Ligação.

4.7.2 Resultados do Ensaio de Arrancamento

Os valores de arrancamento também apresentaram variação considerável, mas todos encontraram-se acima do especificado pela empresa, devido à fusão que ocorreu nas peças. A grande variação se deveu aos mesmos fatores descritos anteriormente para o ensaio de cisalhamento. Parte da variação para este ensaio pode ter sido também causada pela sua simplicidade. Apesar disto, este ensaio é normalizado para este tipo de solda. Pela norma de ensaio de arrancamento para solda ponto, os resultados são apresentados qualitativamente, ou seja, são as características do ponto arrancado a serem examinadas, sem qualquer quantificação numérica de valores de resistência. Sendo assim, esta forma manual de realização das medições, assim como para a soldagem por ultra-som, deve ser entendida somente como uma indicação inicial da qualidade da solda quanto à resistência mecânica.

Para as amostras arrancadas, realizou-se medições dos diâmetros do ponto nas uniões que resultaram na maior e na menor resistência, que são mostradas na figura 4.18 (1) e 4.18 (2), respectivamente. Na tabela 4.18, tem-se os resultados de medição do diâmetro equivalente dos pontos soldados para cada uma das junções, de modo a se poder comparar os valores e criar relações entre estes e os valores de resistência alcançados.

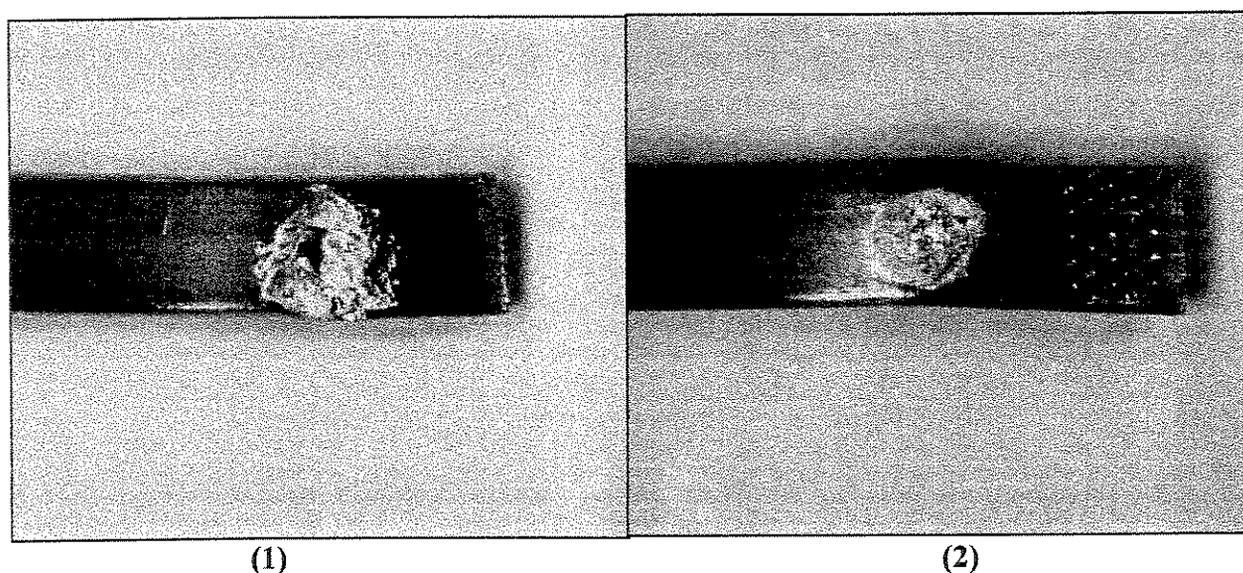


Figura 4.18 – Junções Alumínio/Alumínio Arrancadas. (1) Maior Resistência ao Arrancamento. 5,0 x. (2) Menor Resistência ao Arrancamento. 5,0 x.

Tabela 4.18 – Características dos Pontos Soldados Arrancados.

Amostra	Maior resistência	Menor resistência
Diâmetro equivalente (mm)	4,25	4,08

Os pontos soldados abertos apresentaram-se bem formados, com boa circularidade, e, ao serem ensaiados, houve arrancamento de material de uma peça por outra, mostrando certa ductilidade do material soldado. Os mesmos resultados referentes às amostras cisalhadas foram aqui encontrados: o maior diâmetro equivalente corresponde à amostra de maior resistência ao arrancamento, devido à maior área unida das peças, por ter sido soldada com maior corrente.

4.7.3 Resultados do Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados de medição de resistência elétrica das junções apresentaram-se praticamente iguais para todas as condições de soldagem. Os resultados podem ser vistos na tabela 4.14. As medições foram realizadas a 20°C, e os valores transformados para a faixa de temperatura de trabalho da peça estão na tabela 4.19, onde se utilizou o coeficiente de temperatura do alumínio e a equação 4.1.

Tabela 4.19 – Valores de Resistência e Resistividade Elétrica para Diferentes Temperaturas Para a Junção Alumínio/Alumínio.

Temperatura (°C)	Resistência corrigida (mΩ)	Resistividade ($\cdot 10^{-6} \Omega.m$)
-32	0,14	0,040
20	0,18	0,045
230	0,33	0,055

FONSECA (1999) cita que a resistividade varia conforme o tamanho do ponto. Na tabela 4.14, encontrou-se que o ponto com menor resistência ao cisalhamento apresentou maior

resistência elétrica. Este ponto mostrou, devido à menor resistência mecânica, menor diâmetro, e portanto, menor área de soldagem. Segundo FONSECA (1999), quando a área fundida é pequena ou não existe, o caminho de condução da eletricidade é insuficiente, apresentando um alto valor de resistividade da junção. Este tipo de análise é interessante no que diz respeito a sua utilização como meio de averiguação da qualidade mecânica da solda. Através do estabelecimento de uma razão entre a resistência elétrica da junção e valores de referência para cada tipo de material e espessura (realizando-se medições de corrente elétrica), é possível se encontrar o valor da área soldada da junção, o que mostra, conseqüentemente, o comportamento mecânico da junção. Este método favorece, ainda, a descoberta da existência de vazios ou trincas no ponto soldado, e é válido somente para chapas de pequenas espessuras.

4.8 Soldagem da Junção Cobre/Cobre

A soldagem da junção cobre/cobre foi dificultosa para realização devido a sua alta condutividade elétrica, fazendo com que a corrente de soldagem passasse diretamente pela interface das peças, sem que ficar retida e concentrar calor na região. Várias tentativas foram testadas, com 3 equipamentos de diferentes potências, sem se obter qualquer tipo de união confiável. Não se encontrou tabelas de valores de parâmetros para soldagem deste material, assim como para qualquer liga de cobre.

O equipamento de maior potência utilizado, com capacidade para obtenção de maiores correntes de soldagem (o que poderia gerar e manter maior calor na interface), além de exercer alta pressão dos eletrodos nas peças, danificando-as (figuras 4.20 – 1, 3 e 4), não conseguiu atingir um tempo de soldagem curto para que este calor não fosse rapidamente dissipado. Esta alta pressão deveu-se ao tamanho do cilindro pneumático instalado no equipamento, fazendo com que o eletrodo superior descesse com alta pressão, mesmo fixando-se esta no valor mínimo. A pressão fixada neste valor mínimo, muitas vezes, fez com que a corrente de soldagem passasse sem que os eletrodos estivessem em contato com as peças, causando estouros de curto-circuito. Outra tentativa foi a diminuição da velocidade de descida do cabeçote do eletrodo superior, o que

também causou estouros durante as soldagens, e não diminuiu o tempo de soldagem, devido à inércia mecânica.

Utilizando-se um equipamento de menor cilindro pneumático, a pressão dos eletrodos foi regulada para não gerar danos nas peças. Porém, os equipamentos com estes cilindros possuíam menor potência (30 kVA e 50 kVA), o que não foi suficiente para se soldar a junção. Em alguns casos, como na figura 4.20 (5), a mais alta corrente de soldagem não era suficiente para causar qualquer tipo de fusão nas peças, devido, justamente, a sua alta condutividade. Em outros casos, como o das figuras 4.20 (2 e 6), a corrente era desviada para as laterais das peças, onde ela se concentrava, gerando calor e fusão. Não houve, neste caso, formação de ponto de solda, mas somente uma fusão de material na parte lateral externa das peças, de onde o calor concentrado tinha menor área para se dissipar.

Outro parâmetro variado para se conseguir algum resultado foi a face dos eletrodos. Primeiramente, utilizou-se eletrodos de ponta de tungstênio, com raio da face de 3,5 mm, abaulado nas bordas, para não danificar o material, como nas soldagens das junções anteriores (figura 4.19 - 2). Como este eletrodo aparentou distribuir a corrente e não formar nenhum indício de ponto de solda, trocou-se este por outro eletrodo, desta vez com face circular, com raio de 75 mm, para que a corrente pudesse se concentrar em um único ponto, e portanto, passar através da interface das peças com maior intensidade (figura 4.19 - 1). Este último eletrodo, apesar de mostrar junções com maior dificuldade de arrancamento manual do que as outras, ainda não conseguiu formar um ponto de solda, devido à combinação insuficiente dos outros fatores. Outro problema encontrado com relação aos eletrodos foi a adesivagem de cobre nestes, ocorrendo inclusive a fusão do cobre junto ao tungstênio do eletrodo. Isto ocorreu para altas correntes de soldagem, acima de 15,0 kA, devido à formação de maior resistência elétrica entre a interface da peça e a do eletrodo, cujo material é de menor condutividade elétrica do que o cobre, e é bastante resistivo termicamente. Talvez utilizando-se um eletrodo de outro material, como o molibdênio, ou o volfrâmio-cobre, esta fusão do cobre no eletrodo não ocorreria. Da mesma forma, realizando-se um pré-aquecimento do cobre anterior à soldagem, aumentaria sua resistividade, com a retenção de maior quantidade de calor no material cobre, o que diminuiria sua adesivagem

nos eletrodos, já que a maior resistência passaria a ser na interface das peças, e não mais na interface eletrodo-peça.

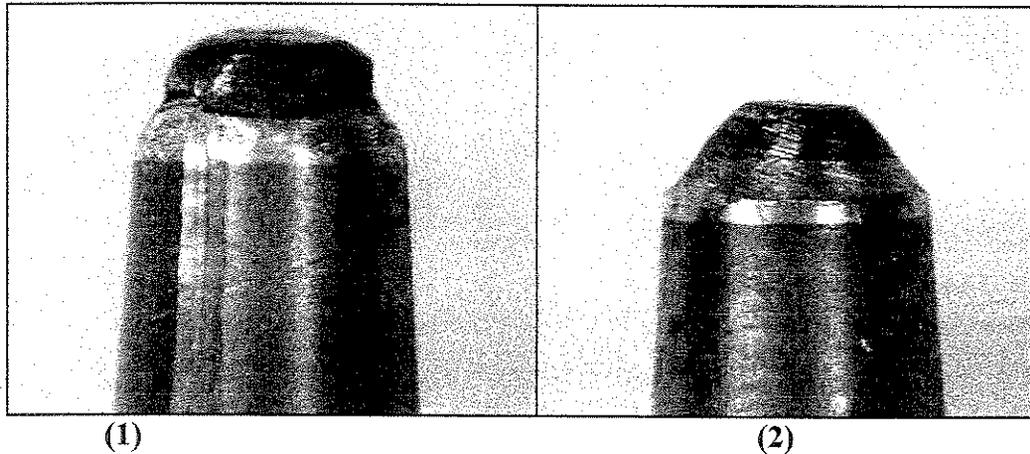


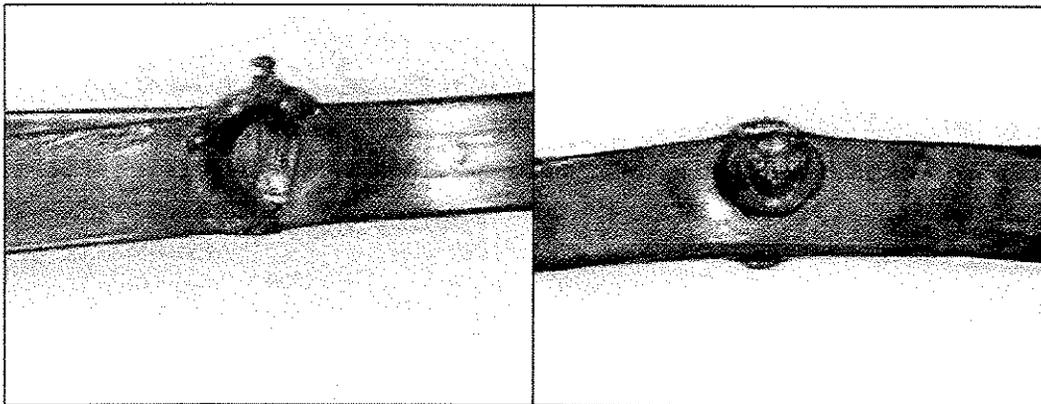
Figura 4.19–Fases dos Eletrodos Utilizados Para a Soldagem da Junção Cobre/Cobre. 5,0 x.

O equipamento mais apropriado para este tipo de soldagem, segundo fabricantes de equipamentos de resistência, deveria apresentar as seguintes características, podendo-se manter o mesmo comando de solda:

- pressão dupla, no qual a pressão ao final da solda, durante solidificação dos metais, pudesse ser aumentada, de modo a segurar a poça de fusão dentro da interface da junção, e para que esta se solidificasse mais rapidamente;
- alta potência (aproximadamente 150 kVA), para geração de altas correntes de soldagem, capazes de fundir este material;
- baixo atrito na descida do cabeçote de soldagem, de modo a diminuir a inércia de movimentação descida/subida do eletrodo superior, contribuindo para a diminuição do tempo de soldagem, (tempos da ordem de 1ms), e facilitando uma soldagem com maiores temperaturas, em tempos mais curtos;
- transformador de núcleo ferrítico;
- unidade de soldagem de média frequência (1000 Hz).

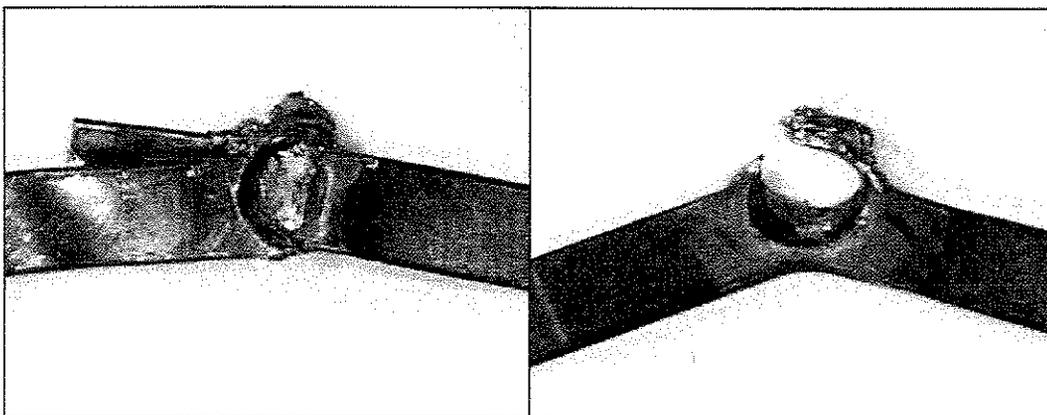
Sabe-se que este tipo de equipamento, ainda pouco utilizado atualmente no Brasil, é capaz de soldar cobre puro de espessuras de até 0,4 mm. Testes para espessuras maiores, como no caso deste trabalho, devem ser conduzidos para verificação da possibilidade de soldagem.

As junções formadas por um equipamento com estas características poderiam, ainda, apresentar resistência mecânica comprometida, pois o cobre puro, livre de oxigênio, não contém elementos desoxidantes, o que aumenta suas propriedades mecânicas, mas deixa o metal suscetível à oxidação interna devido ao aquecimento ao ar a temperaturas elevadas. Isto faz com que o cobre absorva oxigênio durante a soldagem, formando um óxido de cobre. As soldas geradas são, portanto, de menor qualidade (AWS, 1989).



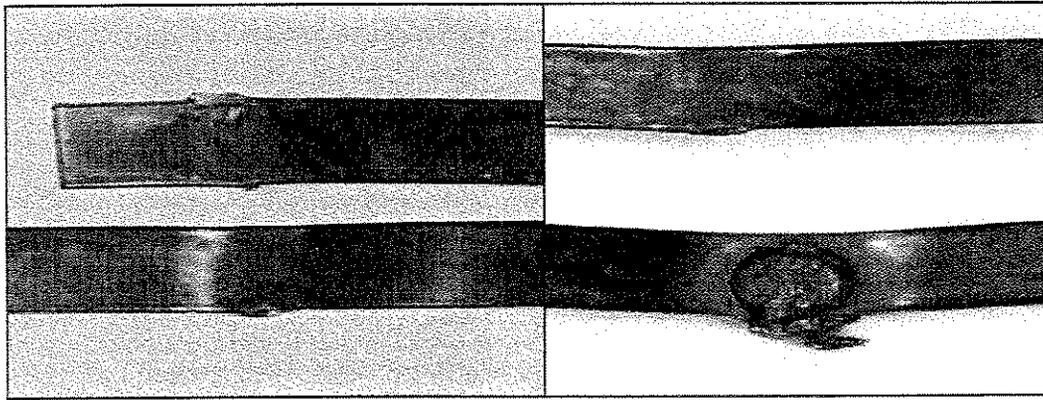
(1)

(2)



(3)

(4)



(5)

(6)

Figura 4.20 – Tentativas de Soldagem de Junções Cobre/Cobre. 5,0 x.

4.9 Soldagem da Junção Alumínio/Cobre

Conforme explicado no capítulo 3, a soldagem por resistência de alumínio/cobre não mostrou-se adequada, devido às diferenças de propriedades físicas existentes entre estes metais. Alguns autores falam de soldagem de metais dissimilares (MACHADO, 1996, RWMA, 1946), mas não especificamente da soldagem de alumínio com cobre. Sendo assim, todos os passos sugeridos para soldagem de dissimilares foram seguidos, mas não obteve-se êxito nos experimentos. Na soldagem de alumínio/cobre por fusão, há diminuição da resistência mecânica da junção devido à formação de um eutético na zona de transição, indicado pela microdureza desta região, como pode ter ocorrido no caso deste trabalho (MOZHAIKAYA, 1991).

As características mais importantes, diferenciadas entre os dois metais, que influenciaram a soldabilidade da união foram: condutividade elétrica e térmica, características de expansão, natureza e condição do filme das superfícies, resistividade a alta temperatura e formação das zonas fundida e afetada pelo calor.

Para materiais de maior expansão térmica e de maior condutividade térmica, como o cobre, onde o encolhimento ocorre rapidamente, seria necessária maior força do eletrodo imediatamente

após o pulso da corrente para evitar este fenômeno, e também cavidades e trincas. Para materiais com maior resistividade elétrica a quente, como o alumínio, haveria a necessidade de maior força dos eletrodos para manter um selamento em volta do metal fundido. A ZAC de ambos os metais é sempre amolecida na solda, sendo importante limitar este fator através da utilização de tempos de soldagem mais baixos. Em todos os equipamentos disponíveis, não existia a opção de variação da força dos eletrodos durante a solda e nem de utilização de tempos curtos de soldagem.

A soldagem desta junção demonstrou:

- alta variabilidade nos resultados dos ensaios de cisalhamento: a maior parte das amostras soldadas variou na faixa entre 300 N e 400 N, valores aceitáveis de acordo com a especificação de projeto, mas ainda muito próximos desta. Outras apresentaram resistência de pouco mais de 100 N, como na figura 4.22 (2), facilmente cisalhada, mas apresentando fusão do alumínio no cobre. Sendo assim, qualquer variação mínima nos parâmetros durante a soldagem, por causas especiais, poderia comprometer os resultados de ensaios, podendo chegar até a diminuir a resistência para abaixo do valor especificado de 100 N. Um fato importante de ser citado é que algumas amostras apresentaram resultados de cisalhamento de 800 N, tendo sido soldadas com os mesmos parâmetros de soldas de menor resistência. Estas amostras romperam com o rasgamento do alumínio próximo ao ponto soldado, demonstrando, neste caso, uma junção resistente, como na figura 4.22 (1). Para verificação de possíveis erros do equipamento de ensaio, mais amostras foram testadas, mostrando esta mesma faixa alta de resistência;
- baixa resistência mecânica ao arrancamento, fazendo com que o mínimo esforço manual neste sentido desfizesse a união dos metais;
- grande dificuldade de descoberta de parâmetros capazes de garantir uma mínima união dos metais;
- alta variação no aspecto visual de soldas de mesmos parâmetros, com a existência de defeitos como: alta porcentagem de deformação de espessura (principalmente do alumínio), expulsão do alumínio da poça de soldagem, distorção das peças, fusão do alumínio no eletrodo de cobre e fusão do cobre no eletrodo de tungstênio.

Com toda esta problemática de soldagem e as variações de resultados encontradas para

uma mesma combinação de parâmetros, não foi possível se considerar qualquer amostra como possível de aceitação para aplicação na peça automotiva.

A figura 4.21 traz uma amostra alumínio/cobre soldada por resistência, na qual pode-se visualizar certas características de qualidade: pouca indentação, nenhuma distorção nas peças, pouca separação das peças. A amostra apresenta, porém, uma certa quantidade de expulsão de alumínio lateral (4.21 – 1). Na figura 4.21 (2), vê-se o alumínio fundido na interface com o cobre.

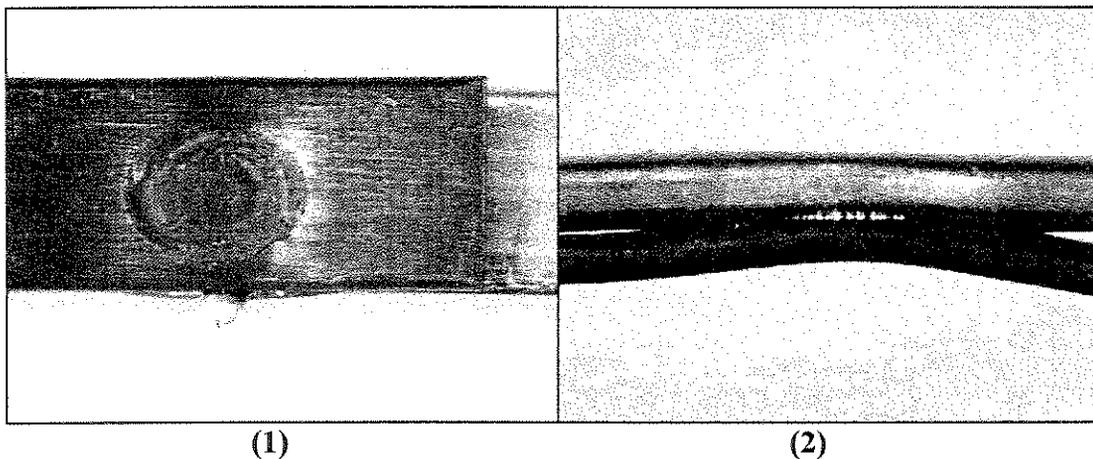


Figura 4.21 – Junção Alumínio/Cobre Soldada por Resistência a Ponto. (1) Expulsão do Alumínio na Junção. 5,0 x. (2) Fusão do Alumínio no Cobre. 5,0 x.

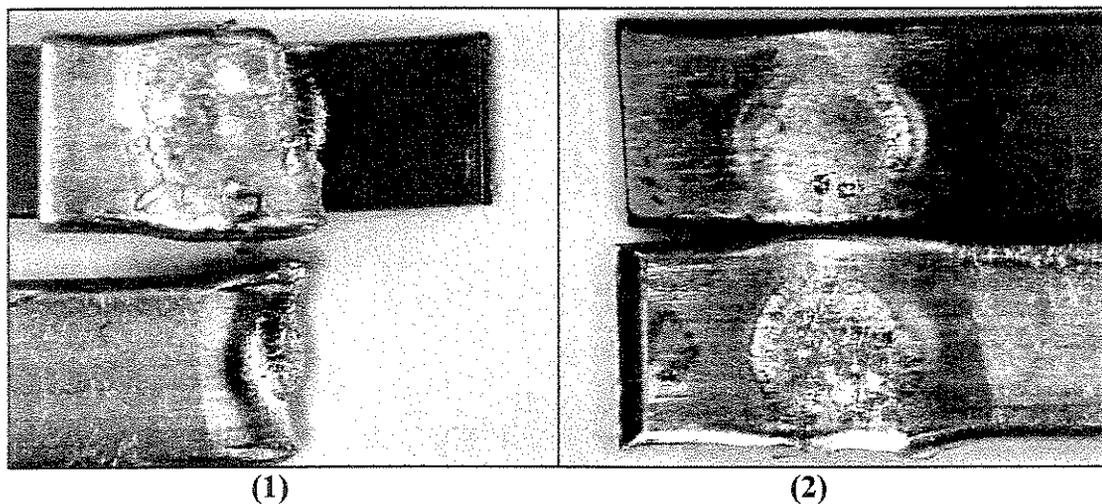


Figura 4.22 – Junções Alumínio/Cobre Cisalhadas. 5,0 x.

Como complementação de informações sobre a soldagem, foi também medida a resistência elétrica das junções soldadas, obtendo-se valores entre 0,18 e 0,19 mΩ. As mesmas considerações para solda por ultra-som desta junção podem ser feitas no que diz respeito à passagem de corrente elétrica pela junção de metais dissimilares.

Para aplicações que requeiram somente esforços baixos no sentido de cisalhamento da junção, este processo até poderia ser utilizado no sentido de substituir um processo de brasagem, no qual a utilização de material de adição encarece a operação, ou um processo de ultra-som, cujo equipamento é de alto custo. Porém, um histórico detalhado das amostras, seguido por um controle estatístico e de qualidade, deveria ser conduzido.

4.10 – Comparação dos Resultados

- **Junção Alumínio/Alumínio**

Para os processos de ultra-som e resistência, a junção alumínio/alumínio apresentou soldabilidade. A liga de alumínio 1100-O, não-tratável termicamente, de alta pureza, pôde ser soldada facilmente por um processo no estado sólido, com metais similares e dissimilares. Já para um processo envolvendo fusão, alguns cuidados a mais tiveram de ser tomados. De acordo com AWS (1989), junções ultra-sônicas de alumínio puro obtém praticamente a mesma resistência mecânica que junções soldadas por resistência a ponto, assim como neste trabalho. Os resultados do ensaio de cisalhamento foram bastante próximos para ambos os processos, tornando difícil a escolha entre eles somente através desta propriedade. Já os resultados do ensaio de arrancamento foram maiores para o processo de resistência, o que indicou que o fenômeno da fusão é mais consistente na direção deste esforço.

Apesar dos problemas encontrados durante a fusão do alumínio, como a expulsão de material, a adesivagem de metal nos eletrodos, a problemática da alta condutividade elétrica deste metal, o processo de resistência a ponto foi o mais eficaz com relação aos resultados esperados para caracterização da junção, principalmente com relação aos resultados de arrancamento,

esforço importante aplicado sobre a junção quando em trabalho.

Além disso, deve-se considerar que, para a realização dos ensaios, os corpos-de-prova empregados apresentaram iguais dimensões para ambos os processos. Portanto, na comparação entre estes eles, é necessário salientar que o tamanho do ponto de solda por resistência é uma função do tamanho do eletrodo e da ajustagem da máquina para cada liga e espessura, podendo-se aumentar a resistência mecânica da junção ao se aumentar o diâmetro do ponto soldado. O ponto de ultra-som é geralmente maior, e ainda assim, neste trabalho, gerou junções com resistência mecânica menor do que os pontos fundidos por resistência. As áreas de soldagem, geradas por cada um dos processo, foram as maiores possíveis, de acordo com suas características de funcionamento. Uma realidade, porém, a favor do ultra-som, foi a sua maior capacidade de repetibilidade de resultados, quanto à resistência ao cisalhamento, por exemplo, do que soldas por resistência, e ainda, a menor deformação de espessura atingida.

Outra vantagem do processo de ultra-som, agora com relação à resistência elétrica das junções, é que a fusão do alumínio, muitas vezes, pode causar porosidades no ponto fundido, o que aumenta esta propriedade, dificultando a passagem de corrente elétrica. No caso deste trabalho, a resistência das junções soldadas por resistência somente foi menor do que a das soldadas por ultra-som pois a área de ligação fundida foi menor do que a área difundida por ultra-som. Outro fato importante neste caso é que o óxido de alumínio, não retirado no processo por resistência, pode aumentar a resistência da junção. Além das vantagens já citadas para o ultra-som, pode-se ainda dizer que este foi um processo rápido, de única e simples operação, sem danos ao operador e ao meio-ambiente.

- **Junção Cobre/Cobre**

A junção cobre/cobre mostrou-se de grande dificuldade de soldagem por resistência, devido a sua alta condutividade elétrica e conseqüente impossibilidade de manter calor para fusão da interface das peças. Assim sendo, torna-se necessária a utilização de equipamentos de soldagem por resistência especiais para este tipo de liga. A substituição do cobre puro por uma liga menos

condutiva, na soldagem por fusão, poderia trazer resultados semelhantes ou melhores aos do ultra-som para as propriedades mecânicas estudadas.

Por outro lado, a soldagem deste material no estado sólido trouxe resultados satisfatórios em todos os quesitos necessários para a utilização da peça. As resistências ao cisalhamento e ao arrancamento foram bastante altas quando comparadas ao valor especificado por engenharia. A resistência elétrica foi a mais baixa de todas as junções soldadas, favorecendo a utilização desta união em casos de correntes elétricas mais altas.

A soldagem de cobre/cobre por ultra-som não apresentou nenhum problema prático, muito pelo contrário, tanto a realização de pré-testes para se encontrar os níveis do primeiro planejamento fatorial, como a otimização dos parâmetros do processo, foram de grande facilidade quando comparados às das outras junções. Desta forma, tornou-se possível a minimização da quantidade de experimentos e de etapas no SAS, através também da utilização do bom senso, isto é, a quantidade de etapas de otimização do SAS pôde ser diminuída, pois já se tinha atingido o nível desejado da variável de resposta.

Assim sendo, a junção cobre/cobre soldada por ultra-som foi a que apresentou os melhores resultados inclusive entre todas as outras junções soldadas pelos dois processos. Pode-se tentar explicar este fato através da combinação e do estudo de diversos fatores: material mais resistente que o alumínio, maior facilidade de atração atômica entre átomos, maior capacidade de difusão devido ao menor raio atômico, maior dureza superficial, menor energia livre para formação de óxidos, maior solubilidade. A maior resistência mecânica desta junção pôde ser comprovada também através das micrografias: vazios de menor tamanho e comprimento (são mais espaçados, não formando uma linha contínua de vazios como no alumínio).

- **Junção Alumínio/Cobre**

A soldagem de metais dissimilares mostrou-se dificultosa para ambos os processos. Primeiramente, pelo processo de ultra-som, não se encontrou possibilidade de aumento das

resistências ao cisalhamento e ao arrancamento, devido à insuficiente difusão entre os dois metais e a uma possível formação de composto intermetálico, o que diminuiria a resistência da junção.

Já para o processo de resistência, as diferenças de propriedades físicas dos dois materiais, como as condutividades térmica e elétrica e o ponto de fusão, tornaram a soldagem inaceitável, já que, teoricamente, estas diferenças físicas não favorecem a soldabilidade entre estes metais por serem incompatíveis. Encontrou-se, porém, algumas amostras com alta resistência ao cisalhamento, ultrapassando os valores encontrados no ultra-som. A alta variação dos resultados gerados, porém, prejudicou a escolha do processo de resistência. Para o arrancamento, inclusive, a resistência mecânica encontrada nas junções foi menor que o valor necessário especificado.

Com relação à propriedade de resistência elétrica, é também importante ressaltar que, teoricamente, as condutividades de soluções sólidas difundidas são sempre menores que aquelas dos metais sólidos puros, devido à redução do caminho livre médio de elétrons nos metais. Ou seja, para as junções soldadas por ultra-som, torna-se sempre necessário um exame metalográfico simples, realizado após testes elétricos, podendo ser útil para previsão de falhas devido à falta de condutividade dos metais, causada pela formação de algum intermetálico.

Capítulo 5

Conclusões

Analisando-se os resultados obtidos no desenvolvimento teórico e experimental deste trabalho, concluiu-se que:

Conclusões Gerais

- Para as junções alumínio/alumínio, o processo de soldagem por resistência a ponto mostrou-se mais adequado, por ter gerado uniões de mais alta resistência mecânica, tanto na direção de esforços de cisalhamento como na de arrancamento;
- As junções cobre/cobre foram facilmente soldadas por ultra-som, apresentando os melhores resultados mecânicos e elétricos entre todas as junções estudadas;
- As junções alumínio/cobre, por serem de metais dissimilares, apresentaram grande dificuldade de soldagem através dos dois processos. O ultra-som gerou resultados favoráveis de resistência ao cisalhamento, porém, pecou com relação ao ensaio de arrancamento. O processo por resistência não se mostrou ideal, já que as junções obtidas não obtiveram resistência mecânica quanto ao ensaio de arrancamento.

Conclusões Específicas

- Após a aplicação do MSR para a análise da soldagem por ultra-som, pôde-se verificar, através dos cálculos estatísticos dos efeitos das variáveis de entrada, que os parâmetros energia e pressão foram os mais importantes na soldagem da junção alumínio/alumínio. Para as outras junções, não foi encontrada maior influência por algum parâmetro ou combinação

de parâmetros específica. Assim sendo, considerou-se que os três parâmetros de entrada escolhidos foram da mesma forma importantes para o processo;

- Realizando-se o mesmo cálculo de efeitos dos parâmetros para a soldagem a ponto da junção alumínio/alumínio, observou-se que todas as variáveis de entrada influenciaram da mesma forma o processo. Durante a parte experimental, notou-se uma maior influência do parâmetro corrente de soldagem, o que gerou a faixa estreita de soldagem para esta variável, com relação à capacidade do equipamento;
- O planejamento fatorial completo utilizado no início do trabalho mostrou-se essencial para o desenvolvimento da parte experimental, pois, além de gerar grande economia no tempo de realização das soldagens, conferiu confiabilidade nos resultados, baseando-se em conceitos teóricos. O programa de análise e otimização de processos por meio de superfície de resposta, empregado em seguida, mostrou grande economia na quantidade de amostras necessárias para o experimento por ultra-som, visto que se chegou até uma otimização do processo para cada junção com um número mínimo de amostras. Uma maior quantidade de amostras foi utilizada para se chegar na faixa de parâmetros para o planejamento experimental inicial. O programa demonstrou também a necessidade de conhecimento técnico prévio sobre o assunto estudado, já que, para cada junção, escolheu-se um caminho individual a seguir, gerando quantidades diferentes de amostras;
- Os materiais utilizados neste trabalho não foram adequados para a soldagem por resistência a ponto, devido a sua alta condutividade térmica e elétrica, gerando junções mal formadas, com fusão lateral e expulsão do alumínio;
- O ensaio de cisalhamento mostrou-se uma variável de resposta apropriada para aplicação no MSR, assim como para avaliação do comportamento mecânico das junções;
- O ensaio de arrancamento mostrou-se um bom indicador prático e instantâneo da resistência mecânica das peças. Contrariamente à afirmação do fabricante do equipamento, a teoria aceita a realização deste ensaio;
- O ensaio de resistência elétrica não foi apropriado para os propósitos do trabalho. Não houve praticamente diferença de valores entre as várias combinações de parâmetros, assim como entre as diferentes junções e os dois tipos de soldagem;

- A limpeza das peças soldadas por ultra-som é dispensável, facilitando bastante sua realização industrialmente.

Referências Bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 14360; Fio de Alumínio Nu de Seção Retangular – Especificação. Rio de Janeiro, 1999.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 14193; Fio de Cobre Nu de Seção Retangular – Especificação. Rio de Janeiro, 1998.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 6156; Máquina de Ensaio de Tração e Compressão – Verificação. Rio de Janeiro, 1983.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 6815; Fios e Cabos Elétricos – Ensaio de Determinação da Resistividade em Componentes Metálicos. Rio de Janeiro, 1981. 3 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 6814; Fios e Cabos Elétricos – Ensaio de Resistência Elétrica. Rio de Janeiro, 1985. 3 p.
- ALCAN Alumínio do Brasil S/A. *Manual de Soldagem..* 1993, 69 p.
- AMTECH. *User Manual Ultraweld –20.* 1998.
- American Society for Metals. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy.* Ed. John E. Hatch, 1984.

- American Society for Metals. *Metals Handbook. Metallography, Structures and Phase Diagrams*. v.9, 1973.
- American Society for Metals. *Metals Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. v.2, 1990.
- American Society for Metals. Handbook. Welding, Brazing and Soldering. *The Materials Information Society*, v.6, 1993.
- ASME, *Seção IX, parte Q13; Peel Tests*. 1986.
- American Welding Society. *Introductory Welding Metallurgy*. E.U.A.: AWS. 1968.
- American Welding Society. *Welding Handbook. Metals and Their Weldability*. E.U.A.: AWS. v.4, 1989.
- American Welding Society. *Welding Handbook. Welding Processes: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes*. E.U.A.: AWS. v.3, 1980.
- American Welding Society. *Welding Handbook. Welding Technology*. E.U.A.: AWS. v.1, 1989.
- American Welding Society. *Welding Handbook. Welding Processes*. E.U.A.: AWS. v.2, 1991.
- American Welding Society. C 1.1-66; Recommended Practices for Resistance Welding. E.U.A., 1966.
- American Welding Society. D8.9-97; Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. E.U.A., 1997.
- American Welding Society. D8.7-88; Recommended Practices for Automotive Weld Quality Resistance Spot Welding. E.U.A., 1987.

Borland, J. C. Fundamentals of Solidification Cracking in Welds. *Welding and Metal Fabrication*, v.47, n.1 e 2, p.19-29, 99-107, jan., mar. 1979.

Bresciani Filho, E. *Seleção de Materiais Metálicos*. Campinas: Ed. da Unicamp. 1991.

Button, S. T. *Metotologia para Planejamento Experimental e Análise de Experimentos. Apostila do Curso*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 1999.

Calvo, F.A., Ureña, A., Salazar, J.M.G., Molleda, F. Special Features of the Formation of the Diffusion Bonded Joints Between Copper and Aluminium. *Journal of Materials Science*. v.23, p.2273-2280, 1988.

Carvalho, J.F. *Tópicos em Planejamento de Experimentos – Desenvolvimento de Planos Experimentais Assistido por Computador. Apostila do Curso*. Campinas: Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação, Universidade Estadual de Campinas. 1996.

Centro Brasileiro Para Fomento do Uso do Cobre , B.T. n. 13, CEB.211.41. 2000.

Contacts Metals Welding, *Tabelas de Soldabilidade entre Metais*, 2000.

Damasco, A., Ferreira, I., Azambuja, S., Alcântara, N.G. Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Soldadas a Ponto por Resistência Elétrica ou com Epóxi. *Publicado no I Congresso Ibero-Americano*. Chile, 1998.

EUROSONICS. Informe Técnico PW-2. 1983.

Flinn, R.A. *Copper, Brass and Bronze Castings: Their Structures, Properties & Applications*. E.U.A.: Ed. Non-Ferrous Founder's Society, Inc. 1961.

- Flood, G. Ultrasonic Energy Welds Copper to Aluminum. *Welding Journal*. v.76, n.1, p.43-45, jan. 1997.
- Fonseca, E.O.T. Relação Entre a Resistência Dinâmica e a Resistência Mecânica na Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica. Belo Horizonte: Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, 1999. Dissertação (Mestrado).
- Gean, A., Westgate, S.A., Kucza, J.C., Ehrstrom, J.C. Static and Fatigue Behavior of Spot-Welded 5182-O Aluminum Alloy Sheet. *Welding Journal*. mar, 1999.
- Gedeon, S.A., Sorensen, C.D., Ulrich, K.T., Eagar, T.W. Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds. *Welding Journal*. p. 378s-385s, dez, 1987.
- Gourd, L.M. *Principles of Welding Technology*. Ed. E. Arnold, 1986, 240 p.
- Hao, M., Osman, K.A., Boomer, D.R., Newton, C.J. Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum. *Welding Journal*. jan, 1996.
- Jefferson. *Jefferson's Welding Encyclopedia*. 1997.
- Juran, J.M., Gryna, F.M. *Controle da Qualidade – Handbook – Métodos Especiais de Apoio à Qualidade*. Ed. Makron Books, v.VII, 1993, 193 p.
- KAISER Aluminum & Chemical Sales, Inc. *Welding Kaiser Aluminum*. 1978.
- Kou, S. *Welding Metallurgy*. Canada: A Willey- Interscience Publication, 1987, 410 p.
- Lincoln Electric Company, The. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. 1973.

- Little, R.L. *Welding and Welding Technology*. Ed. McGraw-Hill, 1973.
- Machado, I.G. *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Rio Grande do Sul: Ed. UERS, 1996.
- Marques, P.V. *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte: Ed. ESAB, 1991.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineering Measurements*. Ed. John Wiley and Sons, 1993.
- Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. Ed. John Wiley & Sons, 1984.
- Mozhaiskaya, T.M., Chekanova, N.T. Structure and Properties of Welded Aluminum-Copper Joints. *Metal Science and Heat Treatment*. v.32, n.11/12, p. 938-939, mai, 1991.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Ed. John Wiley & Sons, 1995.
- Nakamura, M. et al. Durability of Al-Cu Hot Pressure Welding Joints. *Wire Journal*. v.10 (4), abr, 1977.
- Neto, B.B., Scarminio, I.S., Bruns, R.E. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Campinas: Ed. da UNICAMP, 1995.
- Peled, A. Farhadyan, J. Zloof, Y. Baranauskas, V. The Midrange and High Temperature Dependence of Vacuum Deposited NiCr Thin Film Resistors. *Vacuum*. v.45, n.1, p. 5 – 10, 1994.
- REDMETAL. *Tabela de Limites de Composição Química*. jun , 2000.
- Resistance Welder Manufacturers' Association. *Resistance Welding Manual*. Ed. Resistance Welder Manufacturers' Association, v.3, 1946.

Resistance Welder Manufacturers' Association. The Limitations of Resistance Weld Controllers. *Welding Journal*. v.74, n.4, abr, 1994.

SAE HANDBOOK, SAE, 1995.

SERRA SOLDADURA S.A. *User Manual Serratron IAvwb Welding Control. Versão 1.0.* 1998/9.

Silveira, V.L.A., Mury, A.G. de O.S., Mannheimer, W.A. Analysis of the Behavior of Bimetallic Joints (Al/Cu) Under the Effect of Electrical Currents. *Microstructural Science*. Editors: Louthan, Jr. M.R., LeMay, I., Vander Voort, G.F. v.141987.

Smithells, C.J. *Metals Reference Book*. Ed. Butter Worths, 1976.

Souza, S.A. *Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1982.

Stinchcomb, C. *Welding Technology Today – Principles and Practices*. Ed. Prentice Hall, 1989.

Tsujino, J., Ueoka, T., Watanabe, I., Fujita, Y. Ultrasonic Butt Welding of Large Various Metal Plate Specimens. Kanagawa University, Japan. *Ultrasonics International*. Conference Proceedings. 1993.

Van Vlack, L. *Materials for Engineering – Concepts and Applications*. Addison-Wesley Publishing Company, 1982.

Van Vlack, L. *Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais*. Ed. Campus, 1984.

Voort, G.F.V. *Metallography Principles and Practice*. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1984.

Wainer, E. Brandi, S.D. Homem de Mello, F.D. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1992.

WeldTechnology, site www.weldtechnology.org.

Werkema, M.C.C. *Planejamento e Análise de Experimentos: como Identificar as Principais Variáveis Influentes em um Processo*. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996. Cap. 2: Caracterização estatística de processos, p. 11-42.

Wu, K.C. Electrode Indentation Criterion for Resistance Spot Welding. *Welding Journal*. p. 472s – 478s. out, 1968.

Yilbas, B.S., Sahin, A.Z. et al. Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials. *Journal of Materials Processing Technology*. v.49, p. 431-443, 1995.

Bibliografia Consultada

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 8309; Alumínio e Suas Ligas – Rebites, Barras e Arames Para Recalque a Frio – Determinação da Resistência ao Cisalhamento. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, NBR 6152; Materiais Metálicos – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração. Rio de Janeiro, 1992. 13 p.

Atsumi, O. *Solidificação dos Metais*. Ed. LTC, 1988.

Cary, H.B. *Modern Welding Technology*. Ed. Prentice-Hall, Inc, 1979.

Ferrasse, S. Verrier, P. Meesemaeker, F. Resistance Spot Weldability of High Strength Steels for Use in Car Industry. *Journal of the International Institute of Welding*. – *IIW*. mai/jun, 1998.

Giacoletto, L.J. *Electronics Designers Handbook*. Ed. McGrawHill. 1977.

Gottlieb, I.M. *Electric Motors and Electronic Motor Control Techniques*. Ed. Howard W. Sams & Co., Inc., The Bobbs-Merrill Co., Inc., 1976, 191 p.

Irving, B. Welding the Four Most Popular Aluminum Alloys. *Welding Journal*. fev, 1994.

Lincoln, J.F. *Principles of Industrial Welding*. Ed. Arc Welding Foundation. 1978.

- Lobosco, O.S., Dias, J.L.P.C. *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos - Siemens. Série Brasileira de Tecnologia.* São Paulo: Ed. McGraw-Hill, v.1, 1988, 351 p.
- Okumura, T. Tanigushi, C. *Engenharia de Soldagem e Aplicações.* Ed. LTC, 1982.
- Pugliesi, M. *Manual Completo do Automóvel.* São Paulo: Ed. Hemus.
- Serra Bucher International. *Curso Básico de Soldadura.* SBI, 2000.
- SENAI. *Curso de Especialização Para Engenheiros na Área de Soldagem.* São Paulo: Ed. SENAI, 1990.
- Smeaton, R.W. *Motor Application and Maintenance Handbook.* Ed. McGraw-Hill Book Company, 1969.
- Toboldt, W.K., Johnson, L., Gauthier, W.S. *Automotive Encyclopedia – Fundamental Principles, Operation, Construction, Service and Repair.* The Goodheart-Willcox Company, Inc, 1995.
- Tylecote, R.F. *The Solid Phase Welding of Metals.* Ed. Edward Arnold Ltd, 1968.

ANEXO I – Procedimento Estatístico de Otimização dos Processos de Ultra-Som e Resistência a Ponto por Meio do Método da Superfície de Resposta

- **Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Ultra-Som**

Com os resultados de resistência ao cisalhamento encontrados na tabela 4.1, provenientes do planejamento experimental fatorial completo, continuou-se a otimização do processo. Foram realizados os cálculos estatísticos dos valores dos efeitos das variáveis de entrada e de suas interações (tabela AI.1):

Tabela AI.1 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.

Termos	Grau de liberdade	Erro estimado	t	Pr > t
Amplitude	1	15.85000 9.36738	1.69	0.1291
Pressão	1	35.63750 9.36738	3.8	0.0052
Energia	1	34.43750 9.36738	3.68	0.0063
Ampli*Pressão	1	-19.36250 9.36738	-2.07	0.0726
Ampli*Energia	1	-9.82500 9.36738	-1.05	0.3249
Pressão*Energia	1	24.88750 9.36738	2.66	0.0289
Ampli*Pressão	1	-4.12500 9.36738	-0.44	0.6713

Os efeitos principais das variáveis podem ser definidos como a média dos efeitos de cada variável em cada nível das outras variáveis, ou ainda, a diferença entre a resposta média no nível superior e a resposta média no nível inferior desta variável. Os efeitos das interações entre as variáveis é a diferença entre os seus efeitos individuais, mas, por convenção, adotou-se a metade deste valor. Tanto os efeitos principais como os efeitos de interação foram calculados utilizando-se todas as respostas observadas. Cada um dos efeitos é a diferença de duas médias. Metade das observações pertence a uma das médias, enquanto a metade restante aparece na outra média.

Vê-se na tabela AI.1 que foi necessário o emprego de um teste estatístico t para se decidir se os efeitos calculados foram significativos ou não. Empregando-se o nível de 95% de confiança

(probabilidade estatística de que 95% das resistências das soldas estejam dentro desta faixa), considerou-se estatisticamente significativos os efeitos cujos valores absolutos excederam o valor de t tabelado para 95%, através do teste de hipótese. Na tabela, verifica-se que as variáveis que mais influenciaram os resultados de cisalhamento durante as soldas foram: energia e pressão. O teste de hipótese aplicado buscou definir se as variáveis tiveram ou não influência e também se sua interação afetou a variável de resposta. Na figura AI.1, encontra-se o gráfico probabilístico de efeitos, ilustrando a tabela AI.1.

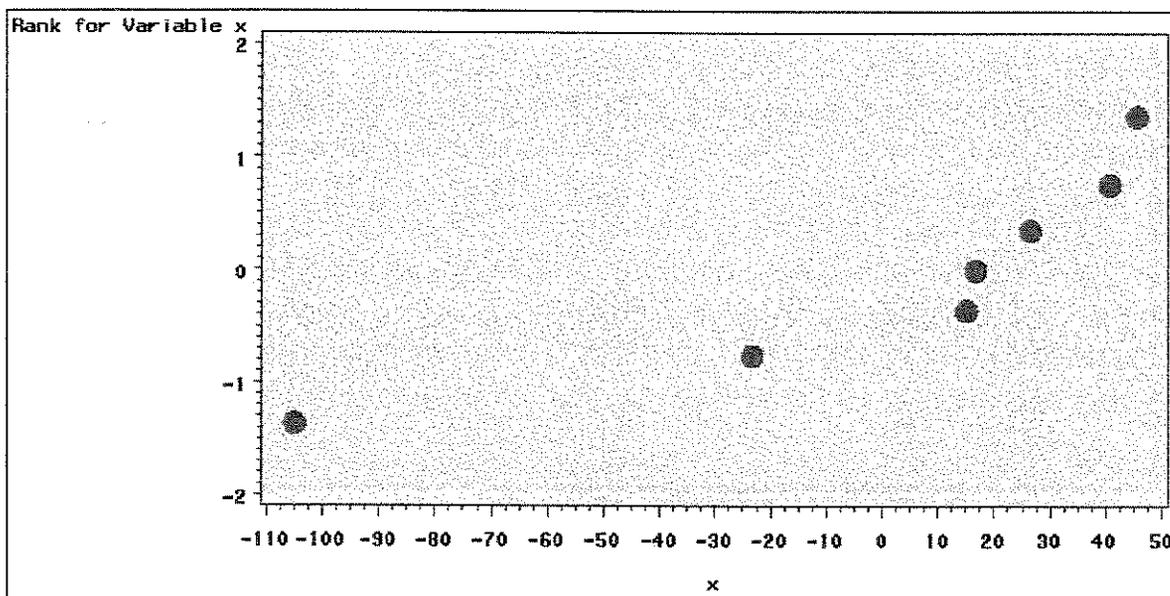


Figura AI.1 – Gráfico Probabilístico de Efeitos.

Este gráfico deve ser interpretado da seguinte maneira: os pontos representam os efeitos individuais e de interação entre as variáveis. O eixo horizontal representa os valores da raiz quadrada destes efeitos, calculados no programa SAS. O eixo vertical traz uma quantificação numa escala de importância de cada um dos efeitos, para termos de comparação visual entre eles. Os efeitos mais importantes, referentes aos fatores individuais pressão e energia, são representados pelos pontos mais altos do gráfico, no caso pressão e energia, respectivamente, e assim por diante.

Devido ao pequeno número de ensaios utilizado no planejamento fatorial, ele foi indicado somente para o início do procedimento experimental, para se definir as variáveis de influência e

estudar seus efeitos sobre a variável de resposta. Seguindo o procedimento experimental, para a continuação da otimização do processo, deve-se salientar que algumas das soldas com maiores forças de extração (cisalhamento) não apresentaram aceitação visual, ou melhor, apresentaram deformação de espessura de aproximadamente 10%, o que fez com que o alumínio fosse “rasgado” nas bordas do ponto de solda durante o ensaio de cisalhamento. Desta forma, as amostras soldadas e que apresentaram deformação maior que 10% foram descartadas. Esta deformação ocorreu devido à combinação dos altos níveis dos parâmetros com os quais foram soldadas.

Com a soldagem destas amostras, verificou-se que houve a possibilidade de obtenção de uma maior resistência ao cisalhamento, mas, em contrapartida, as amostras sofreram uma deformação excessiva, ficando prejudicadas visualmente. Desta forma, decidiu-se pela continuação do método de MSR de forma a não se seguir nesta direção contínua de aumento dos níveis dos parâmetros. Na figura AI.2, é mostrado o gráfico de valores de cisalhamento com a variação dos parâmetros de influência pressão e energia, gerado pelo SAS, com amplitude constante de 66 μm , a qual gerou melhores resultados de resposta.

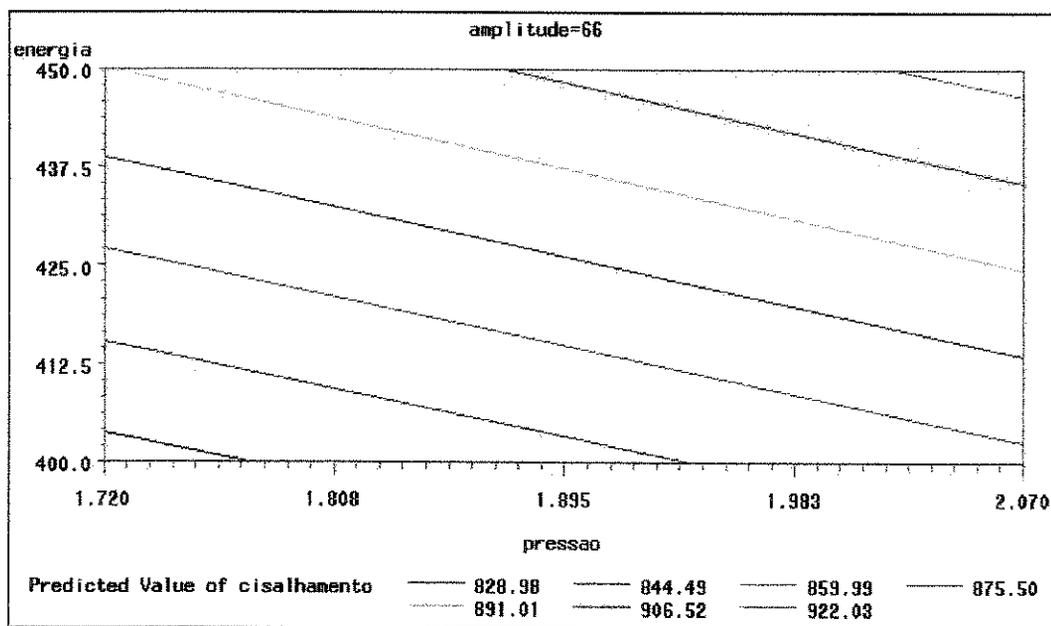


Figura AI.2 – Gráfico da Variação da Resistência ao Cisalhamento com os Parâmetros Pressão (bar) e Energia (J).

A etapa seguinte no SAS seria o seguimento de novas soldagens com combinações de parâmetros na direção ortogonal ao crescimento da variável de resposta, no gráfico da figura AI.2. Porém, como o aumento nesta direção de maior resistência poderia gerar danos nas junções, preferiu-se realizar um novo experimento plano fatorial, com valores centrais aos níveis do primeiro fatorial. Alimentando-se o programa de análise de superfície de resposta SAS, obteve-se pontos para um novo planejamento fatorial rotacional composto com 13 experimentos, sendo 5 experimentos no ponto central e 8 compondo um plano em torno do ponto central (sendo 4 fatoriais e 4 nos eixos dos fatores). Foi escolhido um plano com 13 experimentos, pois já se havia realizado duas replicações no fatorial inicial, não sendo necessária uma quantidade maior de experimentos (a outra opção do programa SAS seria um plano com 15 experimentos). Estatisticamente, este plano serviu para ajustar uma função do segundo grau que forneceu o valor da variável de resposta. Esta segunda etapa está apresentada na tabela AI.2.

2) 2ª Solda, após 1ª etapa do SAS

Tabela AI.2 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.

AI/AI	µm	Bar	J	N
Amostra	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
1	66	1,90	430	794,4
2	66	1,90	450	813,6
3	66	2,00	430	647,1
4	66	2,00	450	756,0
5	66	1,89	440	813,6
6	66	2,02	440	929,0
7	66	1,95	426	666,3
8	66	1,95	454	845,7
9	66	1,95	440	788,0
10	66	1,95	440	615,0
11	66	1,95	440	877,7
12	66	1,95	440	730,4
13	66	1,95	440	800,8

Ainda nesta etapa, foram soldados pontos que apresentaram maior resistência mecânica, mas, ao mesmo tempo, apresentaram-se inaceitáveis visualmente, com deformação de espessura acima de 10%. Estes pontos foram descartados para a próxima etapa (amostras 6 e 11 da tabela AI.3).

Soldando-se estes 13 pontos, conseguiu-se gerar uma superfície de resposta, na qual se encontrou um ponto de sela, representando a melhor região do experimental. As linhas amarelas da figura AI.3 representam os níveis de resistência ao cisalhamento das junções, para cada combinação de energia e pressão. O ponto de sela encontra-se no centro da figura, na região onde as curvas mudam de direção. As curvas amarelas crescentes a partir do ponto de sela são regiões nas quais os valores de cisalhamento aumentam, mas que apresentam junções deformadas excessivamente. As curvas amarelas decrescentes a partir do ponto de sela são regiões nas quais os valores de cisalhamento diminuem.

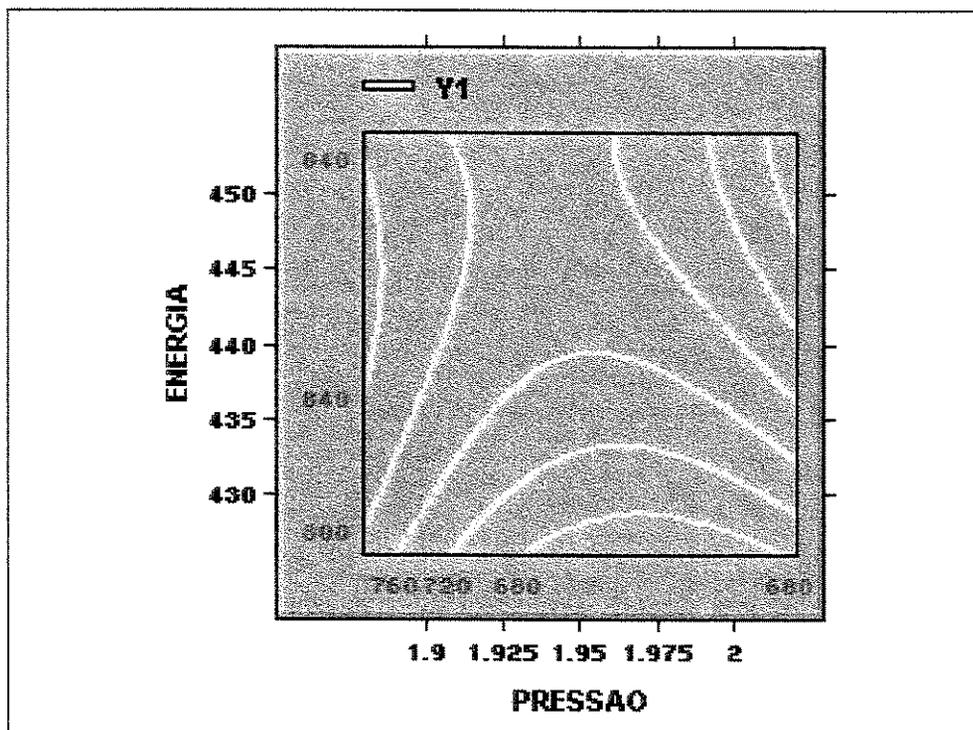


Figura AI.3 – Superfície de Resposta Para a Junção Alumínio/Alumínio (energia em J, pressão em bar, cisalhamento em N).

A figura AI.4 mostra o intervalo de predição dos parâmetros pressão e energia, com 95% de confiança, dentro do qual os valores destes parâmetros podem ser utilizados para soldagem de junções, de modo a se obter valores de resposta otimizados. Mostra, ainda, o comportamento destas variáveis próximo ao ponto de sela, demonstrando a sensibilidade destas com a variável de resposta. Na figura, Y1 representa a variável de resposta cisalhamento, e os valores numéricos estão com as mesmas unidades das tabelas, para cada parâmetro.

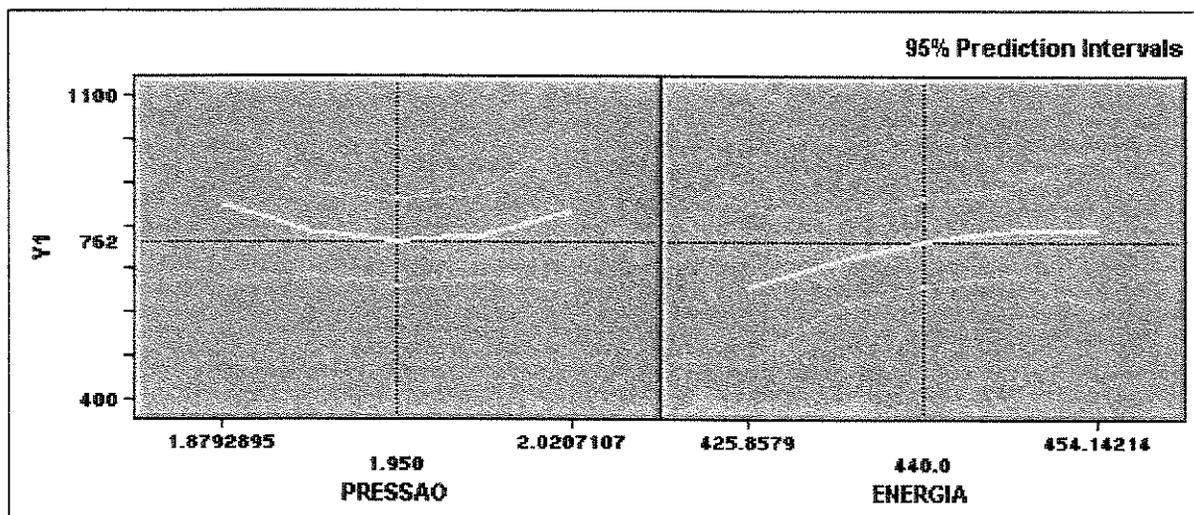


Figura AI.4 – Intervalo de Predição dos Parâmetros Pressão (bar) e Energia (J).

Com a superfície de resposta pronta, e a região otimizada encontrada, o SAS gerou 3 novos pontos para confirmação dos resultados, os quais, soldados, forneceram os seguintes valores de cisalhamento, na tabela AI.3:

3) 3ª Solda, após 2ª etapa do SAS

Tabela AI.3 – Terceira Etapa do Planejamento Experimental.

Al/Al	μm	Bar	J	N
Amostra	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
1	66	2,00	455	787,8
2	66	2,10	450	845,5
3	66	1,85	445	775,0

Com estes valores de cisalhamento encontrados, confirmou-se a região otimizada dos parâmetros, a qual apresentou os melhores resultados referentes a este ensaio mecânico e, ao mesmo tempo, às melhores amostras visualmente. Os valores dos parâmetros otimizados são mostrados na tabela AI.4:

4) Região otimizada

Tabela AI.4 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.

Al/Al	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
Faixa ótima	66	1,85 - 2,10	445 - 455	775,0 – 845,0

- **Junção Cobre/Cobre Soldada por Ultra-Som**

Ao se analisar a influência das variáveis, após planejamento fatorial inicial, encontrou-se os seguintes valores dos efeitos, listados na tabela AI.5:

Tabela AI.5 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.

Termo	Estimativa	Desvio padrão	t	Pr> t
Amplitude	52,875	27,225	1,942149	0,302707
Pressão	23,975	27,225	0,880624	0,540356
Energia	43,225	27,225	1,587695	0,357828
Ampli*Pressão	-43,275	27,225	-1,58953	0,357496
Ampli*Energia	59,275	27,225	2,177227	0,274103
Pressão*Energia	-20,825	27,225	-0,76492	0,584298

Observando-se a tabela AI-5, concluiu-se, através dos valores estatísticos de t, que não houve influência importante de qualquer variável ou das interações entre elas. Na figura AI-5 abaixo, verifica-se, individualmente, as curvas de influência dos parâmetros, confirmando graficamente a afirmação anterior.

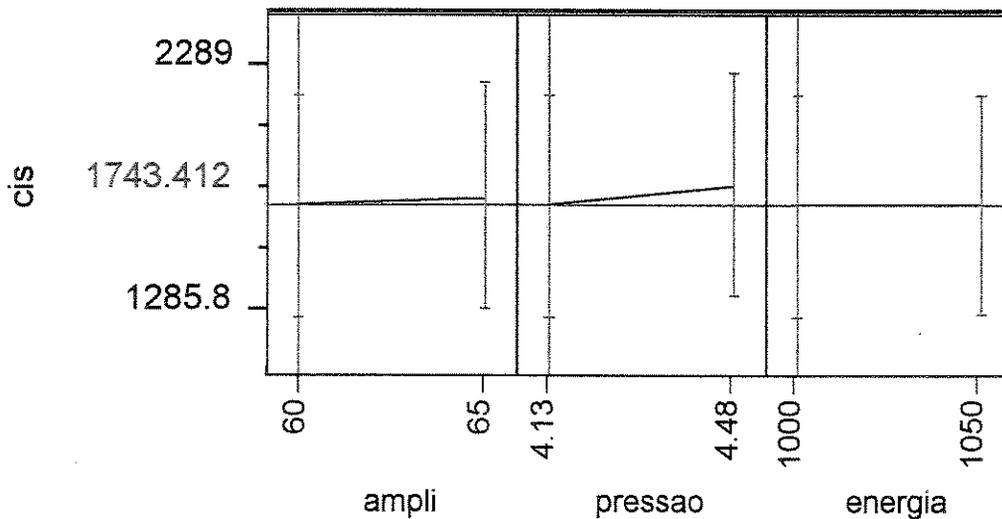


Figura AI-5 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.

Continuando-se o planejamento experimental, e considerando todas as amostras aceitáveis visualmente, o SAS gerou 4 novos pontos na direção ortogonal às curvas de aumento da variável de resposta, pontos estes mostrados na tabela AI.6 abaixo:

2) 2ª Solda, após 1ª etapa do SAS

Tabela AI.6 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.

Cu/Cu	μm	Bar	J	N
amostra	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
1	65	4,10	1050	1716,6
2	65	4,00	1050	1716,6
3	65	3,90	1050	1780,7
4	65	3,80	1050	1787,1

Como visto na tabela anterior, a variação da resistência ao cisalhamento entre as combinações de parâmetros pode ser desconsiderada. Assim, decidiu-se pela não continuação da análise no SAS, já que uma próxima etapa seria redundante, podendo-se economizar com o experimento. Desta forma, com estes pontos, obteve-se a região otimizada do processo para esta junção, vista na tabela AI.7. Foi escolhida a amplitude de 65 μm, pois foi com este valor que obteve-se, no primeiro planejamento, as maiores forças de cisalhamento.

3) Região otimizada

Tabela AI.7 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.

Cu/Cu	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
Faixa ótima	65	3,80 – 4,48	1000-1050	1715,0 – 1890,0

- **Junção Alumínio/Cobre Soldada por Ultra-Som**

Utilizando-se os resultados do cisalhamento do primeiro planejamento experimental para continuação do procedimento de otimização, obteve-se os valores dos efeitos das variáveis, mostrados na tabela AI.8:

Tabela AI.8 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.

Termo	Estimativa	Desvio padrão	t	Pr> t
Amplitude	51,275	60,875	0,8423	0,554362
Pressão	89,725	60,875	1,473922	0,379504
Energia	73,675	60,875	1,210267	0,439619
Ampli*Pressão	-32,075	60,875	-0,5269	0,691281
Ampli*Energia	-3,225	60,875	-0,05298	0,966305
Pressão*Energia	16,025	60,875	0,263244	0,836131

Conforme a tabela AI.8, a última coluna (teste de hipótese) informou que não houve fator mais influente que outro, já que todos os valores encontrados para t foram maiores do que t tabelado. Na figura AI.6 a seguir, são mostrados os gráficos indicando a pequena variação da resposta com os parâmetros principais individuais:

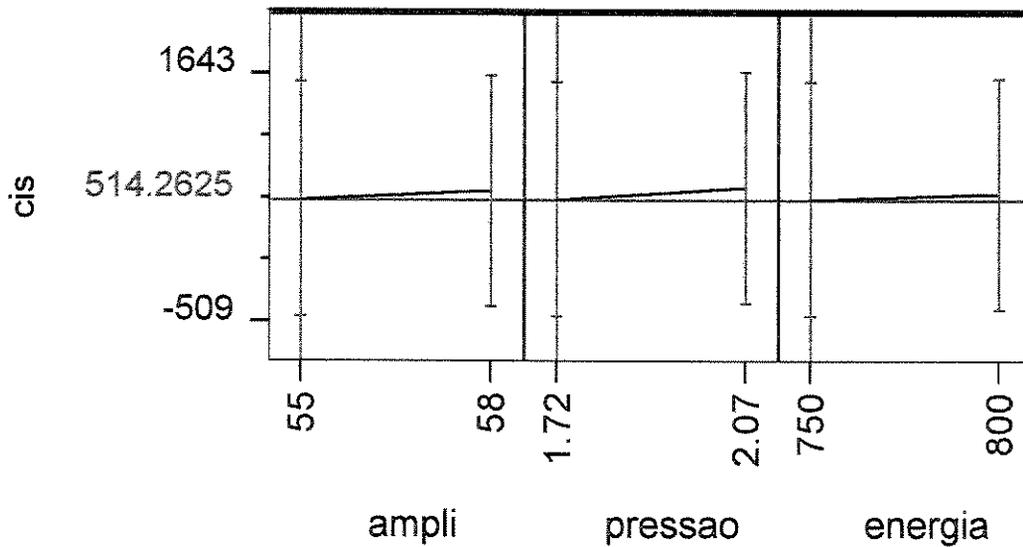


Figura AI.6 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.

Em seqüência, o programa SAS gerou uma listagem de 4 novos pontos a serem soldados, na direção de maior resposta, de acordo com a combinação apropriada dos parâmetros. Os pontos são mostrados na tabela AI.9:

2) 2ª Solda, após 1ª etapa do SAS

Tabela AI.9 – Segunda Etapa do Planejamento Experimental.

Al/Cu	μm	Bar	J	N
Amostra	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
1	59	2,07	800	640,5
2	60	2,07	800	787,8
3	61	2,07	800	928,8
4	62	2,07	800	800,7

Como visto nesta tabela, a amostra 3 apresentou alta resistência mecânica, mediante, porém, de deformação superficial excessiva do alumínio. Esta amostra foi considerada como erro e descartada. Da mesma forma, a amostra soldada com a combinação de energia 800 J e

amplitude de 66 μm (amostra 4) apresentou deformação de espessura do alumínio maior que 5%. No geral, verificou-se que, seguindo-se esta direção ortogonal de maior resposta, houve um aumento de resistência com as amostras 2 e 4, ou seja, a direção seguida mostrou-se correta, acarretando, porém, em algumas amostras inaceitáveis visualmente.

Para a próxima etapa, escolheu-se a realização de 15 novas soldas (Box-Behnken), utilizando-se o método de análise por plano rotacional composto do SAS. Os novos pontos são mostrados na tabela AI.10:

3) 3ª Solda, após 2ª etapa do SAS

Tabela AI.10 – Terceira Etapa do Planejamento Experimental.

Al/Cu amostra	μm amplitude	Bar pressão	J energia	N cisalhamento
1	58	1,80	775	608,8
2	58	2,10	775	461,4
3	64	1,80	775	570,3
4	64	2,10	775	-
5	61	1,8	750	634,4
6	61	1,8	800	493,4
7	61	2,1	750	595,9
8	61	2,1	800	320,4
9	58	1,95	750	384,5
10	64	1,95	750	346,0
11	58	1,95	800	692,1
12	64	1,95	800	339,6
13	61	1,95	775	390,9
14	61	1,95	775	717,7
15	61	1,95	775	762,6

A amostra 4 apresentou-se bastante deformada, não sendo possível a realização do ensaio de cisalhamento, e portanto, não foi considerada em nova alimentação do SAS. Os pontos restantes geraram as superfícies de resposta mostradas no capítulo 4 para esta junção. Para confirmação da região otimizada dos parâmetros, o SAS gerou mais 3 novos pontos para soldagem, mostrados na tabela AI.11:

4) 4ª Solda, após 3ª etapa do SAS

Tabela AL11 – Quarta Etapa do Planejamento Experimental.

Al/Cu	μm	Bar	J	N
amostra	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
1	59	1,92	800	705,5
2	58	1,94	805	703,6
3	57	1,95	810	679,1

Conseguiu-se, assim, confirmar a região otimizada dos parâmetros, a qual apresentou os melhores resultados referentes à resistência de cisalhamento, e, ao mesmo tempo, as melhores amostras visualmente. Esta faixa de parâmetros está apresentada na tabela AI.12:

5) Região otimizada

Tabela AI.12 – Região Otimizada do Planejamento Experimental.

Al/Cu	μm	Bar	J	N
Parâmetros	amplitude	pressão	energia	cisalhamento
Faixa ótima	57 – 59	1,92 – 1,95	800-810	679,1 – 705,5

- **Junção Alumínio/Alumínio Soldada por Resistência a Ponto**

Utilizando-se o programa estatístico JMP 4.0, encontrou-se os efeitos das variáveis e de suas interações, a partir dos resultados obtidos com o primeiro planejamento fatorial. Os efeitos são mostrados na tabela AI.13:

Tabela AI.13 – Efeitos das Variáveis de Entrada e de Suas Interações.

Termo	Estimativa	Desvio padrão	t	Pr> t
Corrente	46,4	174,5907	0,27	0,8346
Pressão	46,4	174,5907	0,27	0,8346
Tempo	-56	174,5907	-0,32	0,8024
Corrente*Pressão	163,2	201,6	0,81	0,5668
Corrente*Tempo	86,4	201,6	0,43	0,7422

Pressão*Tempo	-156,8	201,6	-0,78	0,5792
----------------------	--------	-------	-------	--------

Conforme comprovado na tabela AI.13, estatisticamente, nenhuma das variáveis de influência em específico causou efeito considerável na variável de resposta, de acordo com teste de hipótese t. O fator tempo foi o que mais poderia influenciar a resposta, mas seu efeito, apesar de maior que os outros, ainda foi insuficiente para passar no teste de hipótese. Através do gráfico abaixo, da figura AI.7, verifica-se a variação da resposta com os fatores principais. No geral, pode-se dizer que, ao se aumentar a corrente de soldagem e a pressão dos eletrodos, houve um pequeno aumento da resistência ao cisalhamento. Para o parâmetro tempo, com a diminuição deste, a resposta aumentou, conforme teoria explicada no capítulo 2.

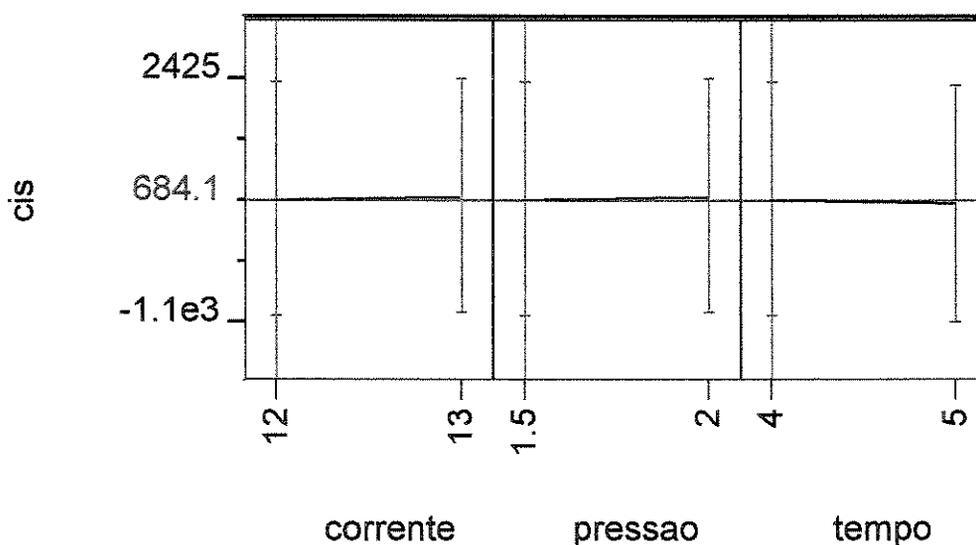


Figura AI.7 – Gráficos de Influência dos Parâmetros.