

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Karin Mendes Penteado

Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Orientador: Prof. Sebastião Carlos da Costa, Dr.

Dezembro de 2011

Itajubá - MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

P419o

Penteado, Karin Mendes

Otimização da Solda de Pontos por resistência elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE) / Karin Mendes Penteado. -- Itajubá, (MG) : [s.n.] 2011.

93 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Solda Ponto. 2. Ligas de Alumínio. 3. Projeto e Análise de Experimentos. 4. Metodologia de Superfície de Resposta. 5. Otimização. I. Costa, Sebastião Carlos da, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Karin Mendes Penteado

Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de Dezembro de 2011, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro (FATEA)

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (UNIFEI)

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador)

Dezembro de 2011

Itajubá - MG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter permitido minha caminhada, estando sempre ao meu lado em todos os momentos, dando-me a força e a perseverança necessária para prosseguir e enfrentar os desafios.

Aos meus pais que sempre tiveram como meta a educação, como um bem do qual jamais nos separamos, pois o conhecimento adquirido ao longo dos anos nos acompanha por toda a vida.

Ao professor Sebastião Carlos da Costa, pela orientação, paciência e contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus irmãos e familiares, pela compreensão, participação e força nos momentos difíceis, dando apoio incondicional.

Aos meus professores, em especial ao Anderson Paulo de Paiva, pela formação e conhecimento adquirido durante o mestrado, contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu namorado, pelo apoio, carinho, tolerância, companheirismo e compreensão.

Aos meus queridos amigos que sempre estiveram ao meu lado me dando apoio e incentivo quando precisei. Sobretudo ao Paulo Maia e Adriano Baldin por possibilitarem e ajudarem na realização dos experimentos.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI pela ajuda e dicas nas atividades de laboratório.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A soldagem de pontos por resistência elétrica é um processo amplamente difundido na indústria automobilística, sendo que um veículo moderno possui entre 2000 e 5000 pontos de solda. Uma das maiores vantagens deste processo é a facilidade de automação (alta velocidade e adaptabilidade) na produção de elevado volume. O metal base normalmente utilizado é o aço, mas as ligas de alumínio vem ganhando destaque no meio industrial nos últimos anos devido as suas características físicas, como é o caso das ligas alumínio-magnésio que pertencem a série 5XXX devido a elevada resistência mecânica em relação ao peso, resistência à corrosão, soldabilidade e potencial para reciclagem. Apesar das vantagens destas ligas de alumínio, algumas descontinuidades como, por exemplo, as porosidades e microtrincas, aparecem nos pontos de solda tornando este processo complexo. Portanto, visando garantir a qualidade da junta soldada, é importante que o procedimento de soldagem empregado seja bem ajustado, para que o ponto de solda apresente diâmetro, força máxima e descontinuidades aceitáveis. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo a otimização da soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. Buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros que oferecessem os melhores resultados quanto à geometria e a qualidade do ponto de solda. As respostas analisadas incluíram o diâmetro, indentação, penetração, microdureza, porosidade e a força máxima; os parâmetros compreenderam a pressão do eletrodo, o tempo de soldagem e a corrente de soldagem. Para a obtenção dos resultados ótimos, utilizou-se um método experimental dividido em duas fases. Inicialmente, empregou-se a Metodologia de Superfície de Resposta para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados e análise dos efeitos dos parâmetros. A otimização do processo foi realizada através do *Desirability*, método que permite avaliar um conjunto de respostas simultaneamente visando a determinação das condições mais desejáveis para as propriedades estudadas. Em função dos resultados obtidos, foram estabelecidos as melhores condições de ajustes dos parâmetros estudados. Apesar das dificuldades inerentes ao processo, o *Desirability* foi empregado permitindo que resultados satisfatórios fossem alcançados. De forma geral, percebeu-se que a qualidade da junta soldada é influenciada pelas descontinuidades que surgiram no processo de solda ponto na liga 5052-H32.

Palavras-chave: Solda Ponto, Ligas de Alumínio, Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta, Otimização

ABSTRACT

Resistance Spot Welding (RSW) is a process widely used in automobile industry, there are about 2000-5000 spot welds in a modern vehicle. One of the major advantages of this process is the easy automation (high speed and adaptability) in high volume production. The base metal used is usually steel, but aluminum alloys applications have gained throughout the industry in recent years due to its physical characteristics, such aluminum-magnesium alloys belonging to series 5XXX due to their excellent high strength to weight ratio, corrosion resistance, weldability and recycling potential. Despite the advantages of this aluminum alloys some discontinuities, for example, porosity and cracks appear in the spot weld which makes this process complex. However, in order to ensure the quality of the weld, it is important to adjust the welding procedure used, so that the process allows spot welds with diameter, failure load and discontinuities acceptable. In this context, this study aimed to optimize the resistance spot welding in 5052-H32 aluminium alloy. We tried to identify the parameters optimal combination that offers the best results on the spot weld geometry and quality. The responses analyzed included the diameter, indentation, penetration, hardness, porosity and failure load; the parameters were the pressure of the electrode, the welding time and welding current. To obtain the optimal results, the experimental method was divided into two phases. Initially, we used the Response Surface Methodology for the experiments planning, data collection and parameters effects analysis. The optimization process was performed using the *Desirability* Method; this method evaluates a set of responses simultaneously in order to determine the most desirable conditions for the properties studied. The results allowed establishing the best conditions for adjustment of parameters. Despite the difficulties inherent in the process, the *Desirability* was employed allowing satisfactory results were achieved. In general terms, this work allowed to conclude that the quality of welded joint is influenced by discontinuities that appeared in the process of spot welding in alloy 5052-H32.

Keywords: Spot Welding, Aluminium Alloys, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da temperatura no processo de solda ponto (Adaptado de KEARNS, 1980).....	9
Figura 2.2 – Ciclo de Soldagem (BRANCO, 2004).....	10
Figura 2.3 – Esquema da Solda Ponto (Adaptado de POURANVARI <i>et al.</i> , 2007).....	10
Figura 2.4 – Máquinas de Solda a Ponto (BRANCO, 2004).....	12
Figura 2.5 – Tipos de Pinças de Solda	13
Figura 2.6 – Tipos de Eletrodos (INTERMACHINERY, 2002).....	14
Figura 2.7 – Componentes do carro produzidos em ligas de alumínio (ALCOA, 2010).....	19
Figura 2.8 – Condições anormais do processo de soldagem de pontos (Adaptado de CHO <i>et al.</i> , 2006).....	26
Figura 2.9 – Teste por tensão cisalhante da junta soldada (VARGAS, 2006)	28
Figura 2.10 – Principais Modos de Falha (PEREIRA <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figura 2.11 – Características Geométricas da Solda (Adaptado de ZHOU <i>et al.</i> , 2003).....	30
Figura 2.12 – Modelo geral de um processo ou sistema (Adaptado de MONTGOMERY, 2005).....	33
Figura 2.13 – Arranjo composto central para três fatores (GOMES, 2010).....	37
Figura 3.1 – Esquema do objeto de estudo.....	42
Figura 3.2 – Método experimental – Fase 1: Metodologia da Superfície de Resposta (Adaptado de GOMES, 2010)	43
Figura 3.3 – Método experimental – Fase 2: Otimização <i>Desirability</i>	43
Figura 3.4 – Máquina de solda ponto suspensa com pinças do tipo X.....	44
Figura 3.5 – Dimensão dos corpos-de-prova para o teste de cisalhamento (Adaptado de AWS/SAE D8.9, 1997)	47
Figura 3.6 – Dimensões do corpo-de-prova com espessura das chapas de 1,60 mm.....	47
Figura 3.7 – Sequência de preparação dos corpos de prova.....	49
Figura 3.8 – Exemplo de perfil geométrico do ponto de solda	50
Figura 3.9 – Avaliação da presença de poros na zona fundida.....	50
Figura 3.10 – Ensaio de cisalhamento	51
Figura 4.1 – Micro-trincas entre o metal base e a zona fundida no processo de solda ponto na liga de alumínio 5052-H32.....	57
Figura 4.2 – Distribuição e morfologia dos poros presentes na zona fundida.....	58
Figura 4.3 – Esquema do ponto de solda com poros	59

Figura 4.4 – Efeitos principais sobre o diâmetro do ponto.....	64
Figura 4.5 – Efeitos principais sobre a indentação	65
Figura 4.6 – Efeitos principais sobre a penetração	66
Figura 4.7– Efeitos principais sobre a microdureza	67
Figura 4.8 – Efeitos principais sobre os poros.....	67
Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a força máxima	68
Figura 4.10 – Efeito da interação entre corrente de soldagem e a pressão do eletrodo sobre a indentação (Tempo = 11 ciclos)	69
Figura 4.11 – Efeito da interação entre corrente e o tempo de soldagem sobre a indentação (Pressão = 4 bar).....	70
Figura 4.12 – Efeito da interação entre corrente de soldagem e a pressão do eletrodo sobre a penetração (Tempo = 11 ciclos)	70
Figura 4.13 – Efeito da interação entre corrente e o tempo de soldagem sobre a porosidade (Pressão = 4 bar).....	71
Figura 4.14 – Efeito da interação entre o tempo de soldagem e a pressão do eletrodo sobre a força máxima (Corrente = 32 kA)	71
Figura 4.15 – Efeito da interação entre a corrente e o tempo de soldagem sobre a força máxima (Pressão = 4 bar)	72
Figura 4.16 – Tipo de fraturas encontrado no experimento de confirmação no processo de soldagem de pontos na liga de alumínio 5052-H32	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1– Alumínio e suas ligas, características e aplicações.....	21
Quadro 2.2– Soldabilidade das Ligas de Alumínio	24
Quadro 2.3– Características Fundamentais das Principais Técnicas Do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de NILO JÚNIOR, 2003)	35
Quadro 2.4 – Método <i>desirability</i> resumido (Adaptado de PAIVA, 2006)	38
Quadro 2.5 – Relação de importância entre alvos e limites no <i>desirability</i> (PAIVA, 2006) ...	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Parâmetros e seus níveis de ajustes	46
Tabela 3.2 – Parâmetros mantidos fixos durante a realização do experimento.....	46
Tabela 3.3 – Composição química e propriedades mecânicas da Liga de Alumínio 5052-H32	46
Tabela 3.4 – Dimensão dos corpos-de-prova para o teste de cisalhamento (Adaptado de AWS/SAE D8.9, 1997)	47
Tabela 3.5 – Matriz Experimental	48
Tabela 4.1 – Matriz Experimental para Respostas Geométricas, Microdureza e Poros.....	54
Tabela 4.2 – Matriz Experimental do Cisalhamento	55
Tabela 4.3 – Diâmetro <i>versus</i> Força Máxima	56
Tabela 4.4 – Coeficientes estimados para modelos quadráticos completos	60
Tabela 4.5 – <i>P-values</i> dos coeficientes estimados para modelos quadráticos completos	60
Tabela 4.6 – Análise de Variância.....	61
Tabela 4.7 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos reduzidos	62
Tabela 4.8 – Análise dos resíduos	62
Tabela 4.9 – Faixas pré-estabelecidas para Solução Global 1.....	73
Tabela 4.10 – Solução Global 1.....	74
Tabela 4.11 – Respostas previstas para Solução Global 1	74
Tabela 4.12 – Resultados do experimento de confirmação para os corpos de prova embutidos	74
Tabela 4.13 – Resultados do experimento de confirmação para os corpos de prova cisalhados	74
Tabela 4.14 – Cálculo do intervalo de confiança das respostas analisadas embutidas	76
Tabela 4.15 – Cálculo do intervalo de confiança das respostas analisadas cisalhadas	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	<i>Central Composite Design</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
MB	Metal Base
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
RSW	Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica
ZF	Zona de Fusão
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Arrancamento do ponto
C	Corrente de soldagem
CR	Corrente real
Cu	Cobre
d	Tamanho crítico do ponto de solda
D	Diâmetro do ponto de solda
FI	Fratura interfacial
$F_{\text{máx}}$	Força máxima
I	Intensidade da corrente
I	Indentação
k	Número de variáveis independentes
MD	Microdureza
Mg	Magnésio
Pen	Penetração
P	Pressão do eletrodo
Poros	Porosidade presente na zona de fusão
Q	Calor gerado
R	Resistência elétrica
R^2	Coefficiente de determinação
$R^2_{(adj.)}$	Coefficiente de determinação ajustado
t	Espessura da chapa
T	Tempo de soldagem
x	Varição dos parâmetros de processo selecionados
x_i	Variáveis independentes
y	Resposta de interesse
β_i	Coefficientes a serem estimados
ε	Erro experimental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Limitações	5
1.4. Estrutura do trabalho	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Soldagem de pontos por resistência elétrica	7
2.2.1. Vantagens e limitações	11
2.2.2. Máquinas de soldagem de pontos por resistência	12
2.3. Eletrodos	13
2.4. Parâmetros de soldagem	15
2.4.1. Corrente de soldagem	15
2.4.2. Força do eletrodo	16
2.4.3. Tempo de soldagem	17
2.5. Alumínio e suas ligas	18
2.5.1. Classificação do alumínio e suas ligas	20
2.5.2. Sistema de classificação de têmperas	22
2.5.3. Propriedades das ligas de alumínio que exercem influência no processo de soldagem	23
2.5.4. Soldabilidade das ligas de alumínio	24
2.6. Soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio	24
2.7. Qualidade da solda	28
2.7.1. Teste por tensão cisalhante	28
2.7.2. Características geométricas da solda ponto	30
2.8. Projeto e análise de experimentos	32
2.9. Metodologia de superfície de resposta	35
2.10. Método <i>desirablity</i>	38
2.11. Considerações finais	40
3. MÉTODO EXPERIMENTAL	41
3.1. Considerações iniciais	41
3.2. Problema de pesquisa	41

3.3. Método experimental	42
3.4. Materiais e equipamentos utilizados	44
3.5. Metodologia de superfície de resposta.....	45
3.5.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho	45
3.5.2. Escolha das respostas de interesse	47
3.5.3. Definição da matriz experimental	48
3.5.4. Registro das respostas	49
3.6. Considerações finais	52
4. RESULTADOS E ANÁLISES	53
4.1. Considerações iniciais.....	53
4.2. Execução dos experimentos	53
4.2.1. Características geométricas, microdureza e porosidades	53
4.2.2. Propriedades mecânicas da solda e análise de fratura.....	54
4.2.3. Análises preliminares dos resultados	55
4.2.4. Modelagem matemática das respostas	59
4.2.5. Adequação e ajuste dos modelos.....	60
4.2.6. Análise dos resíduos.....	62
4.2.7. Obtenção das superfícies de resposta	63
4.2.8. Análise dos efeitos principais dos parâmetros	63
4.2.9. Análise dos efeitos das interações entre parâmetros	68
4.3. Otimização do processo	72
4.3.1. Método <i>desirability</i>	72
4.4. Validação dos resultados.....	74
4.5. Considerações finais	77
5. CONCLUSÕES.....	78
5.1. Conclusões gerais	78
5.2. Sugestões para estudos futuros	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	85
Anexo A – Geometria dos pontos de solda observada nos experimentos	85
Anexo B – Medição da área com poros na zona fundida	88

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do tema

Diariamente as indústrias procuram aperfeiçoar seus produtos e processos produtivos em busca de alternativas que viabilizem um equilíbrio entre custo e benefício, sem prejudicar a qualidade de seus produtos. A tecnologia utilizada no produto e em seu processo é um fator relevante, e o mesmo pode ser um diferencial competitivo, seja por custos ou característica do produto. Os riscos ao implementar uma nova tecnologia, assim como seu custo, poderá inviabilizar o projeto de um novo produto, por isso a necessidade de estudos e pesquisas para o total domínio da tecnologia é extremamente importante.

Por este motivo os processos de fabricação devem ser aperfeiçoados, pois se caracterizam como peças-chaves dentro do sistema produtivo, sendo responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos. Entre eles podemos citar a fundição, conformação, metalurgia do pó, soldagem, brasagem, entre outros (GOMES, 2010). A soldagem é um dos principais processos do ponto de vista industrial por ser extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas, sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos e sua importância fica evidenciada por possuir mais de cinquenta diferentes processos de soldagem aplicados a atividades industriais distintas, como por exemplo, indústria naval, química, petroquímica, automobilística, aeroespacial e construção civil.

A *American Welding Society* (AWS) define a soldagem como o processo de junção que produz a coalescência dos materiais por meio do seu aquecimento a elevados níveis de temperatura, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso de metal de adição (PHILLIPS, 1965). Marques *et al.* (2005) define que a soldagem como o processo de união entre os materiais baseando-se no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar as atuantes no interior dos próprios materiais, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas. Considerando a continuidade das propriedades das juntas soldadas, percebe-se que a soldagem exige estudos específicos de ajuste das variáveis do processo a ser utilizado de tal forma a atingir os objetivos a que se propõe.

De forma geral, a soldagem é o principal processo utilizado na união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez e economia de material. Segundo Pereira *et al.* (2010), o aumento das restrições em termos de desempenho, poluição, segurança e consumo de energia resultaram na investigação sobre o uso de novos materiais e

processos visando à redução de peso na produção de componentes e equipamentos. Melhorias são obtidas através de materiais mais leves, como ligas de alumínio e melhores processos de união, como a soldagem de pontos por resistência (BARNES e PASHBY, 2000). Desenvolvimentos neste sentido acarretam em novas dificuldades a serem superadas.

Atualmente as ligas de alumínio são largamente utilizadas em praticamente todos os segmentos industriais, pois o material alinha-se às modernas políticas de sustentabilidade empresariais por oferecer alta resistência, condutibilidade térmica e elétrica, leveza, resistência à corrosão, variedade de acabamentos e infinita reciclabilidade (ABAL, 2010). O aumento da utilização do metal não só no setor de transportes, mas também no aeronáutico e de embalagens, faz com que os processos de fabricação existentes se adaptem ao emprego do alumínio (CAPELARI, 2006). Sendo que esta adaptação pode ser considerado um dos principais obstáculos existentes além da forte cultura do aço na indústria automotiva nacional (REVISTA ALUMÍNIO, 2010).

No segmento automotivo brasileiro a expectativa de crescimento do consumo é alta, mas devido às características sócio-econômicas e o desenvolvimento tecnológico dos processos de manufatura, a quantidade de alumínio por unidade de veículo é pequena quando comparado com países desenvolvidos. Por este motivo, o conhecimento do comportamento mecânico do material é determinante para identificar o seu potencial e definir suas limitações.

As chapas de alumínio são empregadas em diversas partes dos automóveis, sendo que uma das principais justificativas é a busca pela redução do peso que gera economia no consumo de combustível e redução da emissão de CO₂. Além disso, de acordo com a entidade americana *The Aluminum Association*, no mundo, cerca de 50% do material usado na fabricação de veículos é oriundo da reciclagem, processo que utiliza apenas 5% da energia necessária para a produção de alumínio primário (ABAL, 2010).

Devido ao desenvolvimento atual de diversas ligas, é possível obter chapas laminadas de alumínio com resistência mecânica superior ao aço estrutural, reduzindo em muitos casos os pesos dos componentes em até 1/3 quando o mesmo é produzido a partir do aço (OTOMAR, 2010).

Apesar da vantagem do alumínio em relação à redução do peso, o que se observa, de acordo com Pereira *et al.* (2010), é que os efeitos dos parâmetros no comportamento mecânico da solda de pontos por resistência elétrica no aço carbono e no aço inoxidável tem resultados bem documentados, mas para as ligas de alumínio continuam a ser escassos.

Dentre os tipos de ligas utilizadas no setor automobilístico, as da série 5XXX (Al/Mg) estão entre as mais utilizadas. Em função de suas características, a soldagem de pontos por

resistência elétrica destes tipos de ligas se vê frente a alguns problemas específicos como por exemplo, a presença de óxidos de alumínio, a vaporização do magnésio durante fase de aquecimento gerando gases e, posteriormente, formação de poros no resfriamento, a presença de micro-trincas, a alta condutividade elétrica, o que exige níveis de corrente maiores que nos aços. Entretanto, para a soldabilidade destes materiais, o aprimoramento do processo passa necessariamente pelo conhecimento da influência dos parâmetros e ajuste preciso dos mesmos (otimização) na formação do ponto de solda de maneira que a geometria, qualidade e propriedades mecânicas sejam satisfatórias.

Neste contexto, o aprimoramento dos processos e a busca por condições otimizadas são elementos fundamentais para que as operações de soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio apresentem a qualidade desejada nas características geométricas e mecânicas, além da ocorrência mínima de discontinuidades que muitas vezes são inerentes à solda. Desta forma, visando atingir o que foi mencionado anteriormente é preciso conhecer como os parâmetros da soldagem de pontos em ligas de alumínio influenciam a geometria e qualidade do ponto de solda, visando esclarecer o que foi mencionado utiliza-se o planejamento e otimização de experimentos.

A busca por processos que sejam cada vez mais eficientes fez com que diversos métodos de otimização fossem desenvolvidos. Desta forma, métodos que permitem a otimização simultânea de múltiplas características como o *Desirability* e algoritmos de busca como o Algoritmo Genético (AG) são constantemente aplicados. Sendo assim, a utilização de ferramentas estatísticas sofisticadas como o Projeto e Análise de Experimentos permite uma ampla compreensão a respeito de determinado fenômeno, o que contribui para a melhoria da eficiência dos processos produtivos e o aumento do nível de qualidade dos produtos.

1.2. Objetivos

Em função do que foi exposto no item anterior, neste trabalho foi estudado o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de Alumínio/Magnésio 5052-H32 tendo como objetivos principais:

- Analisar os efeitos dos principais parâmetros do processo sobre a geometria e resistência mecânica do ponto formado, bem como a integridade e qualidade final dos pontos soldados.

- Analisar a formação estrutural relativa a aplicação da soldagem de ponto por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32 por meio da formação geométrica do ponto soldado e presença de descontinuidades.
- Correlacionar as prováveis descontinuidades com a resistência e qualidade final das soldagens obtidas.
- Otimização do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica visando identificar a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização do diâmetro, da penetração e da resistência da junta soldada, bem como garantir que a indentação, a microdureza e a porosidade se situem dentro de valores aceitáveis garantindo desta forma a qualidade do processo.

Esta pesquisa foi realizada através do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. Os parâmetros estudados incluíram a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a pressão do eletrodo. A geometria do ponto de solda foi analisada através do diâmetro, penetração e indentação. A qualidade do ponto de solda foi avaliada pela microdureza, porosidade, teste de cisalhamento e modo de falha proveniente de tal ensaio.

O método de pesquisa foi baseado em experimentação com apoio de técnicas estatísticas baseadas no Projeto e Análise de Experimentos com auxílio da Metodologia de Superfície de Resposta para o desenvolvimento de modelos matemáticos e análise da influência dos parâmetros. Desta forma, os objetivos principais anunciados anteriormente podem ser desdobrados nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de modelos matemáticos relacionando os parâmetros da soldagem de pontos em ligas de alumínio com as respostas de interesse;
- Identificação de uma combinação ótima dos parâmetros visando a:
 - Maximização da força;
 - Maximização do diâmetro do ponto de solda;
 - Maximização da penetração;
 - Normalização da indentação;
 - Normalização da microdureza;
 - Normalização da porosidade.
- Validação experimental dos resultados.

1.3. Limitações

O presente trabalho encontra-se limitado pelos seguintes elementos:

- O material empregado na pesquisa foi a liga de alumínio/magnésio 5052-H32 como metal base; portanto os resultados obtidos não permitem a sua extrapolação dos resultados para ligas de outras séries de alumínio. Entretanto tais resultados podem permitir uma analogia com ligas de alumínio da mesma série (Al-Mg);
- Em função da dificuldade na realização experimental, a presente pesquisa partiu de resultados experimentais praticados em uma empresa voltada para aplicações no setor automobilístico;
- Como parâmetros do processo analisaram-se a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a força do eletrodo. Outras variáveis, como por exemplo, a resistência de contato na interface das chapas, não foram consideradas;
- Não foi avaliado o desgaste do eletrodo e o experimento partiu de uma aplicação industrial;
- Entre as respostas do processo, este trabalho se propôs à otimização apenas da resistência da junta soldada e a qualidade do ponto de solda. Sendo assim, propriedades como a fadiga e resistência à corrosão não foram analisadas;
- Entre as técnicas de Projeto e Análise de Experimento, foi utilizado somente a Metodologia da Superfície de Resposta;
- Como método de otimização, foi empregado somente o *desirability*.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, que descrevem os seguintes assuntos:

- O **Capítulo 1** tem como objetivo a introdução do problema de pesquisa. Desta forma, o processo de soldagem é contextualizado frente aos diversos processos de fabricação existentes. Dentre suas diversas aplicações, procurou-se introduzir a relevância da soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio, mostrando a crescente aplicação deste tipo material em função das suas propriedades.
- O **Capítulo 2** apresenta os conceitos teóricos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos da soldagem de pontos por resistência elétrica, a classificação e utilização das ligas de alumínio e a soldagem de pontos em ligas de alumínio/magnésio. O Projeto e Análise de

Experimentos e a Metodologia de Superfície de Resposta são descritos quanto às técnicas de experimentação e otimização.

- O **Capítulo 3** descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas a serem seguidas em cada fase do estudo. Algumas das etapas são detalhas neste capítulo por pertencerem ao planejamento experimental.
- No **Capítulo 4** o método experimental é executado para otimização da soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32, os resultados que foram obtidos em cada etapa do estudo são mostrados e discutidos.
- O **Capítulo 5** finaliza o trabalho, apresentando conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos que compõem o suporte teórico deste trabalho. Com relação à soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio, a discussão sobre o processo e o material base utilizado é importante para que as características de ambos sejam conhecidas, bem como suas aplicações, vantagens e desafios. Deste modo, são apresentados os principais conceitos e definições sobre a soldagem de pontos por resistência elétrica, o alumínio e suas ligas e a soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio. Algumas pesquisas envolvendo o processo de soldagem de pontos em ligas de alumínio são apresentadas com a finalidade de mostrar como este assunto vem sendo tratado pela literatura. O conhecimento dos conceitos envolvendo as ferramentas de análise e otimização, como o Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta e a ferramenta de Otimização *Desirability*, é relevante para que o método experimental a ser seguido seja definido com clareza e objetividade, permitindo que informações importantes e confiáveis sejam identificadas no fenômeno estudado.

2.2. Soldagem de pontos por resistência elétrica

No processo de Soldagem de Pontos por Resistência Elétrica (RSW), as peças sobrepostas a serem soldadas são mantidas juntas devido à força exercida pelos eletrodos, e o calor gerado pela resistência ao fluxo de corrente através das peças é o responsável por formar um ou mais pontos de solda. Na superfície em contato, um curto pulso de baixa tensão e alta corrente é fornecido passando pelos eletrodos, não consumíveis, através do material base. A resistência do material base à passagem dessa corrente ocasiona uma quantidade de calor nas superfícies de contato das peças proporcional ao tempo e a sua intensidade, a qual deverá ser suficiente para permitir que esta região atinja o ponto de fusão do material formando uma região fundida que recebe o nome de ponto de solda. Quando o fluxo de corrente cessa, a força dos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal soldado rapidamente resfria e se solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda, que normalmente é concluída em uma fração de segundo (OLSON, 1977).

A geração de calor ocorre devido à resistência do conjunto à passagem de corrente. Neste processo de soldagem, essa resistência é composta de resistência de contato peça/eletrodo e peça/peça (BRANDI, 1992).

Em um condutor elétrico a quantidade de calor gerado depende de três fatores: corrente elétrica, resistência do condutor e duração da corrente (KEARNS, 1980). Estes três fatores afetam o calor gerado como expresso na Equação (2.1).

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

Onde: Q – calor gerado (joules);

I – intensidade da corrente (amperagem);

R – resistência elétrica (Ohms);

t – tempo de passagem da corrente (segundos).

Neste processo o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem e diretamente proporcional à resistência e ao tempo. De acordo com Vargas (2006), parte do calor gerado é usada para originar a solda e parte é perdida por condução, convecção e radiação para o metal base e eletrodo; sendo que a magnitude destas perdas geralmente é desconhecida.

Da Equação 2.1, tem-se que a corrente de soldagem necessária para produzir uma dada solda é, aproximadamente, inversamente proporcional a raiz quadrada do tempo. Sendo assim, se o tempo exigido for extremamente curto, a corrente exigida será muito alta. A combinação de elevada corrente com curto intervalo de tempo pode produzir calor indesejável na zona de solda, resultando em um severo derretimento da superfície e na rápida deterioração do eletrodo (KEARNS, 1980).

Uma característica importante da soldagem por resistência elétrica é a rapidez com que o calor pode ser produzido. A **Figura 2.1** mostra os efeitos da geração de calor no metal base e nos eletrodos. Existem pelo menos sete resistências em série que contam para a distribuição de temperatura em uma solda, são elas:

- 1 e 7: resistência elétrica do material do eletrodo;
- 2 e 6: resistência de contato entre o eletrodo e o metal base, sendo que sua magnitude depende da condição da superfície do metal base e do tamanho, perfil da face e força do eletrodo. Este é um ponto de alta geração de calor, porém a superfície do metal não atinge sua temperatura de fusão durante a passagem de corrente devido à alta condutibilidade térmica dos eletrodos (1 e 7) e ao fato de que eles usualmente são resfriados a água;
- 3 e 5: resistência total do próprio metal base, que é inversamente proporcional à área da seção transversal por onde a corrente passa;

- 4: a interface do metal base é o local de formação da solda, este é o ponto de maior resistência e, portanto o que gera mais calor.

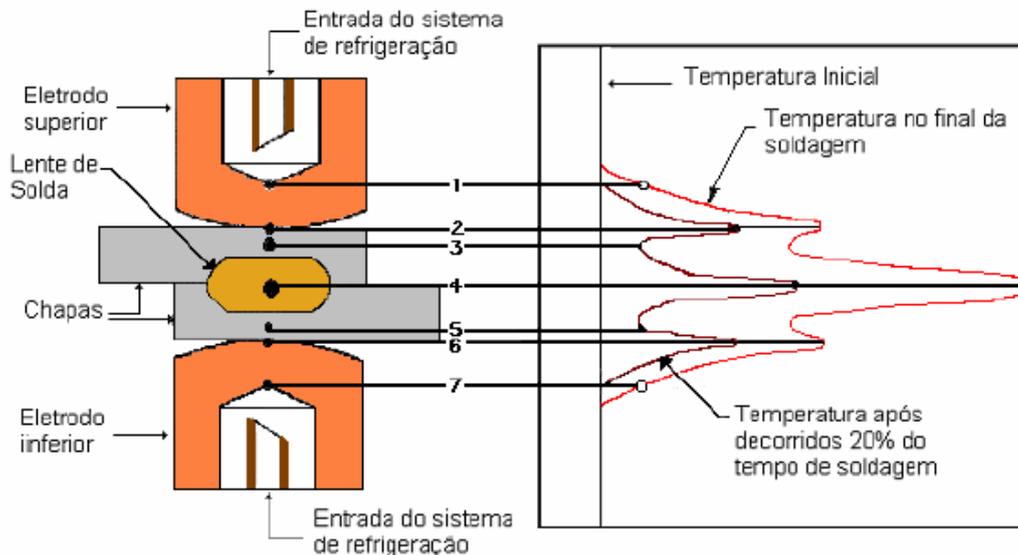


Figura 2.1 – Distribuição da temperatura no processo de solda ponto (Adaptado de KEARNS, 1980)

O calor é gerado em todos esses locais, porém o mesmo é requerido somente nas interfaces dos metais base, sendo que nos outros pontos deve ser minimizado. Como a maior resistência esta localizada em 4, o calor se desenvolve rapidamente neste local (KEARNS, 1980).

Após cerca de 20% do tempo de soldagem o gradiente térmico pode ser representado pela curva à esquerda da **Figura 2.1**, já a curva à direita representa-o no final do tempo de soldagem (KEARNS, 1980).

O processo de soldagem RSW envolve uma série de etapas desde o início até a formação definitiva do ponto de solda. Estas etapas são caracterizadas como sendo as seguintes, cuja seqüência é mostrada de forma esquemática na **Figura 2.2** (BRANCO, 2004):

- Etapa 1: Os eletrodos iniciam o processo de descida para que as chapas sejam pressionadas;
- Etapa 2: As chapas devem ser pressionadas de modo a garantir um bom assentamento do metal base evitando problemas como a expulsão do metal fundido da zona de solda;
- Etapa 3: O material é mantido sobre pressão e a corrente de soldagem é liberada através do eletrodo, iniciando a formação do ponto de solda;

- Etapa 4: Quando o processo de formação é concluído a corrente cessa, mas os eletrodos mantêm a pressão nas chapas até que o ponto se solidifique;
- Etapa 5 e 6: A força aplicada é interrompida e os eletrodos se abrem.

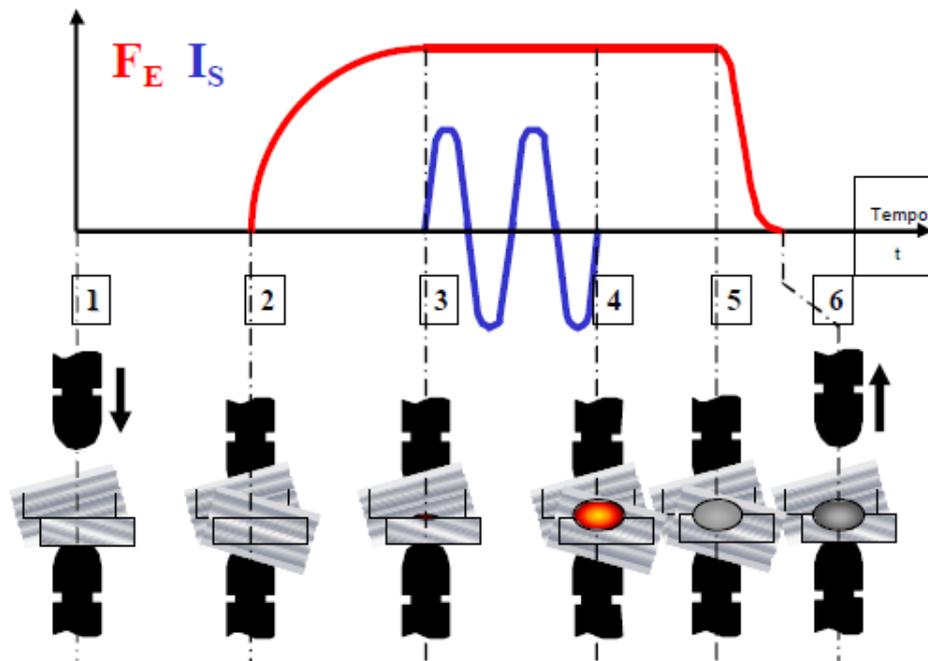


Figura 2.2 – Ciclo de Soldagem (BRANCO, 2004)

Segundo Pouranvari *et al.* (2007) devido ao ciclo térmico de soldagem uma estrutura heterogênea será criada no local da solda e em torno dela, sendo dividida em três regiões:

- Zona de fusão (ZF) ou ponto de solda: corresponde à região fundida;
- Zona termicamente afetada (ZTA), a região não derreteu, mas passou por mudanças estruturais devido ao calor gerado pela soldagem;
- Metal base (MB) (*Figura 2.3*).

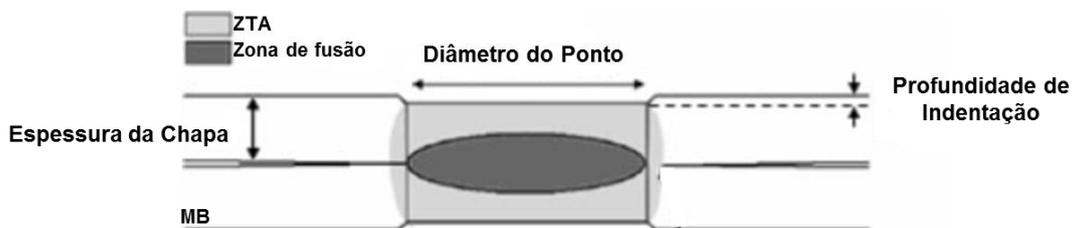


Figura 2.3 – Esquema da Solda Ponto (Adaptado de POURANVARI *et al.*, 2007)

Os materiais normalmente utilizados neste processo são aços carbono, inclusive os zincados, baixa liga e inoxidáveis, além do cobre, níquel, alumínio, magnésio, titânio e suas ligas. A solda ponto é empregada para espessuras de até 3,5 mm, podendo ocasionalmente alcançar 6,5 mm. Espessuras maiores excepcionalmente são soldadas, sendo que o equipamento deve ser projetado para tanto e este processo provavelmente não é o mais econômico (MACHADO, 1996).

2.2.1. Vantagens e limitações

Como principais vantagens da soldagem de ponto por resistência têm-se:

- Facilidade de automação (alta velocidade e adaptabilidade) na produção de volume elevado (Pereira *et al.*, 2010), podendo ser incorporado em linhas de montagem com outras operações de fabricação (KEARNS, 1980);
- A solda ponto também é econômica nas operações em que se utilizam máquinas semi-automáticas, pois é mais rápida que a soldagem a arco ou brasagem e requer menos habilidade na sua realização (KEARNS, 1980);
- Não há necessidade de acabamento final na união soldada, pois quando o processo é executado corretamente não há produção de escória nem respingo (VARGAS, 2006).

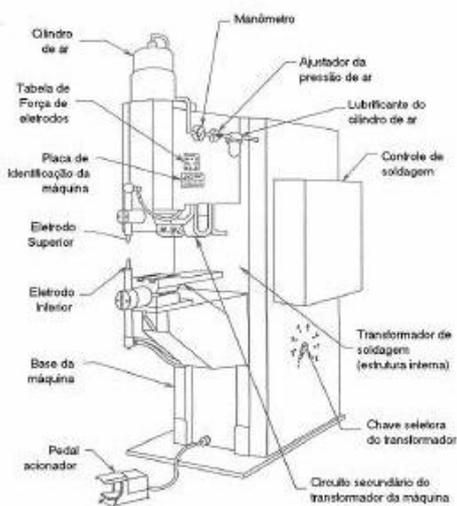
O processo também possui limitações, tais como:

- O maior problema deste processo ocorre devido à qualidade inconsistente de solda para solda, a complexidade introduzida por muitas fontes de variabilidade complicam a automação, reduzem a qualidade da solda e aumentam os custos de produção. Portanto, é necessário identificar e controlar os parâmetros que afetam a qualidade da solda (PEREIRA *et al.*, 2010);
- Desmontagem das peças soldadas para manutenção ou reparo é muito difícil (KEARNS, 1980);
- Os custos de equipamento são geralmente mais elevados do que para a maioria dos processos de soldagem a arco (KEARNS, 1980);
- Só há possibilidade de soldar entre si metais de natureza diferentes quando suscetíveis a formar uma liga ou quando se introduz entre eles um material intermediário que pode ligar-se aos metais base (VARGAS, 2006).

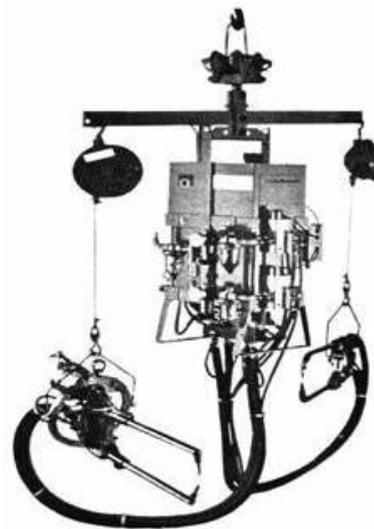
2.2.2. Máquinas de soldagem de pontos por resistência

A seleção do equipamento de soldagem de pontos por resistência é usualmente determinada pelo projeto da junta, materiais de construção, requerimentos de qualidade, normas de produção e considerações econômicas (VARGAS, 2006). O equipamento necessário para solda ponto pode ser simples e de baixo custo ou complexo e dispendioso, dependendo do grau de automação (OLSON, 1977).

A máquina de solda ponto pode ser estacionária (*Figura 2.4a*) ou suspensa, também chamada de pinça de solda (*Figura 2.4b*); a construção dos dois tipos de máquinas de solda é diferente, porém o funcionamento é semelhante e obedecem aos mesmos padrões de regulagem (BRANCO, 2004).



(a) Máquina Estacionária



(b) Máquina Suspensa

Figura 2.4 – Máquinas de Solda a Ponto (BRANCO, 2004)

As pinças de solda podem ser classificadas como C (*Figura 2.5a*) ou X (*Figura 2.5b*), sendo que a primeira possui um cilindro de ação direta em relação ao movimento de fechamento dos braços e na segunda os cilindros fecham o braço através de uma alavanca. A escolha de um determinado tipo de pinça depende da sua aplicação levando-se em consideração o acesso dessas ao produto que vai ser soldado, a ergonomia, o comprimento mínimo necessário dos braços, o espaço disponível nas estações de trabalho e a força necessária entre os eletrodos para a soldagem (SANTOS, 2006). Neste estudo, utilizou-se a máquina suspensa com pinças na configuração X.

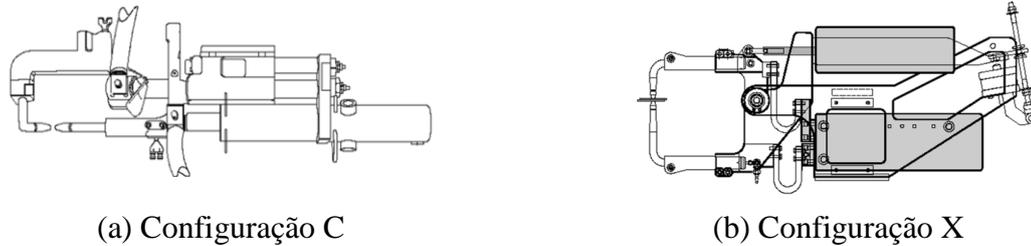


Figura 2.5 – Tipos de Pinças de Solda

Todas as máquinas de soldagem por resistência apresentam, basicamente, três componentes fundamentais (BRANDI, 1992):

- Sistema Mecânico é aquele no qual a peça é fixada e a força do eletrodo aplicada;
- Circuito Primário consiste de um transformador, cuja função é controlar a corrente de soldagem;
- Sistema de Controle pode atuar somente sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo.

Esses três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência, isto é, a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem (BRANDI, 1992).

2.3. Eletrodos

Os eletrodos desempenham papel fundamental na geração de calor por conduzirem a corrente de soldagem ao material. No caso da solda ponto, a área de contato do eletrodo controla amplamente a densidade da corrente de soldagem e o tamanho da solda resultante. Os eletrodos devem ter boa condutividade elétrica, mas também é necessário possuir resistência adequada e dureza para resistir à deformação causada pela aplicação elevada de força (KEARNS, 1980).

Cobre é o metal base usado na construção dos eletrodos, pois possui alta condutividade térmica e elétrica e baixa resistência de contato, além de elevada resistência mecânica e ao desgaste nas temperaturas de trabalho (MACHADO, 1996).

O eletrodo utilizado na soldagem de pontos por resistência possui as seguintes características geométricas:

- Face: parte mais importante do eletrodo por manter contato com a peça de trabalho, determina o valor da densidade de corrente e da pressão a ser utilizada para atingir a força necessária na formação do ponto de solda;

- Corpo: deve possuir massa suficiente, área ou espessura para suportar a força e a corrente aplicada nas chapas;
- Conexão: forma como ele é conectado no porta eletrodo ou suporte do eletrodo;
- Cavidade para refrigeração: é a parte interna e oca do eletrodo que está conectado no porta eletrodo, serve para sua refrigeração, não podendo ser muito pequena para não dificultar a passagem da água utilizada na mesma nem muito larga para não prejudicar a estrutura do eletrodo (KEARNS, 1980).

O formato do eletrodo que será utilizado no processo depende do tipo de pinça, do posicionamento do ponto, espessura, composição e revestimento do material a ser soldado. A maioria das empresas que produzem eletrodos fornece modelos padronizados, destacando-se os mostrados na **Figura 2.6**.

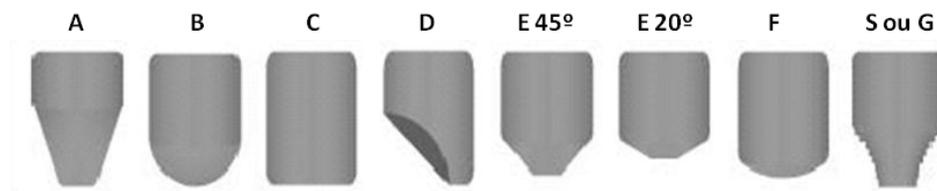


Figura 2.6 – Tipos de Eletrodos (INTERMACHINERY, 2002)

Os eletrodos mais utilizados são com formato A e B, sendo que o primeiro é configurado para pinças tipo C e recomendado para máquinas automáticas e o segundo é aplicado quando as chapas possuem pouco ou nenhum revestimento e até 2,5 mm de espessura, sendo indicado para máquinas manuais. O eletrodo C é usado em chapas que possuem diferentes espessuras e o D é indicado em soldagem de bordas, áreas com acesso restrito ou perto de superfícies curvas; ambos os eletrodos são de uso específico. O eletrodo E possui aplicação parecida com o A. O eletrodo F possui uso específico sendo recomendado para chapas com espessura superior a 2,5 mm, podendo ser utilizado em máquinas manuais ou automáticas, o formato S ou G são de uso geral, porém não permitem afiação. Para que a vida útil do eletrodo seja maior é necessário que a velocidade de soldagem esteja na faixa de 20 a 30 pontos por minuto (INTERMACHINERY, 2002).

O resfriamento correto dos eletrodos é fundamental na execução das soldas e no tempo de vida útil dos mesmos, deste modo a água deve ser levada tão próxima quanto possível da ponta dos eletrodos. Para se exemplificar a importância da refrigeração do eletrodo, é possível obter 50 vezes mais soldas durante o último 1/16” da ponta que durante o primeiro, pois quando a face do eletrodo fica mais próxima da parte refrigerada, as condições de resfriamento melhoram consideravelmente. Periodicamente deve ser feita uma vistoria nos

eletrodos devido ao desgaste decorrente do regime de trabalho imposto podendo levar as soldas a se afastarem das condições ótimas. As pontas dos eletrodos devem estar com o formato correto e limpo (MARQUES *et al.*, 2005).

2.4. Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem são condições onde um determinado valor e a adequada combinação entre eles resultam na formação do ponto de solda. Os valores corretos destes parâmetros são responsáveis pela boa ou má qualidade da solda.

Neste processo são três os parâmetros considerados principais: corrente de soldagem, força do eletrodo e tempo de soldagem (ASLANLAR, 2006). Estas três variáveis estão fortemente inter-relacionadas de tal forma que o ajuste destes parâmetros influencia a qualidade do ponto de solda (DENNISON *et al.*, 1997).

2.4.1. Corrente de soldagem

A corrente de soldagem aquece a área que será soldada até a temperatura de fusão dos materiais comprimidos pelo eletrodo (SANTOS, 2006). A densidade da corrente e a pressão do eletrodo deve ser tal que o ponto de solda é formado, mas não tão elevado a ponto do metal fundido ser expulso do ponto da zona soldada (ASLANLAR *et al.*, 2008).

Como a atuação da corrente é elevada ao quadrado (Equação 2.1) a mesma se torna o principal fator a ser considerado na taxa com que a solda é realizada, portanto este é um parâmetro crítico. Flutuações na corrente que ocorrem devido à oscilação da tensão da rede e alterações na impedância do circuito secundário quando é utilizada a corrente alternada podem diminuir a qualidade da junta soldada ou até mesmo desqualificá-la (MACHADO, 1996).

A quantidade de corrente de soldagem é controlada por dois fatores: as configurações do transformador que determinam a quantidade máxima de corrente de soldagem disponível e o percentual de corrente que será utilizado na realização da solda (ASLANLAR, 2006).

Embora o maior rendimento térmico ocorra em soldas realizadas num curto intervalo de tempo, existem limites para a densidade da corrente que dependem da intensidade da mesma, da espessura e do tipo de material. Caso a intensidade seja insuficiente nunca ocorrerá à fusão do material, mesmo em um longo período de tempo (MACHADO, 1996). Calor suficiente deve ser gerado para superar as perdas para o metal base adjacente, os eletrodos e o meio ambiente (KEARNS, 1980).

De acordo com Santos (2006), existem dois limites para a corrente de soldagem: o limite de aceitação e o limite de respingos, sendo que o primeiro corresponde ao limite inferior e está relacionado ao diâmetro mínimo do ponto e o outro representa o limite superior e quando o mesmo é ultrapassado ocorrem respingos fortes durante a execução da solda, ocasionando defeitos na mesma.

Se a corrente de soldagem for muito alta, a espessura total das chapas entre os eletrodos é aquecida até a região plástica enquanto a região soldada atinge a temperatura de fusão levando os eletrodos a penetrarem profundamente no metal base provocando a expulsão de material na zona fundida, como resultado a vida útil dos eletrodos e a qualidade da solda são baixas (KEARNS, 1980).

Para determinar a corrente que deve ser utilizada, com o objetivo de obter elevada resistência mecânica, a mesma deve ser aumentada gradualmente até o surgimento de respingos de solda entre as chapas, sendo que o valor máximo deve ser o anterior ao que provoca a expulsão de material (ASLANLAR, 2006; MACHADO, 1996).

2.4.2. Força do eletrodo

É a força encarregada de unir as peças de trabalho, exercendo pressão antes, durante e depois do fornecimento de corrente. Tal força é responsável por forjar os metais quando eles se encontram no estado plástico. Este parâmetro pode ser subdividido em: pré-pressão (compressão ou aperto), pressão de soldagem e pós-pressão (retenção) (VARGAS, 2006).

A força de pré-pressão é responsável por pressionar as chapas de modo que ocorra um bom assentamento para evitar problemas de expulsão de metal fundido da zona soldada. Durante a pressão de soldagem ocorre à passagem da corrente e a pós-pressão mantém o metal base comprimido até que o ponto de solda se solidifique.

A força do eletrodo deve ser elevada garantindo a qualidade da solda. Entretanto, quando a força do eletrodo aumenta o calor gerado diminui, devido a redução da resistividade na passagem de corrente, o que implica que a maior força do eletrodo requer uma elevada corrente de soldagem. Porém, quando a corrente de soldagem se torna demasiadamente elevada ocorre o surgimento de respingos entre as chapas e os eletrodos, o que fará com que eles fiquem presos uns aos outros (ASLANLAR, 2006).

À medida que a ponta do eletrodo se deforma a qualidade da solda diminui, sendo assim o mesmo deve ser remodelado ou substituído periodicamente para garantir que a quantidade de calor gerado seja suficiente na produção de soldas aceitáveis (KEARNS, 1980). Equipamentos modernos detectam estas anormalidades e possuem mecanismos de

compensação de corrente de soldagem, garantindo maior produtividade. Entretanto quando este desgaste se torna exagerado, há a necessidade de afiação do eletrodo ou até mesmo a sua substituição.

Apesar de aparentemente ser uma variável independente, a força exercida pelos eletrodos sobre as peças tem como resultante uma pressão que altera a resistência de contato e a circulação de corrente na interface das mesmas. Isso ocorre, pois as superfícies dos metais apresentam diferentes graus de rugosidade (MACHADO, 1996). A rugosidade esta presente mesmo nas superfícies metálicas mais polidas ou com acabamento cuidadoso, impedindo que as chapas se aproximem como um todo. Além dessas irregularidades nas superfícies existem camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, entre outros, que dificultam a ligação metal/metal (MARQUES, 1991).

Esses defeitos e impurezas na superfície da chapa diminuem a área pela qual passa à corrente o que leva ao aumento da densidade da mesma ocasionando um rápido aquecimento do material como resultado tem-se uma variação no processo, na configuração do ponto e na qualidade da solda. Visando melhorar o contato entre as superfícies a força é aplicada antes, durante e após o processo de soldagem (VARGAS, 2006).

Na maioria das aplicações, o material do eletrodo é mais macio do que as chapas, conseqüentemente, a aplicação adequada da força do eletrodo produz melhor contato na interface eletrodo/chapa que na chapa/chapa (KEARNS, 1980).

A força com que os eletrodos atuam, apesar de ser especificada como estática é, na realidade, dinâmica e depende das características mecânicas do equipamento de soldagem (MACHADO, 1996).

2.4.3. Tempo de soldagem

O tempo de soldagem está compreendido entre o início e o término da passagem da corrente elétrica (SANTOS, 2006; VARGAS, 2006).

A taxa de geração de calor deve ser tal que soldas com adequada resistência sejam produzidas sem o aquecimento excessivo do eletrodo e rápida deterioração do mesmo. O calor total produzido é proporcional ao tempo de solda. Parte do calor é perdida por condução para o metal base e eletrodos e uma quantidade muito pequena por radiação. Estas perdas aumentam com o aumento do tempo de soldagem e da temperatura do metal, mas são incontroláveis (KEARNS, 1980).

Até certo ponto, o tempo e a corrente de soldagem podem ser complementares. O calor total pode ser alterado ajustando à corrente ou o tempo de soldagem. A transferência de calor

é uma função do tempo, e o adequado desenvolvimento do ponto de solda requer um intervalo de tempo mínimo, independentemente da corrente (KEARNS, 1980).

O ciclo de soldagem, de acordo com Machado (1996), pode ser subdividido nas seguintes fases:

- Tempo de Compressão: Corresponde ao intervalo de tempo entre a aplicação inicial da força do eletrodo sobre chapas e a primeira aplicação de corrente, denominado de pré-aquecimento, variável esta importante em soldagens de aços galvanizados. Esta fase garante que os eletrodos estão em contato com as peças de trabalho, onde uma força é aplicada antes da passagem da corrente (KEARNS, 1980).
- Tempo de Soldagem: é o intervalo de tempo em que a corrente circula e ocorre a fusão do metal, formando o ponto (MACHADO, 1996).
- Tempo de Manutenção: também chamado de tempo de resfriamento, corresponde ao intervalo em que os eletrodos continuam a pressionar as chapas, mesmo após a corrente ter sido interrompida, até a completa solidificação do metal do ponto (MACHADO, 1996). Este tempo não deve ser longo, pois o calor gerado pode se espalhar pelo eletrodo e aquecê-lo (ASLANLAR, 2006).
- Tempo de Espera: corresponde ao intervalo de tempo entre uma solda e a próxima, a qual geralmente empregará as mesmas condições de soldagem (MACHADO, 1996).

Segundo Santos (2006), dimensiona-se o tempo de solda em função do tratamento superficial e do tipo de material a ser soldado.

2.5. Alumínio e suas ligas

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante presente na crosta terrestre. Suas notáveis propriedades, como excelente resistência à corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica e a facilidade de processamento através dos diversos métodos de fabricação fazem com que ele ocupe posição de destaque no cenário industrial mundial, sendo o segundo metal mais consumido no mundo, perdendo apenas para o aço (CAPELARI, 2006).

A resistência mecânica de algumas ligas de alumínio em certos casos pode ser superior à de alguns aços em relação ao baixo teor de carbono, somado a excelente resistência à corrosão e a um peso específico de $2,7 \text{ g/cm}^3$ (equivalente a aproximadamente 1/3 do peso específico do aço) fazem com que estas ligas sejam uma alternativa na substituição de componentes ou partes estruturais visando à redução de peso e o conseqüente aumento da

carga útil (CAPELARI, 2006; OLSON, 1977). Tais características tornam as ligas de alumínio atraente aos mais diversos segmentos industriais, destacando-se a indústria automotiva mundial onde é o segundo material mais utilizado. O metal pode ser usado na fabricação de rodas, carrocerias, implementos rodoviários, componentes para motores como carcaças, pistões e blocos, sistema de refrigeração, entre outros (ABAL, 2010). A **Figura 2.7** mostra alguns componentes que podem ser produzidos com o alumínio.



Figura 2.7 – Componentes do carro produzidos em ligas de alumínio (ALCOA, 2010)

A média de uso de alumínio é de 145 kg/veículo nos EUA (aproximadamente 8% do peso); 138 kg/veículo na Europa e apenas 45 kg/veículo no Brasil. Peças importantes do veículo podem ser feitas em alumínio, como por exemplo, o bloco do motor. No Brasil, é feito, em sua maior parte, de ferro fundido e pesa 36 kg em média. No exterior, é produzido em alumínio e pesa 16 kg (ABAL, 2010). Com a redução do peso do automóvel é possível economizar combustível, ter acelerações mais rápidas e frenagens mais curtas, além de reduzir a emissão de CO₂ (REVISTA ALUMÍNIO, 2010).

No que diz respeito à produção de veículos de grande porte, como caminhões e ônibus, há um ganho na carga útil transportada. Se o caminhão é fabricado com um material mais leve diminui-se a tara, podendo aumentar sua carga útil e, conseqüentemente, transportando-se mais com a mesma rodagem. Por exemplo, em um caminhão tanque que transporta combustível, se o implemento for construído com alumínio é possível perder até dois mil

quilos de peso e, desta forma, carregar até dois mil quilos a mais de combustível (WEBTRANSPO, 2010).

Apesar do mito de que o alumínio possa ser mais frágil que o aço em análises de *crash tests*, testes que avaliam a resistência e o impacto de uma batida em veículos, os protótipos construídos com o metal em questão apresentaram melhor absorção ao impacto de uma colisão que o aço. Ou seja, uma batida com um pára-choque de alumínio é menos problemática para o motorista que o aço, pois o metal absorve muito mais a energia do impacto (WEBTRANSPO, 2010).

2.5.1. Classificação do alumínio e suas ligas

A combinação do alumínio com diversos elementos resultou numa gama ilimitada de ligas, sendo que para as ligas trabalháveis mecanicamente, a separação foi determinada segundo as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), de modo que as ligas com elementos químicos atuantes fossem agrupadas criando-se grupos e séries de ligas com características físico-químicas semelhantes. Tal classificação leva em conta efeitos como modificações microestruturais e composição química, sendo subdividida em trabalháveis, ou seja, deformáveis a quente e a frio; e ligas de fundição, as quais em razão da grande adição de elementos de liga apresentam baixa capacidade de deformação (OTOMAR, 2010).

As ligas trabalháveis são divididas em ligas não tratáveis termicamente e ligas tratáveis termicamente. Na primeira o aumento das propriedades mecânicas é realizado por deformação plástica a frio, devido ao encruamento do material, fazem parte deste grupo as ligas da série 1XXX, 3XXX, 5XXX e 8XXX. As ligas tratáveis termicamente conseguem um aumento significativo das propriedades mecânicas através da precipitação de partículas que ocorre durante o endurecimento obtido pela solubilização seguido de envelhecimento, compõem este grupo as séries 2XXX, 4XXX, 6XXX e 7XXX (OTOMAR, 2010).

O *Quadro 2.1*, baseado nos autores Capelari (2006), Davis (1990) e Otomar (2010), mostra as séries das ligas de alumínio, o elemento principal de cada liga, algumas características e aplicações.

Quadro 2.1– Alumínio e suas ligas, características e aplicações

Série	Principal Elemento de Liga	Características Principais	Aplicação
1XXX	Alumínio (Al) ≥ 99%	Possui excelente resistência a corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem de maneira moderada à processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza.	Equipamentos de indústria química, refletores, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores, embalagens e painéis decorativos para uso na construção civil.
2XXX	Cobre (Cu)	Possui o cobre como elemento de liga principal e na maioria das ligas o Magnésio é o elemento secundário. Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e resistência a corrosão inferior as outras ligas de alumínio. As características relacionadas a corrosão podem ser melhoradas através do recobrimento com alumínio de alta pureza ou por ligas da série 6XXX (Cladamento).	Rodas forjadas para indústria aeronáutica e de caminhões, fuselagem e componentes estruturais de aeronaves, componentes de suspensão de automóveis.
3XXX	Manganês (Mn)	O manganês proporciona à liga uma boa resistência a corrosão e boa soldabilidade, além de aumentar sua resistência mecânica e dureza, mas reduz sua ductilidade.	Componentes de resistência mecânica baixa que exijam elevada ductilidade, utensílios domésticos, trocadores de calor, tanques de armazenamento, placas de trânsito, latas de bebidas, painéis decorativos e telhados para uso na construção civil.
4XXX	Silício (Si)	O silício pode ser adicionado para abaixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva, por este motivo estas ligas são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brasagem. As ligas que contém entre 4% e 7% de silício apresentam cores que variam do cinza ao negro após serem submetidas a anodização e acabam sendo usadas em painéis na construção civil.	Uso em arquitetura e construção civil; fios arames e pós para brasagem.
5XXX	Magnésio (Mg)	O magnésio, principal elemento de liga da série, quando combinado com o manganês resulta em ligas de média-alta resistência mecânica. Possui boa soldabilidade, ductilidade e usinabilidade, além de elevada resistência a corrosão (principalmente em atmosfera salina). Estão disponíveis em vários formatos, como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames, etc.	Uso em arquitetura e decoração, embalagens, suporte para iluminação pública, peças de barcos e navios, tanques para criogenia e estruturas automotivas.
6XXX	Magnésio (Mg) / Silício (Si)	O magnésio e os silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio (Mg ₂ Si), formando ligas tratáveis termicamente. As ligas desta série apresentam boa ductilidade, elevada resistência a corrosão, boa soldabilidade e são de fácil usinagem.	Uso em arquitetura e decoração, quadros de bicicleta e em estruturas soldadas.
7XXX	Zinco (Zn)	Adicionado em teores de 1 a 8%, o zinco é o principal elemento da liga. Quando combinado com magnésio, confere as ligas desta série altíssima resistência mecânica. Estas ligas são utilizadas quando a relação entre resistência/peso for característica importante.	Componentes da indústria aeronáutica, como estruturas, peças móveis e componentes de alta resistência.
8XXX	Outros (Sn, Li, Fe ...)	Possuem resistência mecânica média e são utilizadas em produtos para embalagens alimentícias.	Embalagens descartáveis (marmita), aletas para refrigeração, tampas para indústria alimentícia e bebidas, etc.
9XXX		Reservada para uso futuro.	

As ligas da série 5XXX (alumínio/magnésio), foco deste trabalho de pesquisa, são utilizadas em casos onde é necessária alta resistência mecânica, que é obtida através de adições crescentes de magnésio. Tal elemento promove o encruamento da liga. Embora apresentem boa resistência à corrosão, deve-se evitar a formação contínua do precipitado Mg₃Al₂ nos contornos de grão, que pode levar à corrosão intergranular (DAVIS, 1990).

Nos últimos anos a redução de peso se tornou uma questão importante para a indústria automotiva. Por este motivo, as ligas de alumínio-magnésio (série 5XXX) chamam atenção dos fabricantes, por apresentarem elevada resistência mecânica em relação ao peso,

resistência à corrosão, soldabilidade e potencial para a reciclagem. As ligas de alumínio podem substituir materiais pesados para reduzir o peso dos automóveis (OZTURK *et al.*, 2008).

2.5.2. Sistema de classificação de têmperas

Além do sistema de classificação por séries, um sistema adicional é utilizado com a finalidade de especificar a sequência de tratamentos térmicos ou mecânicos ao qual determinada liga de alumínio foi submetida durante o processo produtivo, a esta condição final dá-se o nome de tempera (CAPELARI, 2006).

A designação das têmperas é feita por uma letra maiúscula seguida de dois ou três dígitos (DAVIS, 1990). Tal sequência é separada do nome da liga por um hífen. A classificação das têmperas é detalhada a seguir:

F: Como fabricado. Refere-se à condição resultante após qualquer tipo de processamento (deformação a frio, a quente ou fundição) onde nenhum controle especial foi empregado sobre as condições térmicas ou de endurecimento por deformação ocorrido.

O: Recozido. Aplica-se a produtos que passaram por recozimento visando à redução da resistência mecânica em produtos fundidos serve para aumentar a ductilidade, além do alívio de tensões e estabilidade dimensional.

H: Endurecido por deformação (aplicável apenas às ligas para trabalho mecânico). Indica que o produto teve sua resistência mecânica aumentada através de encruamento, podendo ou não apresentar tratamento térmico posterior. A letra H é seguida por um ou dois dígitos que mostra se houve ou não a realização de alívio de tensões e o percentual de redução sofrido, respectivamente.

W: Tratamento térmico de solubilização. Aplicável as ligas cuja resistência modifica-se espontaneamente em temperatura ambiente durante um período de meses ou mesmo anos após o tratamento térmico de solubilização. A designação só é válida quando especificar o período de duração do envelhecimento natural.

T: Tratamento térmico de solubilização. Refere-se aos produtos que sofreram tratamentos térmicos visando o aumento da resistência. As ligas estabilizam-se em um período de até algumas semanas após a realização da solubilização. Se as propriedades são estabilizadas em temperatura ambiente, diz-se que a liga é envelhecida naturalmente. Caso o contrário, quando o material é submetido à temperatura a liga foi envelhecida artificialmente. A letra T normalmente seguida de um ou dois dígitos, que especificam a sequência de tratamentos termo-mecânicos realizados.

2.5.3. Propriedades das ligas de alumínio que exercem influência no processo de soldagem

De acordo com Davis (1990), Praveen e Yarlalagadda (2005), as propriedades das ligas de alumínio que exercem maior influência nos processos de soldagem, são:

- Formação da camada de óxido: A formação da camada de alumina (Al_2O_3) ocorre devido à elevada afinidade química que existe entre o alumínio e o oxigênio. Tal camada constitui uma proteção natural à corrosão, porém possui elevado ponto de fusão (2050°C) dificultando o processo de soldagem. Sendo assim, recomenda-se a redução da espessura desta camada por meios químicos ou mecânicos como escovamento e/ou usinagem. O aumento desta camada pode ser associado com processos prévios de anodização, tratamentos térmicos ou com a condição de estocagem do material em ambientes úmidos.
- Solubilidade do hidrogênio: A solubilidade quase nula do hidrogênio no alumínio sólido é a causa principal de porosidade na soldagem das ligas de alumínio (DAVIS, 2002). Entretanto, em temperaturas elevadas como ocorre nas poças de fusão, grandes quantidades de hidrogênio podem ser absorvidas. Devido à rápida solidificação da poça de fusão, a solubilidade do hidrogênio decai rapidamente. Desta maneira, o hidrogênio que exceder o limite de solubilidade formará bolhas de gás caso não consiga sair da poça em solidificação (CAPELARI, 2006). Este é um dos principais problemas na soldagem do alumínio, pois reduz a resistência à fadiga e à tração da junta soldada (PRAVEEN e YARLAGADDA, 2005). As principais fontes de hidrogênio na soldagem são umidade nas superfícies a serem soldadas ou no metal de adição e metal base ou de adição sujos com óleo lubrificante. A formação de bolhas devido a solubilidade do hidrogênio é característico da soldagem a arco, no caso da soldagem de pontos este processo ocorre de maneira diferente e será explicado posteriormente.
- Características térmicas: Embora a temperatura de fusão seja inferior à dos metais ferrosos, uma quantidade maior de calor é necessário para compensar as perdas que ocorrem devido à elevada condutividade térmica e calor específico das ligas de alumínio.
- Características elétricas: As características elétricas do alumínio na soldagem por resistência elétrica apresentam grande influência, pois o calor gerado depende da resistência imposta pelo material ao fluxo de corrente elétrica. Devido à alta

condutividade elétrica do alumínio, correntes mais elevadas serão necessárias para produzir o mesmo aquecimento obtido na soldagem com aços (CAPELARI, 2006).

2.5.4. Soldabilidade das ligas de alumínio

A soldabilidade pode ser definida, de acordo com Olson (1977), como a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica e adequadamente projetada desempenhando satisfatoriamente sua função em serviço.

Geralmente, as ligas que apresentam melhor soldabilidade, ou seja, soldam-se facilmente, são aquelas pertencentes às séries 1XXX, 3XXX, 5XXX e 6XXX. Em seguida, vêm as séries 4XXX e 2XXX que podem ser soldadas, porém requerem técnicas especiais e apresentam perda de ductilidade. Finalmente, as ligas de alta resistência mecânica da série 7XXX são classificadas como não recomendadas para soldagem, porém com exceção das ligas 7005 e 7039 que foram especialmente desenvolvidas com o intuito de melhorar a soldabilidade (CAPELARI, 2006).

O *Quadro 2.2* mostra a classificação segundo a soldabilidade das diversas ligas de alumínio. Somente estão listadas as ligas para trabalho mecânico.

Quadro 2.2– Soldabilidade das Ligas de Alumínio

Soldabilidade	Ligas
Prontamente soldáveis	1XXX, 1350, 1060, 1100, 2219, 3003, 3004, 5005, 5050, 5052, 5083, 5086, 5154, 5254, 5454, 5456, 5652, 6010, 6061, 6063, 6101, 6151, 7005, 7039
Soldáveis na maioria das aplicações ¹	2014, 2036, 2038, 4032
Soldabilidade limitada ²	2024
Soldagem não recomendada	7021, 7029, 7050, 7075, 7079, 7129, 7150, 7178, 7475

¹Pode necessitar de técnicas especiais;

²Sempre requer técnicas especiais.

2.6. Soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio

O aumento das restrições em termos de desempenho, poluição, segurança e consumo de energia resultaram na investigação sobre o uso de novos materiais e processos visando à redução de peso na produção de componentes e equipamentos (PEREIRA *et al.*, 2010). A necessidade na redução do peso dos veículos, melhoria na economia de combustível e diminuição nas emissões de poluentes pelo escapamento tem levado ao aumento do uso de materiais mais leves, como as ligas de alumínio. Por este motivo, há um forte interesse no uso

de chapas deste metal para veículos, em especial para a estrutura, onde a soldagem de pontos por resistência elétrica é o principal processo de união (GEAN *et al.*, 1999).

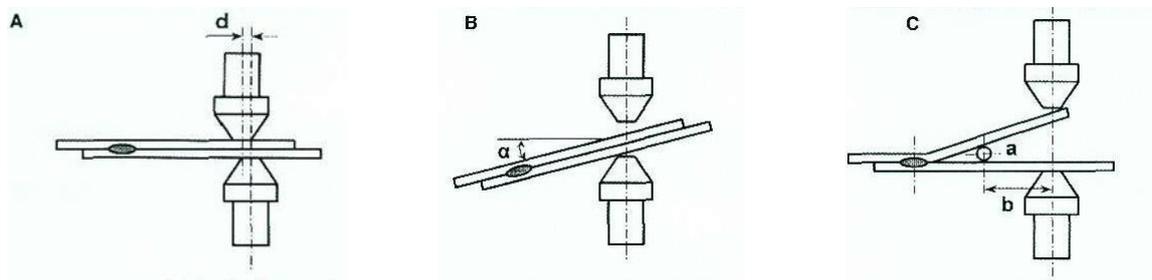
No entanto, a experiência obtida na soldagem de aços não é facilmente transferível para o alumínio, devido principalmente as diferenças físicas e metalúrgicas que existe entre esses materiais (LI *et al.*, 2007). Há certa preocupação em relação à qualidade da solda ponto em alumínio, pois o mesmo possui maior condutividade térmica e elétrica em relação ao aço (CHO *et al.*, 2006; LI *et al.*, 2007). Além disso, uma película não condutora se forma quando este metal é exposto ao ar. Todas essas propriedades fazem com que o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio seja mais difícil de controlar (CHO *et al.*, 2006).

Em função dessas características, é necessária elevada corrente e curto tempo de soldagem para realizar a solda ponto em ligas de alumínio. Por exemplo, uma corrente de 10.000 A pode ser necessária para a soldagem de duas chapas de aço com 2 mm de espessura cada uma, porém mais de 40.000 A normalmente é necessário para soldar uma combinação semelhante de chapas de alumínio (LI *et al.*, 2007).

De acordo com Pereira *et al.* (2010), embora a consequência dos parâmetros do processo sobre o comportamento mecânico da soldagem de pontos por resistência em aço carbono e inoxidável tenham resultados bem documentados para as ligas de alumínio eles continuam a ser escassos. Sendo assim, em seu estudo com a liga de alumínio 6082-T6, busca-se investigar o efeito dos parâmetros de processo na resistência ao cisalhamento e na carga de ruptura das juntas soldadas. Segundo o mesmo autor, o diâmetro do ponto de solda é amplamente influenciado pela corrente e tempo de soldagem, sendo que o aumento desses parâmetros leva ao aumento do ponto e ao endurecimento da microestrutura; além de elevar a carga suportada nos testes de cisalhamento. Tais transformações são acompanhadas por um decréscimo significativo na dureza do ponto e na zona termicamente afetada da solda.

Cho *et al.* (2006) estudam a implicação das diferentes condições de soldagem sobre a qualidade da solda ponto na liga de alumínio AA5754 através do planejamento de experimentos e de modelos estatísticos. Os parâmetros de soldagem como a corrente, o tempo de soldagem e a força do eletrodo são examinados em condições anormais de processo. Essas condições incluem o desalinhamento axial dos eletrodos (**Figura 2.8a**), o desalinhamento angular das chapas em relação aos eletrodos (**Figura 2.8b**) e o ajuste pobre quando as duas chapas de metal estão separadas (**Figura 2.8c**). Os modelos estatísticos mostraram que o tamanho e a força do eletrodo têm influência significativa na corrente de soldagem. Das condições anormais de processo a que mais prejudica a qualidade da soldagem de pontos em

alumínio é o ajuste pobre das chapas que resulta em diâmetros pequenos e juntas soldadas mais fracas.



(a) Desalinhamento Axial

(b) Desalinhamento Angular

(c) Ajuste pobre

Figura 2.8 – Condições anormais do processo de soldagem de pontos (Adaptado de CHO *et al.*, 2006)

Darwish e Al-Dekhial (1999) demonstram os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a microdureza na solda ponto em chapas de alumínio comercial BS 1050, buscando estabelecer a correlação, através do planejamento de experimentos, entre a microdureza, o teste de cisalhamento e a área do ponto de solda. Os resultados mostraram que o aumento na quantidade de calor desenvolvido durante o processo de solda ponto em alumínio conduz a juntas mais fortes e com dureza mais baixa. O aumento da carga de ruptura esta associado com o aumento da área do ponto, sendo que existe uma relação linear entre eles.

Han *et al.* (2011) desenvolveu seu trabalho visando melhorar o entendimento do processo e da relação entre qualidade e força da junta soldada na liga de alumínio AA5754 para isso realizou os testes de cisalhamento, arrancamento com flange e tração. Sendo que, os resultados confirmaram uma forte relação entre o diâmetro e a força cisalhante. Todavia, no arrancamento e na tração a relação existente ocorre entre a espessura do metal e a força de ruptura.

O processo de soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio frequentemente pode apresentar algumas discontinuidades, porém é importante que as mesmas não afetem negativamente as propriedades da solda (GEAN *et al.*, 1999). Descontinuidades são interrupções na estrutura física da solda, sendo que se torna um problema quando for considerada como um defeito. Defeito, por definição, é uma condição que deve ser removida ou corrigida; tal palavra deve ser usada com cautela, pois implica que se a solda esta com defeito a mesma requer medidas corretivas ou deve ser rejeitada. Assim, os reparos podem ser feitos desnecessariamente. Conseqüentemente tende-se a usar a palavra descontinuidade ou falha ao invés de defeito (OLSON, 1977). Os tipos de descontinuidades encontradas na soldagem de pontos por resistência elétrica são:

- Porosidade (*Porosity*): Tipo de cavidade formada pelo aprisionamento de gás durante o processo de solidificação, sendo que neste tipo de processo os poros geralmente se encontram na linha central do ponto de solda (OLSON, 1977). A porosidade na ZF do ponto de solda é comum e tal descontinuidade está mais presente em ligas de alumínio que no aço. Estes vazios resultam de bolhas presas na poça de fusão e da contração de volume durante a fase de resfriamento na formação do ponto de solda. Estas bolhas gasosas advêm dos elementos voláteis da liga como Mg e Zn. No centro da poça de fusão onde a temperatura é elevada, estes elementos podem evaporar na forma de bolhas gasosas. Com o começo da solidificação e a interrupção da passagem de corrente, as bolhas gasosas ficam presas entre os sólidos e criam os vazios. Por outro lado, a contração da poça de fusão durante o processo de solidificação pode produzir micro poros. Embora estes vazios sejam menores que as bolhas gasosas, eles podem se combinar entre si e/ou com as bolhas gasosas formando grandes vazios na zona fundida (RASHID *et al.*, 2011). Como o magnésio é o componente principal da liga 5052-H32 a presença de poros é comum e estudos com materiais da mesma série também apresentam estes vazios;
- Falta de fusão (*Lack of fusion – LOF*): Condição na qual a fusão não é completa, podendo se manifestar na linha central do ponto de solda (OLSON, 1977);
- Trincas (*Cracks*): Descontinuidade tipo fratura caracterizada por uma extremidade afiada com comprimento e largura. As fendas podem ocorrer devido ao superaquecimento, remoção da pressão do eletrodo antes do resfriamento da solda ser concluído, carga imprópria, ajuste pobre da junta soldada ou expulsão do excesso de metal da solda.

Gean *et al.* (1999) em seu trabalho fornecem informações sobre o efeito do excesso de porosidade, indentação e tamanho da solda sobre o desempenho na fadiga de solda ponto em chapas na liga de alumínio 5182-O. A porosidade excessiva, até cerca de 40% do diâmetro do ponto de solda, a indentação e a variação no tamanho do ponto de solda não tiveram grande impacto na fadiga sobre as propriedades da soldagem.

Sun *et al.* (2004) propõem um modelo analítico para determinar o modo de falha na soldagem de pontos por resistência em ligas de alumínio 5182-O e 6111-T4 durante o teste de tração baseado na análise de carga do limite inferior. O estudo mostrou que o tamanho da zona de fusão, espessura da chapa e o nível e a localização da porosidade são os principais fatores que influenciam o teste de tração na soldagem de pontos em alumínio.

2.7. Qualidade da solda

A soldagem por resistência elétrica pode ter sua qualidade avaliada através de ensaios não destrutivos e destrutivos (DARWISH e AL-DEKHAL, 1999; VARGAS, 2006). Os ensaios não destrutivos normalmente não são utilizados na inspeção deste processo (DARWISH e AL-DEKHAL, 1999). Um procedimento de amostragem segundo o qual um número de componentes são testados para destruição não providencia a segurança que todas as soldas tenham a qualidade requerida, pois as condições de soldagem podem variar de uma solda para outra (VARGAS, 2006).

A qualidade do ponto de solda é um termo vagamente definido, sendo geralmente medido em relação aos requisitos de desempenho, que podem ser quantitativos ou qualitativos. Geralmente, as características de desempenho da solda referem-se tanto a força estática quanto dinâmica. Tensão de cisalhamento, resistência a tração, e resistência ao arrancamento são exemplos de força estática, e o impacto e a fadiga comumente se referem à força dinâmica. Contudo, por razões práticas, somente o teste de tensão cisalhante é conduzido na maioria dos casos (ZHOU *et al.*, 2003).

Normalmente, a força da junta soldada é muitas vezes relacionada com atributos físicos. O tamanho do ponto de solda, a zona termicamente afetada, penetração, indentação, separação entre as chapas e as propriedades dos materiais são qualidades relacionadas à junta soldada. O tamanho do ponto de solda é muito empregado na relação de qualidade/força; sendo que os outros atributos físicos são pouco utilizados, pois ainda não foi possível determinar como eles afetam a qualidade ou força da solda (ZHOU *et al.*, 2003).

2.7.1. Teste por tensão cisalhante

O teste por tensão cisalhante consiste na aplicação de forças opostas que agem paralelamente à superfície da peça (**Figura 2.9**). O corpo de prova é carregado até a tensão de ruptura numa máquina padrão para o teste (VARGAS, 2006).

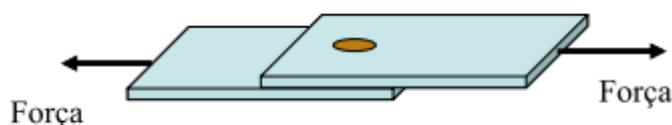


Figura 2.9 – Teste por tensão cisalhante da junta soldada (VARGAS, 2006)

Em testes estáticos, como tensão de cisalhamento ou resistência à tração, os principais modos de falha são o arrancamento do ponto de solda (**Figura 2.10a**) ou a fratura interfacial (**Figura 2.10b**). Na fratura interfacial, a falha ocorre por meio da propagação de trincas através da zona de fusão do ponto, enquanto no arrancamento o modo de falha ocorre com a retirada completa do ponto da chapa. As soldas que falham no arrancamento do ponto proporcionam níveis de carga e de absorção de energia maiores do que o modo de falha interfacial (PEREIRA *et al.*, 2010).

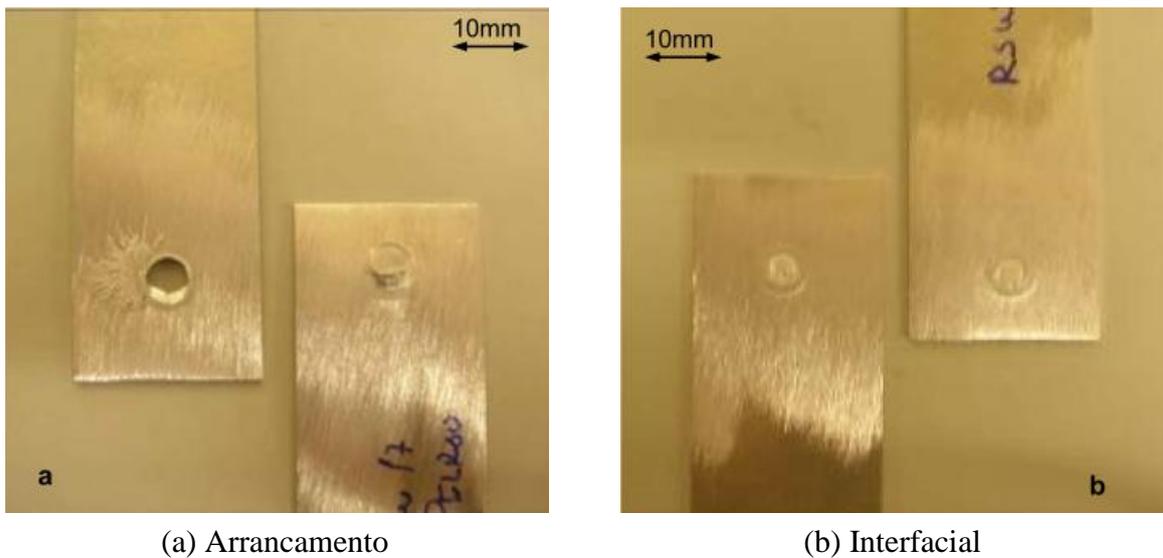


Figura 2.10 – Principais Modos de Falha (PEREIRA *et al.*, 2010)

Qualquer inspetor de qualidade rejeitaria uma solda que falhasse no modo de fratura interfacial por considerá-la ruim. Este critério funciona relativamente bem para soldagem de pontos em aço carbono, pois o ponto de solda tem um nível dureza significativamente maior que o metal base, portanto o arrancamento do ponto produz a maior força na junta soldada. Por sua vez, a eficácia deste critério para a avaliação da qualidade da solda ponto em alumínio e em aços de elevada resistência não tem sido devidamente estudada pela comunidade de solda automotiva; os critérios adotados são provenientes das pesquisas em aço carbono sem um estudo aprofundado sobre o assunto. Por causa da ocorrência mais freqüente da fratura interfacial, muitas empresas do setor automobilístico não têm confiança na soldagem de pontos por resistência em ligas de alumínio e estão buscando alternativas, ainda mais caras de técnicas de união como, por exemplo, o rebite (SUN *et al.*, 2004).

Todavia, em função do arrancamento do ponto proporcionar níveis de carga e absorção de energia maior e a fim de garantir a confiabilidade da solda os parâmetros de processo devem ser ajustados de modo a garantir este modo de falha (PEREIRA *et al.*, 2010; POURANVARI *et al.*, 2007).

2.7.2. Características geométricas da solda ponto

No processo de soldagem de pontos por resistência elétrica observa-se a formação de algumas características geométricas como o diâmetro do ponto, a penetração, a indentação e o distanciamento entre as chapas metálicas conforme mostra a *Figura 2.11*.

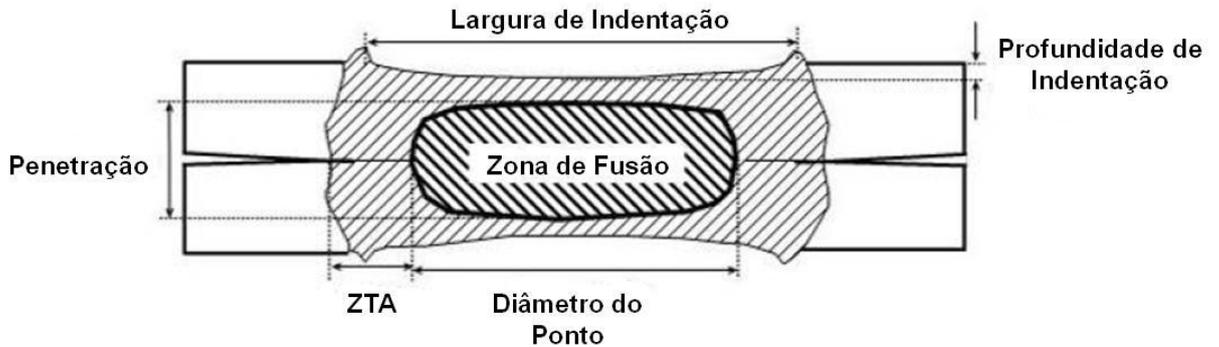


Figura 2.11 – Características Geométricas da Solda (Adaptado de ZHOU *et al.*, 2003)

O tamanho do ponto de solda é o parâmetro mais importante para determinar seu comportamento mecânico (POURANVARI *et al.*, 2007). Muitas equações foram propostas visando prever o diâmetro do ponto ótimo ou mínimo garantindo o arrancamento do ponto de solda (PEREIRA *et al.*, 2010). Na Equação 2.2, proposta pela *American Welding Society / American National Standard Institute / Society of Automotive Engineers* para soldas em aço, o tamanho crítico do ponto de solda (d) é simplesmente função da espessura da chapa (t), ambos em mm (AWS/SAE D8.9, 1997).

$$d = 4\sqrt{t} \quad (2.2)$$

Contudo, de acordo com Pouranvari *et al.* (2007) este critério nem sempre apresenta o melhor resultado e para Pereira *et al.* (2010) as alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas da solda devem ser levadas em consideração. Em seus estudos Pouranvari *et al.* (2007) propõe uma equação para prever o diâmetro crítico do ponto, porém o material utilizado foi aço baixo carbono. Muitas equações presentes na literatura foram derivadas da soldagem em aço e poucas são encontradas para a solda em ligas de alumínio.

A Equação 2.2, segundo Han *et al.* (2011), pode ser explicada pela relação entre a espessura da chapa (t) e a variação dos parâmetros de processo selecionados (x), como mostra a Equação 2.3. Embora o valor típico de x especificado para situações de fabricação normalmente seja 4 é possível que o mesmo varie entre 3 e 6 dependendo do material e das variáveis de processo. Na prática, não é possível obter soldas consistentes sem expulsão

quando os valores de x se encontram em seu nível superior, 5 e 6. Sob o efeito de diferentes parâmetros de processo, ou seja, variando o x entre os possíveis valores mencionados, observou-se a formação de pontos de solda com fusão incompleta até a penetração excessiva do ponto. O aumento da penetração do ponto de solda leva ao risco de expulsão de material e a degradação do eletrodo conduzindo a uma qualidade ruim da junta soldada. Neste caso, é favorável que o valor de x seja 4 ou 5 fornecendo, deste modo, um diâmetro ótimo e a maior força cisalhante ou de tração.

$$d = x\sqrt{t} \quad (2.3)$$

De acordo com Sun *et al.* (2004), em se tratando da combinação do mesmo material, o fato de a solda ter um diâmetro com maior zona fusão e que possui o arrancamento do ponto como modo de falha não garante que ela é mais forte que uma solda com menor zona de fusão.

A Equação 2.4 foi proposta por Sun *et al.* (2004) para soldas em ligas de alumínio 5182-O e 6111-T4, onde nenhuma alteração substancial na dureza das soldas foi observada. O tamanho crítico de ponto ($D_{critico}$) necessário para o arrancamento é função da espessura da chapa (t) e do fator de porosidade (f) considerando que este exerce influência na resistência da solda.

$$D_{critico} = \frac{3,2t}{f} \quad (2.4)$$

Pereira *et al.* (2010) estuda o diâmetro crítico do ponto de solda (d_{cr}) na liga de alumínio 6082-T6 e baseando-se na dureza do material base (HV_{BM}) e do ponto (HV_N) definindo um limite seguro na obtenção do modo de falha de arrancamento (Equação 2.5). Porém, em seu estudo a análise microestrutural não revelou a presença de poros.

$$d_{cr} = 4t \frac{HV_{BM}}{HV_N} \quad (2.5)$$

A Equação 2.4 proposta por Sun *et al.* (2004) leva em consideração a porosidade que pode surgir no processo de soldagem de pontos em liga de alumínio, sendo este um parâmetro importante a ser considerado, pois quando há a presença de poros na junta soldada a área total do ponto fica reduzida. Desta forma, o teste por tensão cisalhante pode ser prejudicado, devido à redução da área total do ponto de solda. Porém, conforme mencionado pelo autor, à

formulação proposta só é válida quando a diferença entre a dureza do metal soldado e a ZTA for similar a do metal base. No caso de Pereira *et al.* (2010), a diferença entre as durezas é considerada, mas a presença de poros não entra na formulação que foi proposta pelo autor.

A indentação corresponde à profundidade deixada pelos eletrodos nas chapas durante o processo de soldagem, sendo desejável que ela seja a mínima possível (ZHOU *et al.*, 2003). De acordo com Rossi (2007), quando a profundidade é menor que 20% a solda é chamada de “solda fria”, pois o calor gerado foi muito baixo; entretanto esta profundidade não deve exceder 80% da chapa mais fina, o que resultaria em indentação excessiva e expulsão do material. Segundo Vargas (2006), quando a mesma é excessiva pode ocorrer à diminuição da resistência mecânica da junta soldada. É válido ressaltar que estes estudos não foram desenvolvidos para ligas de alumínio, mas para o aço.

Gean *et al.* (1999) mostra o efeito da indentação na liga de alumínio 5182-O, em seu estudo quando a mesma é excessiva, em torno de 40% a 50%, não se observa a presença de poros na soldagem. Porém, quando este fator ou a porosidade são elevadas a resistência da junta soldada fica mais fraca.

Na análise da liga de alumínio 6082-T6 foi possível observar que a corrente de soldagem exerce influência sobre a indentação acima de determinado valor. Sendo que, a mesma continua a aumentar com o tempo de soldagem, devido ao aumento da entrada de calor. A força do eletrodo mostrou ter menor efeito na sua profundidade (PEREIRA *et al.*, 2010).

A separação das chapas ocorre na superfície de contato sendo o resultado da expansão e contração do metal soldado e do efeito de forjamento causado pelos eletrodos no ponto de solda quente. A quantidade de separação varia de acordo com a espessura do metal base, quando excessiva resulta das mesmas causas da indentação, pode também ser ocasionada pela montagem imprópria dos eletrodos (RUIZ, 2005). O distanciamento entre chapas é medido entre as chapas inferior e superior logo após a região fundida, quanto maior for esta medida menor é a resistência do ponto de solda à fadiga e a corrosão.

2.8. Projeto e análise de experimentos

Pesquisadores realizam experimentos em praticamente todos os campos de investigação, geralmente, visando descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema. Um experimento planejado pode ser definido como um teste, ou uma série de testes, em que mudanças propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o

objetivo de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. Desta forma, a experimentação pode ser caracterizada como parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia (MONTGOMERY, 2005).

Geralmente, os experimentos são usados para estudar o desempenho de processos e sistemas. O processo, conforme mostra a **Figura 2.12**, pode ser uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma um material de entrada em um produto de saída, que pode possuir uma ou mais respostas. Algumas variáveis do processo são controláveis enquanto outras são não controláveis, embora possam ser controláveis para efeito de teste. Muitas vezes, os fatores não controláveis são chamados de ruído.

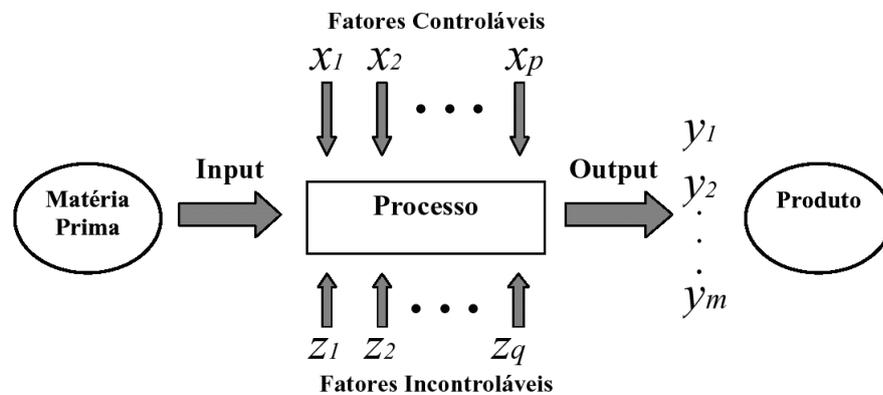


Figura 2.12 – Modelo geral de um processo ou sistema (Adaptado de MONTGOMERY, 2005)

O planejamento experimental é uma ferramenta importante dentro da engenharia para o desenvolvimento de produtos e processos, sendo que os principais benefícios alcançados com esta técnica são:

- Melhoria do rendimento dos processos;
- Redução da variabilidade e conformidade mais próxima da nominal;
- Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- Redução dos custos totais.

O Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) pode ser definido como um processo de planejamento dos experimentos para que os dados apropriados possam ser coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Desta forma, qualquer problema experimental tem dois aspectos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados (MONTGOMERY, 2005).

Os três princípios básicos do Projeto de Experimentos, de acordo com o mesmo autor, são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização executa os experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos em estudo sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação consiste em repetir um mesmo experimento várias vezes, possibilitando obter uma estimativa do erro experimental. A blocagem é uma técnica utilizada para melhorar a precisão com que a comparação entre os fatores de interesse são feitas, ela pode reduzir ou eliminar a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos que perturbam o sistema, mas que não são interessantes para o estudo.

Os experimentos planejados são uma abordagem poderosa para a melhoria de um processo. Por este motivo, é necessário que todos os envolvidos no experimento tenham uma idéia clara a respeito do objetivo do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e um entendimento das ferramentas de análise utilizadas. Desta forma, Montgomery (2005) propõe que o emprego do Projeto e Análise de experimentos deve seguir algumas etapas:

1. Reconhecimento e relato do problema: todas as idéias sobre o problema e o objetivo específico são desenvolvidas. Um relato claro do problema e dos objetivos contribui para uma melhor compreensão do processo em estudo e eventual solução do mesmo.
2. Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho: os fatores que devem variar durante o experimento são escolhidos, bem como os níveis de estudo dos mesmos. É necessário que o observador conheça o processo tanto na teoria quanto na prática.
3. Seleção das respostas: as respostas analisadas devem fornecer informação relevante sobre o processo em estudo.
4. Escolha do planejamento experimental: se os três passos anteriores estiverem corretos, esta etapa será relativamente simples. O tipo de análise é escolhido levando em consideração tempo, custo, dificuldade dos experimentos e objetivos pretendidos.
5. Realização do Experimento: o experimento é executado de acordo com o planejamento estabelecido, a coleta de dados é realizada e o processo deve ser monitorado, evitando possíveis erros experimentais.
6. Análise estatística dos dados: métodos estatísticos devem ser usados na avaliação dos dados, de modo que os resultados e conclusões sejam objetivos e não de opinião. A análise dos resíduos e a verificação do modelo também são importantes.

7. Conclusões e recomendações: o experimento deve resultar em conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação. Sequência de acompanhamento e testes de confirmação devem ser realizados para validar a conclusão do experimento.

As técnicas mais utilizadas no projeto e análise de experimentos são o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, o Método de Taguchi e a Metodologia da Superfície de Resposta. O *Quadro 2.3*, apresentada por Nilo Júnior (2003), reúne de maneira resumida as principais características relacionadas a cada uma destas técnicas.

Quadro 2.3– Características Fundamentais das Principais Técnicas Do Projeto e Análise de Experimentos (Adaptado de NILO JÚNIOR, 2003)

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Demanda um alto número de corridas para problemas que possuem um grande número de variáveis.	Em processos onde há o domínio prévio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região.	Em processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise do processo que possui muitas variáveis de entrada com número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma idéia do processo, mas pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos que possuem dispersão elevada ou em que as corridas demandem alto tempo ou custo.
Metodologia da Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos níveis -2 e +2, pois poucas corridas são realizadas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente quando os mesmos são bem conhecidos e com baixa dispersão.

Entre as técnicas utilizadas no projeto e análise de experimentos, o presente trabalho emprega a Metodologia da Superfície de Resposta, pois este estudo visa a otimização da soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. Portanto, os principais conceitos da Metodologia da Superfície de Resposta serão discutidos detalhadamente no item seguinte.

2.9. Metodologia de superfície de resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), de acordo com Montgomery (2005), é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas na modelagem e na análise de

problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta. A MSR foi desenvolvida no início da década de 50, sendo aplicada inicialmente na indústria química com considerável sucesso. Nos últimos 20 anos, esta técnica tem sido amplamente aplicada em vários contextos industriais, como na fabricação de semicondutores e de artigos eletrônicos, entre outros.

Na maioria dos problemas, observa-se que a relação entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas. Desta forma, o primeiro passo em MSR é encontrar uma aproximação conveniente para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para descrever tais relações. Portanto, se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, a função de aproximação é um modelo de primeira ordem (Equação 2.6).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.6)$$

Onde: y – Resposta de interesse;

β_i – Coeficientes a serem estimados;

x_i – Variáveis independentes;

k – Número de variáveis independentes;

ε – Erro experimental.

Se há curvatura no sistema, então se utiliza um polinômio de ordem mais elevada, como o modelo de segunda ordem (Equação 2.7).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.7)$$

Muitos problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os polinômios aproximadores acima. Naturalmente, é improvável que o modelo polinomial seja uma aproximação razoável para todo espaço experimental coberto por variáveis independentes. Porém, para uma região específica, tais modelos são eficientes.

Geralmente, para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Equações (2.6) e (2.7) tipicamente utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (*Ordinary Least Squares* – *OLS*). Desta forma, constrói-se uma função aproximada relacionando as respostas de interesse com as variáveis de processo. De posse da construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através da Análise de Variância (ANOVA), sendo que este teste avalia se o modelo é estatisticamente significativo. Pelo ANOVA também é possível verificar quais

são os termos significativos do modelo e quais podem ser removidos. Os modelos são ajustados através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. Associado com este coeficiente tem-se o R^2 ajustado ($R^2 (adj.)$), que leva em consideração o fato de que o R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população.

Existem dois tipos principais de arranjos experimentais utilizados para a coleta de dados na Metodologia de Superfície de Resposta: o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*) e o Box-Behnken; sendo o primeiro mais aplicado em comparação com o segundo.

O arranjo composto central é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado, um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais (*Figura 2.13*). O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Dependendo da sua localização podem ser circunscritos, inscritos ou de face centrada.

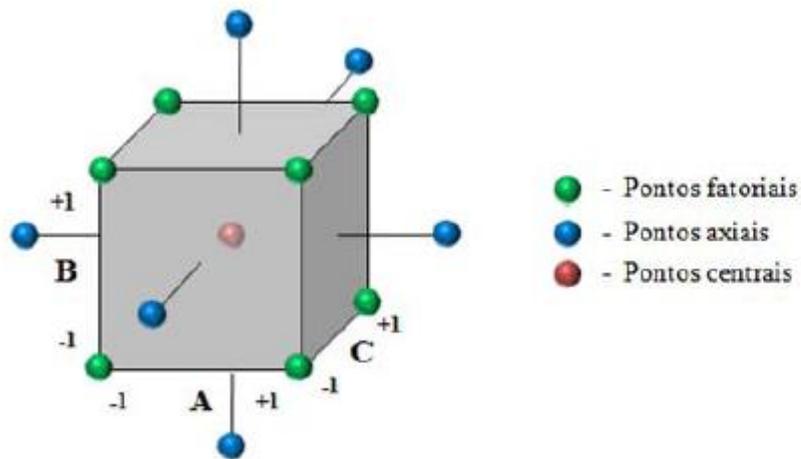


Figura 2.13 – Arranjo composto central para três fatores (GOMES, 2010)

O arranjo composto circunscrito (CCC) corresponde ao CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α dos pontos centrais, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. Em situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados por medida de segurança ou incapacidade física de realização utiliza-se o arranjo inscrito (CCI). O CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais criando um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites, sendo que o mesmo requer cinco níveis. O arranjo de face centrada (CCF) dispõe seus pontos axiais sobre o centro

de cada face do espaço fatorial, ou seja, o valor de α é igual a +1 ou -1, logo o mesmo requer três níveis para cada fator. O CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto o CCI o menor.

2.10. Método *desirability*

A otimização dos processos de fabricação normalmente leva em consideração um grande número de características onde algumas são desejáveis e outras exigíveis. Desta forma, o desafio dos métodos utilizados para este fim consiste em proporcionar um equacionamento matemático que seja capaz de determinar soluções que atendam a todas ou a maioria dessas características. O método *desirability* foi um dos primeiros propostos na otimização de múltiplas respostas. Em função da facilidade na sua aplicação é um dos mais aceitos e utilizados na comunidade acadêmica e na indústria.

Quadro 2.4 – Método *desirability* resumido (Adaptado de PAIVA, 2006)

Objetivo	Características	Representação	Equação
Mínimizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta enquanto o valor da resposta original se aproxima de um alvo mínimo. Abaixo do alvo $d = 1$; acima do limite superior $d = 0$.		$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i > H_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 1 & \hat{Y}_i < T_i \end{cases} \quad (2.8)$
Normalizar	Quando a resposta se move em direção ao alvo, o valor da função <i>desirability</i> aumenta. Acima ou abaixo dos limites $d = 0$; no alvo $d = 1$.		$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - H_i}{T_i - H_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 0 & \hat{Y}_i < L_i \text{ ou } \hat{Y}_i > H_i \end{cases} \quad (2.9)$
Maximizar	O valor da função <i>desirability</i> aumenta quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior $d = 0$; acima do alvo $d = 1$.		$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < L_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{Y}_i > T_i \end{cases} \quad (2.10)$

O *desirability* é baseado no algoritmo criado por Harrington (1965), sendo posteriormente aprimorado por Derringer e Suich (1980), que apresentaram-o como é

conhecido atualmente. O *desirability* é um método multicritério com capacidade de avaliar um conjunto de respostas simultaneamente permitindo a determinação do conjunto das condições mais desejáveis para as propriedades estudadas.

Na aplicação do método, deve-se estabelecer inicialmente um relacionamento entre as respostas de interesse e as variáveis independentes estudadas, o que pode ser feito através da MSR e OLS. Desta forma, usando a função de Harrington cada uma das respostas do conjunto original é transformada, conforme as Equações 2.8, 2.9 e 2.10 descritas no **Quadro 2.4**, de modo que d_i pertença ao intervalo $0 \leq d_i \leq 1$.

Onde L_i é o limite de especificação inferior, H_i limite de especificação superior, T_i é o valor alvo, \hat{Y}_i corresponde ao valor ajustado da resposta e R o seu peso.

O **Quadro 2.5** mostra a relação de importância entre os alvos e os limites (valores desejados) no *desirability*.

Quadro 2.5 – Relação de importância entre alvos e limites no *desirability* (PAIVA, 2006)

Representação	Características
<p>Peso=0,1 d = 0 Alvo d = 1</p>	Se o peso é menor que 1 (valor mínimo é 0,1), então, menos ênfase se dá ao alvo.
<p>Peso=1,0 Alvo d = 0 d = 1</p>	Quando o peso é igual a 1, a importância dada ao alvo é igual a importância dada aos limites.
<p>Peso=10,0 Alvo d = 0 d = 1</p>	Se o peso dado à resposta é maior do que 1 (o valor máximo é 10), então, mais ênfase é dada ao alvo.

Através da combinação dos valores d_i , obtidos da transformação das respostas, por meio de uma média geométrica, encontra-se o índice global D (Equação 2.11).

$$D = [d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k)]^{\frac{1}{k}} \quad (2.11)$$

O índice global D pertence ao intervalo $[0;1]$ e é maximizado quando todas as respostas se aproximam o máximo possível de suas especificações. Quanto mais próximo D estiver de 1, mais próximas as respostas originais estarão de seus respectivos limites de especificação. O ponto de ótimo geral do sistema é aquele alcançado pela maximização da média geométrica (Equação 2.11), calculada através das funções *desirability* individuais.

Quando todas as respostas possuem a mesma importância no processo de otimização a Equação 8 deve ser utilizada. Senão, emprega-se a Equação (12).

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} (Y_i) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (2.12)$$

Onde k é o número de respostas, w_i o grau de importância individual de cada resposta e W a sua soma.

2.11. Considerações finais

Este capítulo teve o objetivo de apresentar o suporte teórico necessário para o desenvolvimento do presente trabalho. Desta forma, a partir da discussão dos conceitos relacionados à soldagem de pontos por resistência elétrica em liga de alumínio, foi verificado que este processo se caracteriza como uma alternativa na redução de peso dos veículos o que gera economia de combustível e consequentemente redução na emissão de CO₂. Todavia, o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica em ligas de alumínio apresenta dificuldades quando comparado com as aplicações convencionais onde o material utilizado é o aço. Para melhor compreensão sobre o assunto, primeiramente explicou-se sobre o processo de soldagem de pontos, abordando os principais parâmetros que exercem influência no mesmo, então, brevemente as ligas de alumínio foram comentadas mencionando sua classe, características principais e possíveis aplicações. Finalmente, a análise das pesquisas anteriores revelou como a soldagem de pontos em ligas de alumínio vem sendo discutida no meio industrial e acadêmico, o que mostra o tema de pesquisa como atual e de relevância científica.

Quanto às ferramentas de análise e otimização, foram apresentados os conceitos do Projeto e Análise de Experimentos, caracterizando esta como uma técnica importante no estudo científico dos problemas de engenharia. Entre seus projetos experimentais, discutiu-se a Metodologia de Superfície de Resposta, que é um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de problemas e, portanto, é o projeto experimental usado neste trabalho. Em seguida, foi apresentado o *desirability* como método de otimização, mostrando que o mesmo tem a capacidade de avaliar um conjunto de resposta simultaneamente, o que permite a determinação do conjunto das condições mais desejáveis para as propriedades estudadas.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

A partir dos conceitos que foram apresentados no capítulo anterior, este capítulo tem o objetivo de descrever o método experimental utilizado neste trabalho. A definição do método de pesquisa a ser seguido é importante, pois assim o processo estudado é tratado de forma sistemática, contribuindo para obtenção de informações que sejam objetivas e de relevância científica. Desta forma, o problema de pesquisa é exposto novamente para que em seguida o método experimental seja definido. Então, os equipamentos utilizados são brevemente apresentados. Finalmente, uma parte da MSR começa a ser descrita através da definição dos parâmetros, fixação dos níveis de trabalho, escolha das respostas de interesse, definição da matriz experimental e a explicação de como foi feito o registro das repostas.

3.2. Problema de pesquisa

Conforme apresentado no Capítulo 1, o presente trabalho tem como objetivo principal a otimização do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. Desta forma procurar-se-á identificar a combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização da resistência da junta soldada, garantindo, ao mesmo tempo, a qualidade do processo, associado a uma geometria adequada do ponto de solda. De forma geral, considerando a resistência da junta soldada, deseja-se a:

- Maximização da força;
- Maximização do diâmetro do ponto de solda;
- Maximização da penetração;
- Normalização da indentação;
- Normalização da microdureza;
- Normalização da porosidade.

A descrição do objeto de estudo o caracteriza como um problema complexo de otimização, pois se deseja obter a otimização de múltiplas respostas, considerando que o processo de soldagem empregado possui múltiplos parâmetros de entrada (*Figura 3.1*). Deste modo, uma abordagem científica para este tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam definidas corretamente, permitindo a obtenção de resultados coerentes e significativos.



Figura 3.1 – Esquema do objeto de estudo

3.3. Método experimental

Visando otimizar o objeto de estudo descrito anteriormente, este trabalho utilizou a experimentação como método de pesquisa. Dentre as técnicas de experimentação, foi empregado o Projeto e Análise de Experimentos, definido no item 2.8 como o processo de planejamento dos experimentos para que os dados apropriados possam ser coletados e posteriormente analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005). Considerando os projetos experimentais do DOE, a Metodologia da Superfície de Resposta foi selecionada por possuir um conjunto de ferramentas que são indicados para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento do fenômeno estudado. Por fim, para a otimização propriamente dita, foi empregado o Método *Desirability*, dado que o objeto de estudo apresenta um conjunto de respostas que deve ser avaliado simultaneamente. Com isso, o método experimental pode ser dividido em duas fases:

1ª Fase – Metodologia de Superfície de Resposta: utilizada no planejamento dos experimentos, coleta de dados, modelagem matemática das respostas e análise da influência dos parâmetros.

2ª Fase – Otimização *Desirability*: utilizada na obtenção da combinação ótima dos parâmetros de soldagem que permitam a maximização da resistência da junta soldada.

As *Figura 3.2 e 3.3* apresentam um fluxograma com as etapas seguidas em cada fase do método experimental. A definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho, escolha das respostas de interesse, definição da matriz experimental e registro das respostas (*Figura 3.2*) são descritos neste capítulo, o restante pertence ao Capítulo 4 na aplicação do método experimental.

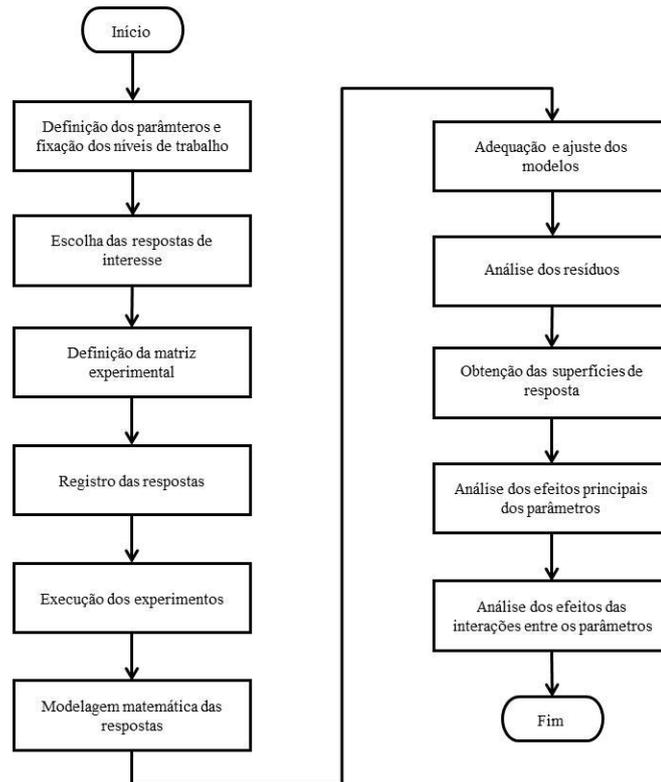


Figura 3.2 – Método experimental – Fase 1: Metodologia da Superfície de Resposta
(Adaptado de GOMES, 2010)

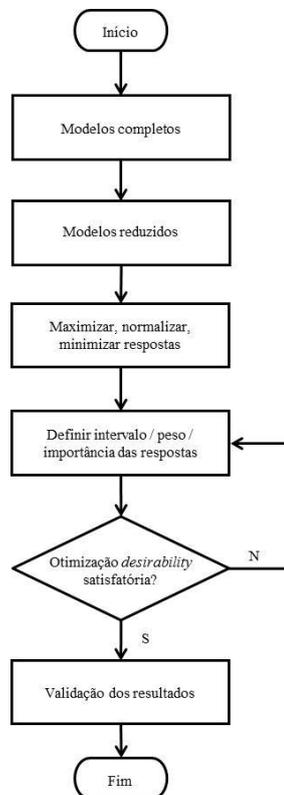


Figura 3.3 – Método experimental – Fase 2: Otimização *Desirability*

3.4. Materiais e equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados em uma empresa do setor automotivo localizada no sul de Minas Gerais. Em um primeiro momento, tentou-se realizar o experimento através de uma máquina estacionária marca Presol-Transweld do Laboratório de Soldagem da UNIFEI com potência de 50 kVA e corrente máxima de saída de 7 kA. Em função da espessura da liga de alumínio a ser trabalhada de 1,6 mm, de acordo com dados indicativos, uma potência mínima de 150 kVA e uma corrente mínima de 20 kA se tornam necessários, portanto o equipamento mencionado é inadequado para esta aplicação específica. Desta forma os experimentos foram conduzidos em uma linha de fabricação utilizando um equipamento portátil com potência de 250 kVA, com configuração física do tipo suspensa. As máquinas de solda ponto do tipo suspensa facilitam o acesso ao local que será soldado, sendo por este motivo as mais utilizadas em linhas de produção, principalmente no setor automotivo. As pinças de solda podem ser do tipo C ou X, a escolha das mesmas leva em consideração o acesso ao produto que vai ser soldado, a ergonomia, o comprimento dos braços, o espaço disponível nas estações de trabalho e a força necessária entre os eletrodos para a soldagem. Comumente encontram-se os dois tipos de pinça no processo produtivo, pois o mesmo possui várias máquinas de soldagem. Neste trabalho, o equipamento utilizado para a execução do experimento constituiu de uma máquina Düring de solda ponto suspensa e com pinças tipo X, potência de 250 KVA, média frequência (1000 Hz) e tensão no secundário de 13,2 V, conforme detalhe mostrado na *Figura 3.4*.

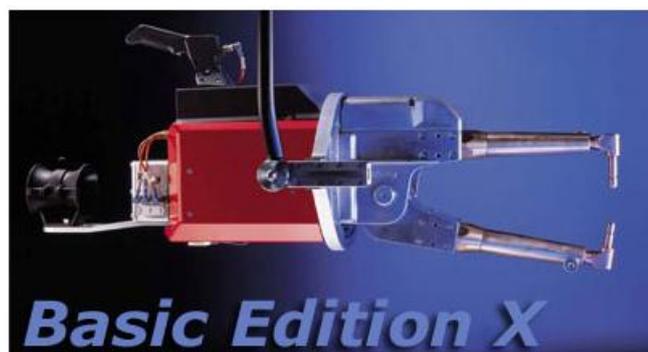


Figura 3.4 – Máquina de solda ponto suspensa com pinças do tipo X

O aparato experimental utilizado para a realização dos experimentos contou com os seguintes componentes:

- Máquina de solda ponto suspensa com pinças do tipo X;
- Computador;

- Alicate amperímetro digital;
- Alicate de pressão;
- Corpos de prova.

Duas chapas são identificadas por um número que corresponde à rodada do experimento, depois as mesmas são sobrepostas, conforme a norma, e então pressionadas por um alicate de pressão para que possam ser soldadas.

A montagem experimental foi constituída por um computador que é acoplado à máquina de solda onde os parâmetros tempo (T) e corrente de soldagem (C) são inseridos através de um software específico, além da possibilidade de inserção de outros parâmetros como, por exemplo, o tempo de pré e pós pressão, tempo de revenimento, etc. Durante a realização dos experimentos, um amperímetro digital tipo alicate foi utilizado para que a corrente real de soldagem fosse obtida, pois devido as perdas, verificou-se que a mesma era diferente da corrente de soldagem inserida no software.

A pressão do eletrodo (P) depende da rede de ar comprimido e a mesma foi regulada através de um manômetro, sendo ajustado a cada rodada do experimento de acordo com o requerido.

3.5. Metodologia de superfície de resposta

3.5.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho

Conforme mencionado anteriormente, os principais parâmetros de entrada do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica são a corrente de soldagem, o tempo de soldagem e a pressão do eletrodo. Todavia existem outros parâmetros que podem exercer influência neste tipo de solda, como por exemplo, o diâmetro, tipo e resfriamento do eletrodo, o tempo de pré-pressão, pré-aquecimento, resfriamento, entre outros.

Devido à dificuldade em se realizar testes preliminares, a fixação dos níveis de trabalho foi feita através dos dados que foram fornecidos pela empresa em que o processo foi estudado. Em função da larga utilização deste processo no meio fabril, bem como o nível de experiência dos profissionais envolvidos aliado aos requisitos de qualidade exigidos (aplicações no setor automobilístico), presumiu-se como ponto de partida para este trabalho que, provavelmente, os valores fornecidos estão próximos da região ótima de ajuste. Desta forma, não foi realizada a etapa inicial de aplicação do DOE equivalente a utilização do planejamento fatorial, iniciando-se com a utilização da MSR aplicado aos três principais

parâmetros de processo: pressão, tempo e corrente de soldagem. A **Tabela 3.1** apresenta os parâmetros analisados juntamente com os níveis de ajustes.

Tabela 3.1– Parâmetros e seus níveis de ajustes

Parâmetros	Unidade	Níveis de Trabalho				
		-2	-1	0	+1	+2
Pressão do Eletrodo	bar	2	3	4	5	6
Tempo de Soldagem	ciclos	7	9	11	13	15
Corrente de Soldagem	kA	30	31	32	33	34

Quanto às outras variáveis que compõem a soldagem de pontos por resistência elétrica, estas foram tratadas como parâmetros fixos, cujos ajustes ocorrem de acordo com o indicado na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 – Parâmetros mantidos fixos durante a realização do experimento

Parâmetro	Tipo/Valor adotado
Metal Base	Liga Al 5052 H32
Espessura da Chapa	1,6 mm
Diâmetro do Eletrodo	13 mm
Tipo de Eletrodo	C
Vazão de água no Eletrodo	23 l/min
Tempo de Pré-Pressão	350 ms
Tempo de Pré-Aquecimento	0 ms
Tempo de Resfriamento	0 ms
Tempo de Revenimento	0 ms
Tempo de Pós-Pressão	220 ms
Subida de Corrente	0 ms
Descida de Corrente	0 ms

Como material base foi utilizado uma liga da série 5XXX (Al/Mg), denominação Al 5052-H32, o qual é largamente empregado em aplicações específicas no setor automobilístico. A **Tabela 3.3** apresenta a composição química e as propriedades mecânicas desta liga de alumínio.

Tabela 3.3 – Composição química e propriedades mecânicas da Liga de Alumínio 5052-H32

Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Elementos de Liga (%)					
		Cu	Mn	Si	Cr	Fe	Mg
214,00	158,00	0,10	0,10	0,25	0,15-0,35	0,40	2,20-2,80

Os corpos de prova foram preparados para a soldagem de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma AWS/SAE 8.9M (1997). A **Figura 3.5** e a **Tabela 3.4** mostram as dimensões e requisitos na preparação e montagem dos corpos de prova, sendo que tais

especificações são utilizadas para o teste de cisalhamento. Todavia, vale ressaltar que todos corpos de prova que foram utilizados na realização deste estudo possuem a mesma dimensão, tanto os que foram utilizados para avaliação geométrica e análises macrográficas (embutidos) bem como as amostras que foram submetidas ao teste de cisalhamento.

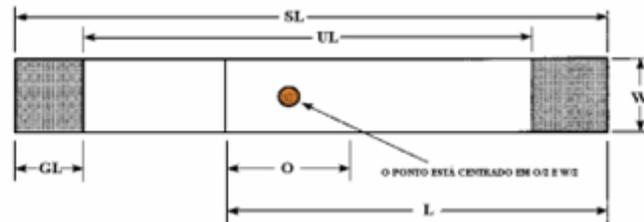


Figura 3.5 – Dimensão dos corpos-de-prova para o teste de cisalhamento (Adaptado de AWS/SAE D8.9, 1997)

Tabela 3.4 – Dimensão dos corpos-de-prova para o teste de cisalhamento (Adaptado de AWS/SAE D8.9, 1997)

Espessura da chapa (mm)	Comprimento da chapa (L) (mm)	Largura (W) (mm)	Sobreposição (O) (mm)	Comprimento total (SL) (mm)	Comprimento livre (UL) (mm)	Comprimento a segurar (GL) (mm)
0,60 - 1,29	105	45	35	175	95	40
1,30 - 3,00	138	60	45	230	105	62,5

A **Figura 3.6** mostra detalhes da montagem dos corpos de prova para a execução das soldagens, montagem esta realizada de acordo com a norma AWS/SAE D8.9 (1997) e a espessura da chapa do material a ser soldado (1,60 mm) conforme detalhes mostrados na **Tabela 3.4**.

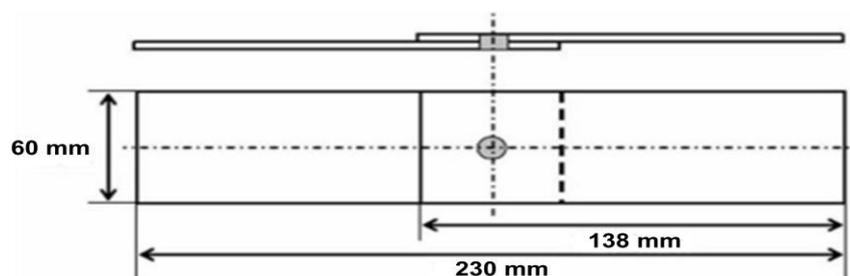


Figura 3.6 – Dimensões do corpo-de-prova com espessura das chapas de 1,60 mm

3.5.2. Escolha das respostas de interesse

As respostas selecionadas para serem analisadas neste estudo foram divididas em duas categorias, ou seja, geométricas e qualidade da solda.

Com relação a geometria da solda foram avaliados:

- Diâmetro do ponto de solda (D);
- Indentação (I);
- Penetração (Pen).

Com relação a qualidade da junta soldada foram analisadas:

- Força máxima ($F_{\text{máx}}$);
- Modo de falha (fratura) que ocorreu no ponto após o ensaio de cisalhamento;
- Microdureza (MD) da zona fundida;
- Área percentual representativa com poros (Poros) presente na zona fundida.

3.5.3. Definição da matriz experimental

A matriz experimental adotada foi o arranjo composto central (CCD), contendo três fatores em cinco níveis, seis pontos axiais, cinco pontos centrais e uma replicação, totalizando 38 experimentos. O valor adotado para α foi 2,0. O arranjo experimental foi gerado pelo software comercial MINITAB®, de forma aleatorizada visando diminuir os efeitos do desgaste do eletrodo nos pontos de solda. A *Tabela 3.5* mostra a combinação dos parâmetros que foram gerados, mas a mesma não se encontra na ordem em que os testes foram executados.

Tabela 3.5 – Matriz Experimental

Teste	Parâmetros		
	P (bar)	T (ciclos)	C (kA)
1	3	9	31
2	5	9	31
3	3	13	31
4	5	13	31
5	3	9	33
6	5	9	33
7	3	13	33
8	5	13	33
9	2	11	32
10	6	11	32
11	4	7	32
12	4	15	32
13	4	11	30
14	4	11	34
15	4	11	32
16	4	11	32
17	4	11	32
18	4	11	32
19	4	11	32

3.5.4. Registro das respostas

Após a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram posicionados de acordo com montagem descrita na **Figura 3.6** para que em seguida as soldas pudessem ser realizadas. Para cada condição experimental foi realizada uma réplica, sendo a primeira réplica do experimento utilizado para a determinação das características geométricas bem como da avaliação da presença de poros e nível de microdureza. Na segunda réplica foi realizado o ensaio de cisalhamento e análise do tipo de fratura obtido.

3.5.4.1. Registro das características geométricas do ponto de solda

A **Figura 3.7** descreve o procedimento utilizado na preparação dos corpos de prova para análises geométricas. Após as soldagens, os mesmos foram cortados e posteriormente embutidos de modo que a seção transversal do ponto de solda pudesse ser visualizada. No Laboratório de Metalurgia da UNIFEI, estas amostras foram preparadas e atacadas com o reagente químico Keller para que os pontos de solda pudessem ser revelados e fotografados. Com auxílio do software analisador de imagens *Analysis Doc®*, as dimensões do mesmo foram mensuradas, obtendo-se o diâmetro, a indentação, penetração da solda, estas medidas geométricas estão detalhadas na **Figura 3.8**.

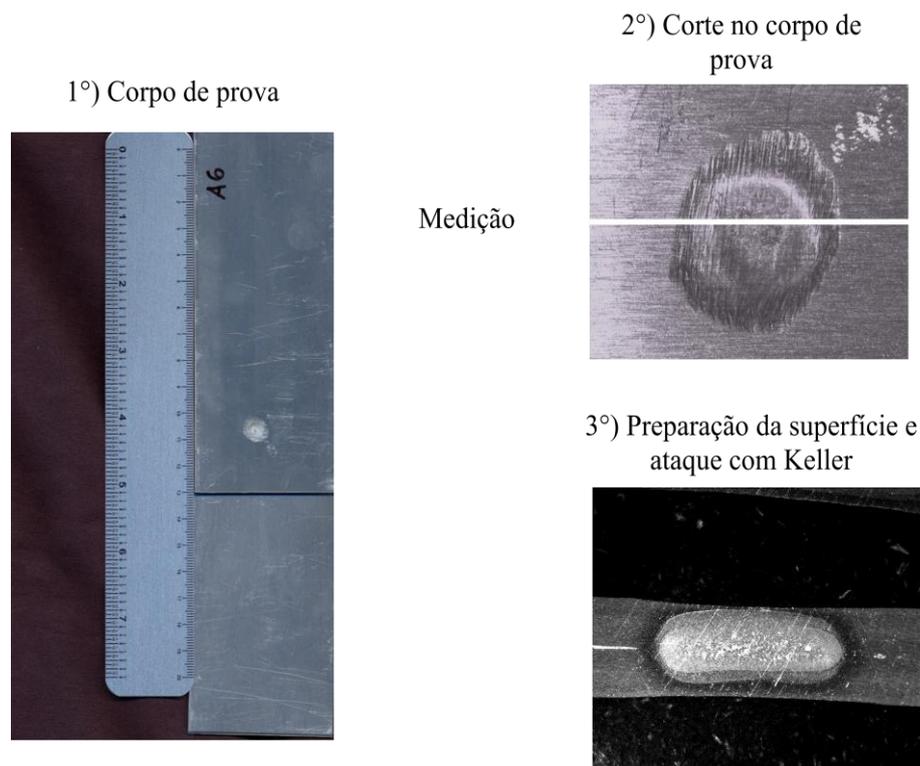


Figura 3.7 – Sequência de preparação dos corpos de prova

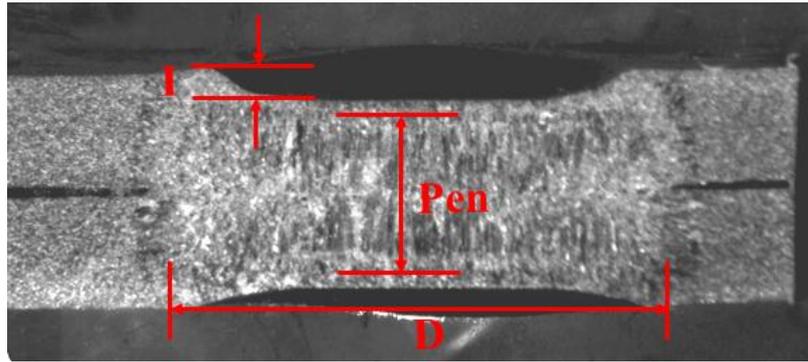
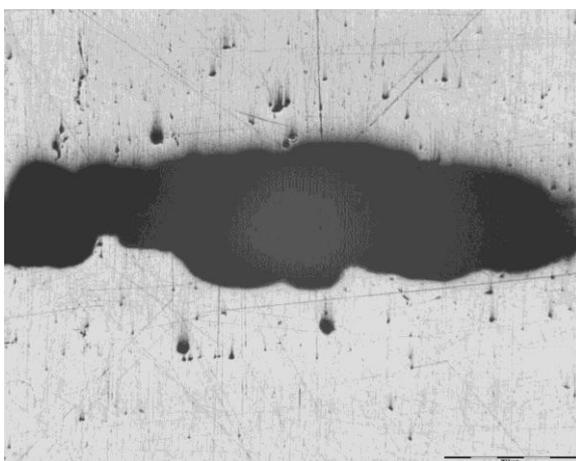


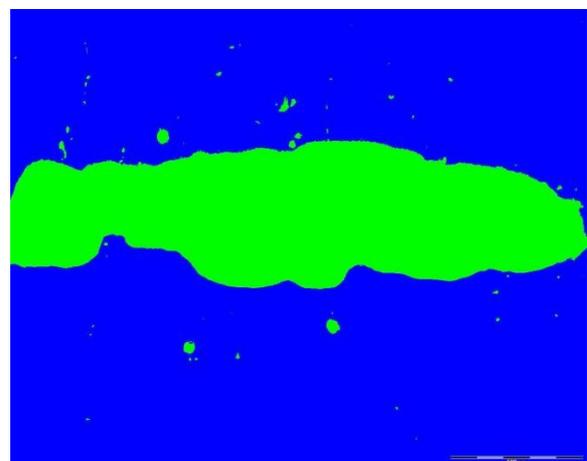
Figura 3.8 – Exemplo de perfil geométrico do ponto de solda

3.5.4.2. Registro dos poros no ponto de solda

A medição dos poros presentes no ponto de solda foi feita através do software analisador de imagens *Analysis Doc*®. Os corpos de prova foram polidos com OP-U (suspensão coloidal de sílica) e, posteriormente, através de um microscópio óptico com aumento de cinquenta vezes uma área representativa com poros na zona fundida foi selecionada para que a região com e sem poros pudesse ser quantificada. A **Figura 3.9** corresponde, a título de exemplo, ao experimento 13 com pressão de 4 bar, tempo de 11 ciclos e corrente de soldagem de 30 kA. Neste caso, a área com poros foi de $0,91 \text{ mm}^2$ (24,04%) e a área da zona fundida de $2,88 \text{ mm}^2$ (75,96%). A **Figura 3.9a** mostra a região selecionada para a medição que com auxílio do software foi colorida e mensurada. Desta forma, a região azul indica a zona fundida e a verde a região com poros (**Figura 3.9b**). Visando trabalhar com uma área fixa de análise no analisador de imagens, a área total, em todos os corpos de prova, corresponde ao valor de $3,79 \text{ mm}^2$, o que variava era a zona fundida e a região com poros.



(a) Região a ser mensurada



(b) Região mensurada

Figura 3.9 – Avaliação da presença de poros na zona fundida

3.5.4.3. Ensaio de microdureza

O ensaio de dureza mede a resistência a penetração de um indentador na superfície do corpo de prova. Este ensaio está ligado à capacidade do material em resistir à deformação, ou seja, materiais mais resistentes resultam em uma indentação menor e, por este motivo, apresentam valores de dureza maiores e vice-versa. A dureza do material fornece pistas importantes sobre as propriedades dos metais de forma rápida, sendo este um dos ensaios mais utilizados na indústria como parte dos requisitos de controle de qualidade.

A microdureza foi medida através do microdurômetro Digimess Microhardness Tester HVS -1000, sendo que o indentador utilizado consistiu de uma pirâmide de diamante e as medições foram feitas com uma carga de 100 g com os corpos de prova devidamente polidos. Três pontos foram mensurados na zona fundida e utilizou-se a média dos mesmos para as análises que foram feitas neste trabalho.

3.5.4.4. Registro das respostas do ensaio de cisalhamento

O teste de resistência ao cisalhamento foi realizado na Máquina Universal de Ensaios Eletromecânicos da EMIC com capacidade de 3000 kgf (30 KN), a uma velocidade de carga constante de 1 mm/minuto até a ruptura do corpo de prova. A **Figura 3.10** mostra, a título de ilustração, o equipamento utilizado durante a execução do ensaio de cisalhamento realizado no Laboratório de Ensaio Destrutivos e não Destrutivos (LEN) da UNIFEI.



Figura 3.10 – Ensaio de cisalhamento

Após o cisalhamento, os dados relativos ao ensaio foram obtidos, bem como o tipo de falha avaliado. Neste sentido, os modos de falha foram caracterizados em dois tipos distintos, ou seja, arrancamento (A) e fratura interfacial (FI).

3.6. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o método experimental utilizado para que os objetivos definidos para o presente trabalho pudessem ser alcançados. Considerando que o objeto de estudo foi considerado como um problema de otimização complexo, por envolver múltiplos parâmetros de entrada e múltiplas variáveis de resposta o método experimental ficou dividido na Metodologia de Superfície de Resposta e na Otimização *Desirability*, sendo que, algumas etapas da MSR descritas através do fluxograma apresentado são detalhadas neste capítulo e o restante será discutido no Capítulo 4.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Considerações iniciais

O Capítulo 4 descreve a aplicação do método experimental definido no capítulo anterior para se obter a otimização do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. As etapas restantes da MSR como a execução dos experimentos, modelagem matemática das respostas, adequação e ajuste dos modelos, análise dos resíduos, obtenção das superfícies de reposta, avaliação dos efeitos principais e interações dos parâmetros e a fase de otimização e validação dos resultados serão desenvolvidos no presente capítulo, juntamente com a apresentação e discussão dos resultados obtidos ao longo do estudo.

4.2. Execução dos experimentos

Os equipamentos utilizados para a execução do experimento foram descritos no item 3.4. Desta forma, os experimentos foram realizados pela passagem da corrente elétrica durante um determinado intervalo de tempo através da liga de alumínio 5052-H32 em corpos de prova cortados com dimensões de 138 x 60 x 1,60 mm. Realizados os experimentos e medidas as respostas de interesse, estas foram reunidas em duas matrizes experimentais de resultados, uma referente a parte geométrica, presença de porosidades e níveis de microdureza do ponto de solda e outra referente aos resultados obtidos para o teste de cisalhamento e tipo de fratura observada após o teste.

4.2.1. Características geométricas, microdureza e porosidades

A *Tabela 4.1* mostra os resultados obtidos para a geometria, microdureza e porosidades na região de solda. Nesta mesma tabela estão registrados o valor da corrente real (CR) de soldagem durante execução dos pontos. Dentre todos os experimentos realizados observou-se que no teste 9 (pressão do eletrodo de 2 bar, o tempo de 11 ciclos e corrente de soldagem de 32 kA) a formação do ponto de solda não ocorreu. Notou-se também que devido a complexidade associada à soldagem do alumínio, em função da dificuldade do processo, onde a corrente determinada pelo software não corresponde à corrente real, e às perdas inerentes do mesmo alguns resultados obtidos não permitiram caracterizar corretamente algumas respostas. Entre eles, o teste 14 do diâmetro do ponto soldado, o teste 10 da

penetração da solda e o teste 11 da microdureza. No teste 13, a avaliação da indentação não foi possível, já que a mesma praticamente não se formou durante o processo de soldagem. Dois dados referentes à porcentagem de poros presentes na zona fundida (testes 13 e 18) foram eliminados do estudo. Tais dados foram caracterizados como *outliers* e a presença dos mesmos poderia influenciar negativamente a modelagem matemática das respostas.

Tabela 4.1 – Matriz Experimental para Respostas Geométricas, Microdureza e Poros

Teste	Parâmetros				Respostas				
	P (bar)	T (ciclos)	C (kA)	CR (kA)	D (mm)	I (%)	Pen (mm)	MD (HV)	Poros (%)
1	3	9	31	29,0	7,75	10,23	2,58	66,67	14,49
2	5	9	31	29,5	7,52	8,14	2,85	66,13	18,86
3	3	13	31	29,2	8,80	10,98	2,63	54,83	13,91
4	5	13	31	29,7	8,22	6,98	2,77	60,53	11,01
5	3	9	33	31,3	7,90	9,25	2,83	63,20	*
6	5	9	33	31,7	6,54	10,11	2,36	63,28	8,14
7	3	13	33	30,8	8,59	12,35	2,77	58,80	5,40
8	5	13	33	31,5	7,23	12,33	2,06	58,60	10,26
9	2	11	32	*	*	*	*	*	*
10	6	11	32	30,2	8,22	13,58	*	56,90	11,29
11	4	7	32	30,4	6,51	8,28	1,59	*	4,07
12	4	15	32	30,5	6,98	10,59	2,01	61,00	14,68
13	4	11	30	28,8	7,03	*	1,99	58,70	24,04
14	4	11	34	32,6	*	9,66	1,70	58,17	8,79
15	4	11	32	30,2	8,16	11,43	2,60	58,77	14,10
16	4	11	32	30,5	7,87	10,23	2,51	57,10	12,83
17	4	11	32	30,3	8,69	10,29	2,93	57,57	13,03
18	4	11	32	30,8	8,75	10,34	2,91	59,50	*
19	4	11	32	30,8	8,42	10,71	2,88	55,80	12,35

4.2.2. Propriedades mecânicas da solda e análise de fratura

Após o ensaio de cisalhamento, as medidas observadas foram reunidas para compor a matriz experimental referente aos corpos de prova que foram cisalhados, ou seja, a segunda rodada do experimento. A **Tabela 4.2** mostra os resultados obtidos. Observou-se que no teste 9, correspondente a uma condição de pressão do eletrodo igual a 2 bar, tempo 11 ciclos e corrente de soldagem 32 kA, não ocorreu a formação do ponto de solda. Em função da complexidade relacionada ao processo de soldagem de pontos em ligas alumínio, alguns resultados obtidos não permitiram caracterizar corretamente algumas repostas, desta forma, três dados referentes à força máxima foram desconsiderados neste estudo (testes 3, 10 e 15). Após o rompimento foram avaliados os modos de falha, em todos os testes realizados, onde observou-se a presença de formas distintas e caracterizadas de fraturas como o arrancamento do ponto de solda (A) e a fratura interfacial (FI). Normalmente busca-se o arrancamento do

ponto de solda por proporcionar níveis de carga e absorção de energia maiores e a fim de garantir a confiabilidade da solda (PEREIRA *et al.*, 2010; POURANVARI *et al.*, 2007). Todavia, tal critério funciona relativamente bem para o aço carbono, pois a dureza no ponto de solda é maior que no metal base e, portanto, o arrancamento produz a maior força da junta soldada. Por sua vez, a eficácia deste critério para a avaliação da qualidade da solda ponto em alumínio não tem sido devidamente estudada pela comunidade de solda automotiva (SUN *et al.*, 2004). A FI pode ocorrer em função da presença de micro-trincas, por exemplo, que estão presentes na interface zona fundida e metal base. Observa-se que no teste 5 ocorre o arrancamento do ponto com força máxima de 4509 N e no caso do teste 8 apesar da fratura ser interfacial a força máxima é de 6864 N.

Tabela 4.2 – Matriz Experimental do Cisalhamento

Teste	Parâmetros				Respostas	
	P (bar)	T (ciclos)	C (kA)	CR (kA)	F _{máx} (N)	Modo de Falha (-)
1	3	9	31	29,0	4524	FI
2	5	9	31	29,5	3588	FI
3	3	13	31	29,2	*	FI
4	5	13	31	29,7	6192	A
5	3	9	33	31,3	4509	A
6	5	9	33	31,7	1367	FI
7	3	13	33	30,8	3256	FI
8	5	13	33	31,5	6864	FI
9	2	11	32	*	*	*
10	6	11	32	30,2	*	FI
11	4	7	32	30,4	2387	FI
12	4	15	32	30,5	5117	FI
13	4	11	30	28,8	2734	FI
14	4	11	34	32,6	5540	FI
15	4	11	32	30,2	*	FI
16	4	11	32	30,5	3306	FI
17	4	11	32	30,3	2732	FI
18	4	11	32	30,8	3342	FI
19	4	11	32	30,8	2138	FI

4.2.3. Análises preliminares dos resultados

Conforme mencionado no item 2.7.2, o diâmetro do ponto de solda pode ser determinado como $d = x\sqrt{t}$, onde normalmente x varia entre 3 e 6 dependendo do material e das variáveis de processo, sendo que o valor de x igual a 4 pode conduzir a uma condição adequada para a determinação do diâmetro do ponto. A **Tabela 4.3** mostra que para os testes realizados, o valor de x oscilou entre 5,15 (teste 11) e 6,96 (teste 3). Embora Han *et al.* (2011) mencionem que quando x é igual a 5 o risco do excesso de penetração ou expulsão é

minimizado, o mesmo não acontece quando x é igual a 6, pois este risco é maior e a degradação inevitável do eletrodo conduz a junta soldada com qualidade inferior. Para os resultados obtidos, não se observou a degradação do eletrodo, muito embora este fenômeno certamente aconteça para um número superior de soldas do que as que foram realizadas neste estudo (38 no total).

Tabela 4.3 – Diâmetro *versus* Força Máxima

Teste	P (bar)	T (ciclos)	C (kA)	D (mm)	F _{máx} (N)	Modo de Falha (-)	Valores de x	Diâmetro Alvo
1	3	9	31	7,75	4524	FI	6,12	$6\sqrt{t}$
2	5	9	31	7,52	3588	FI	5,94	$5\sqrt{t}$
3	3	13	31	8,80	*	FI	6,96	$6\sqrt{t}$
4	5	13	31	8,22	6192	A	6,50	$6\sqrt{t}$
5	3	9	33	7,90	4509	A	6,24	$6\sqrt{t}$
6	5	9	33	6,54	1367	FI	5,17	$5\sqrt{t}$
7	3	13	33	8,59	3256	FI	6,79	$6\sqrt{t}$
8	5	13	33	7,23	6864	FI	5,72	$5\sqrt{t}$
9	2	11	32	*	*	*	*	*
10	6	11	32	8,22	*	FI	6,50	$6\sqrt{t}$
11	4	7	32	6,51	2387	FI	5,15	$5\sqrt{t}$
12	4	15	32	6,98	5117	FI	5,52	$5\sqrt{t}$
13	4	11	30	7,03	2734	FI	5,55	$5\sqrt{t}$
14	4	11	34	*	5540	FI	*	*
15	4	11	32	8,16	*	FI	6,45	$6\sqrt{t}$
16	4	11	32	7,87	3306	FI	6,22	$6\sqrt{t}$
17	4	11	32	8,69	2732	FI	6,87	$6\sqrt{t}$
18	4	11	32	8,75	3342	FI	6,92	$6\sqrt{t}$
19	4	11	32	8,42	2138	FI	6,66	$6\sqrt{t}$

Geralmente existe uma relação direta entre a força máxima e o tamanho da zona de fusão, bem como entre a absorção de energia e ponto de solda livre de expulsão. A solda ponto com expulsão de metal da zona fundida mostra um decréscimo na energia absorvida, que impactará no tipo de fratura resultante (GOODARZI *et al.*, 2009). Segundo Pereira *et al.* (2010), a propagação das micro-trincas existentes na zona de fusão exercem influência no tipo de fratura, resultando, neste caso, no tipo interfacial. Por outro lado, a ausência de micro-trincas gera uma maior capacidade de absorção de energia, resultando em um tipo de fratura com arrancamento do ponto. Observa-se dos resultados obtidos na **Tabela 4.3** que, em alguns casos, diâmetros menores resultaram em forças maiores e vice-versa. Este foi o caso do teste 12, onde o diâmetro de 6,98 mm obteve uma força máxima de 5117 N, enquanto no teste 7, o diâmetro de 8,59 mm rompeu com uma força de 3256 N. Tais resultados, possivelmente ocorreram em função da presença de micro-trincas ou mesmo das porosidades presentes nos

corpos de prova, já que a expulsão de metal fundido do ponto de solda não foi notada nos testes realizados. De acordo com Senkara e Zhang (2000), as tensões e deformações, resultado da distribuição não uniforme da temperatura e do resfriamento podem causar falhas no material, e esta possibilidade é agravada em ligas de alumínio, devido ao aumento do grau de contração na solidificação. Por outro lado, a presença de impurezas e a segregação nos contornos de grão também podem ocorrer durante a solidificação, facilitando a formação das falhas. A combinação de todos estes efeitos provavelmente gerou a formação de pequenas micro-trincas entre a zona fundida e o metal base, como pode ser observado na **Figura 4.1**. Vale acrescentar, ainda, que a comparação entre várias ligas de alumínio usadas na fundição e na soldagem a arco revelou que o sistema Al-Mg é o segundo na suscetibilidade a formar as trincas perdendo apenas para o sistema Al-Cu (SENKARA e ZHANG, 2000).

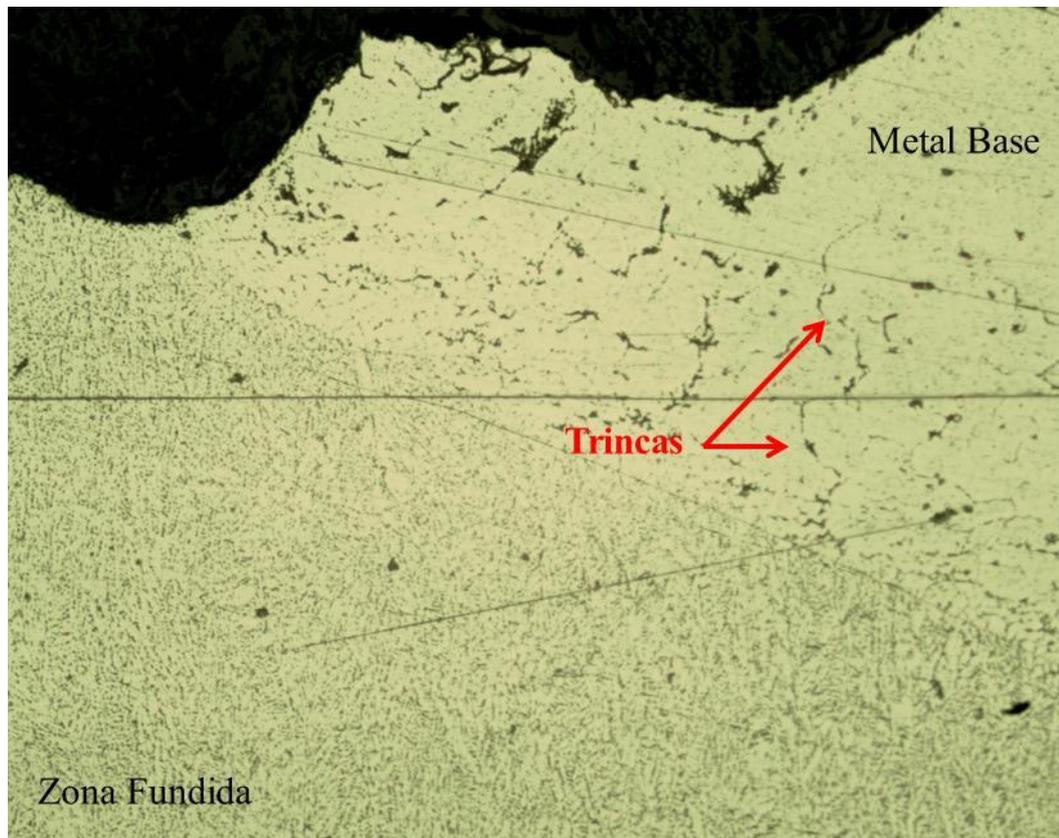
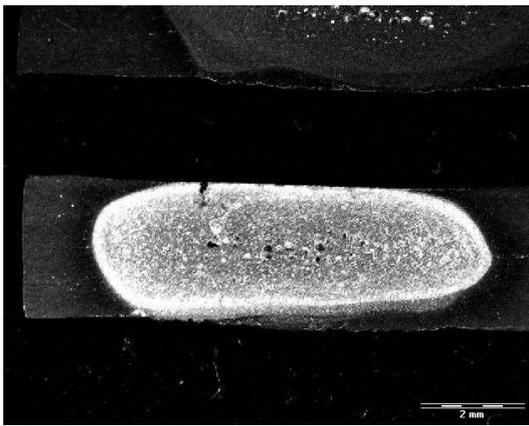


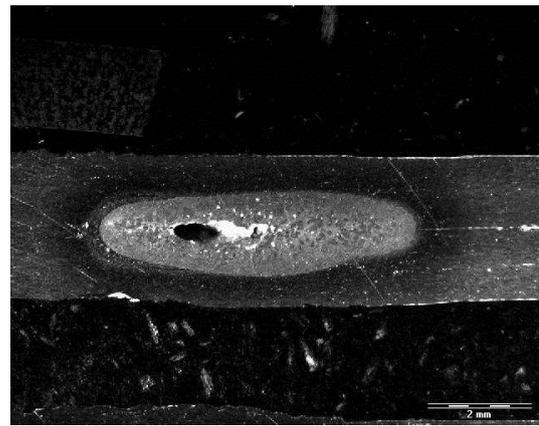
Figura 4.1 – Micro-trincas entre o metal base e a zona fundida no processo de solda ponto na liga de alumínio 5052-H32

Nos corpos de prova testados, notou-se uma presença constante de formação de poros em diferentes formatos e distribuição. A **Figura 4.2a** apresenta a formação de poros na zona fundida do ponto de solda, onde se observa que os mesmos encontram-se desagrupados, dispersos e possuem formato circular, diferente da **Figura 4.2b** que exibe os poros agrupados

na região de união do metal base formando uma espécie de elipse, podendo ser comparado ao rechupe, termo usado na fundição para designar o vazio que se forma durante o processo de solidificação do metal que se inicia na parte externa, onde o molde está exposto ao ar, na passagem do estado líquido para o sólido ocorre à diminuição de volume do metal e consequentemente a formação do vazio. Este fenômeno também pode ser conhecido como falta de fusão (LOF), ou seja, condição na qual a fusão não é completa, podendo se manifestar na linha central do ponto de solda, como verificado na **Figura 4.2b**.



(a) Poros desagrupados
(CP 18 – P = 4 bar, T = 11 ciclos e
C = 32 kA; $F_{\text{máx}} = 3342$ N)



(b) Poros agrupados
(CP 13 – P = 4 bar, T = 11 ciclos e
C = 30 kA; $F_{\text{máx}} = 2734$ N)

Figura 4.2 – Distribuição e morfologia dos poros presentes na zona fundida

Possivelmente, o local da formação bem como o formato dos poros pode influenciar o teste de cisalhamento, pois a área que será cisalhada será menor quando a porosidade se encontrar na região de união entre as chapas (Equação 4.1).

$$A_c = A_{ZF} - A_{Poros} \quad (4.1)$$

Onde: A_c – Área cisalhada;

A_{ZF} – Área da zona fundida;

A_{Poros} – Área dos poros.

As **Figura 4.3 (a) e (b)** mostram, de forma esquemática, a presença de poros desagrupados e agrupados, respectivamente, e a região pontilhada onde as forças (F) agem no teste de cisalhamento. Percebe-se que a área a ser cisalhada é influenciada pela presença dos poros. Desta forma, quando os mesmos estão agrupados na linha central possivelmente a força

de ruptura será menor, pois a área a ser cisalhada é menor. A presença trincas nestes poros não é interessante, pois uma região de tensão é gerada e a ruptura é facilitada.

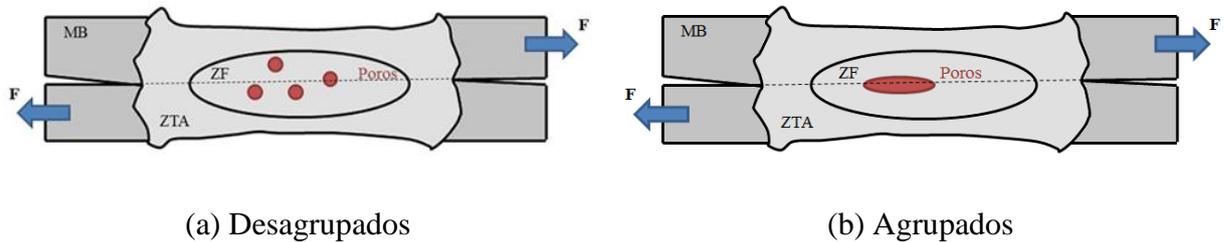


Figura 4.3 – Esquema do ponto de solda com poros

4.2.4. Modelagem matemática das respostas

A partir dos dados experimentais apresentados nas **Tabela 4.1 e 4.2**, é possível obter relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. A seção 2.9 apresentou a Eq. (2.7) como modelo de superfície de resposta de segunda ordem utilizado para representar a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e as variáveis de entrada. Desta maneira, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, onde são estudados os efeitos de três parâmetros, podemos escrever a Eq. (2.7), conforme indicado pela Eq. (4.2) a seguir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 T + \beta_3 C + \beta_{11} P^2 + \beta_{22} T^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{12} PT + \beta_{13} PC + \beta_{23} TC \quad (4.2)$$

Onde: y – Resposta de interesse

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$)

P – Pressão do eletrodo

T – Tempo de soldagem

C – Corrente de soldagem

A estimação dos coeficientes foi feita através do software estatístico MINITAB®, que para esta finalidade utiliza o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). A

Tabela 4.4 apresenta os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas consideradas neste trabalho. Os respectivos p -values dos coeficientes estimados estão presentes na **Tabela 4.5**.

Tabela 4.4 – Coeficientes estimados para modelos quadráticos completos

Coeficiente	Parâmetro	Respostas					
		D	I	Pen	MD	Poros	Fmáx
Constante	Constante	8,3961	10,5134	2,7627	57,9774	12,7212	2879,5
β_1	P	-0,4634	-0,5466	-0,0972	0,3424	2,8052	716,1
β_2	T	0,2557	0,5952	0,0293	-3,6026	1,5892	486,1
β_3	C	-0,2288	1,0729	-0,0874	-0,3346	-4,3800	456,9
β_{11}	P ²	0,2104	0,9316	0,3133	-0,1521	-2,1173	374,6
β_{22}	T ²	-0,4006	-0,3245	-0,2403	2,8454	-1,0158	218,1
β_{33}	C ²	-0,4337	-0,8594	-0,2300	0,2582	0,7442	314,4
β_{12}	P*T	-0,0441	-0,3490	-0,0446	0,7442	-1,9562	1735,6
β_{13}	P*C	-0,2385	0,8667	-0,1979	-0,6608	2,0813	-599,6
β_{23}	T*C	-0,0473	0,7160	-0,0422	1,0442	2,6337	771,4

Coeficientes em **negrito** indicam os termos significativo

Tabela 4.5 – *P-values* dos coeficientes estimados para modelos quadráticos completos

<i>p-value</i>	Parâmetro	Respostas					
		D	I	Pen	MD	Poros	Fmáx
Constante	Constante	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
β_1	P	0,007	0,024	0,191	0,584	0,035	0,069
β_2	T	0,025	0,004	0,556	0,001	0,055	0,059
β_3	C	0,102	0,001	0,108	0,474	0,001	0,071
β_{11}	P ²	0,089	0,001	0,012	0,780	0,039	0,392
β_{22}	T ²	0,001	0,027	0,001	0,001	0,097	0,218
β_{33}	C ²	0,005	0,001	0,001	0,503	0,200	0,098
β_{12}	P*T	0,739	0,122	0,527	0,273	0,107	0,003
β_{13}	P*C	0,103	0,003	0,021	0,326	0,091	0,111
β_{23}	T*C	0,722	0,009	0,550	0,139	0,044	0,055

Coeficientes em **negrito** indicam os termos significativo

4.2.5. Adequação e ajuste dos modelos

Verificou-se a adequação dos modelos através da Análise de Variância (ANOVA), feita com auxílio do software MINITAB®. A **Tabela 4.6** apresenta os resultados desta análise mostrando que os modelos desenvolvidos são adequados, pois apresentam *p-values* inferiores a 5% de significância. Os resultados da ANOVA indicam que a indentação e a penetração apresentam bons ajustes, pois os valores de $R^2(adj.)$ foram superiores a 80%. O diâmetro do ponto, a microdureza, a porcentagem de poros e a força máxima apresentam respectivamente ajustes de 77,15%, 72,45%, 75,17% e 79,30% que são considerados satisfatórios. Além disso, a **Tabela 4.6** mostra que o modelo para os poros apresenta falta de ajuste (*Lack-of-fit* < 0,05). Todavia, estes dados foram corrigidos através da redução dos modelos.

Tabela 4.6 – Análise de Variância

Resposta	Graus de Liberdade		Adj. SS		Adj. MS		F	P	Lack-of-fit	R ² (adj.) (%)
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
D	9	7	8,185	0,909	0,909	0,130	7,00	0,009	0,515	77,15
I	9	7	40,205	2,211	4,467	0,316	14,14	0,010	0,321	88,08
Pen	9	7	2,811	0,252	0,312	0,036	8,68	0,005	0,523	81,20
MD	9	7	159,782	21,894	17,754	3,128	5,68	0,016	0,235	72,45
Poros	9	6	315,083	34,749	35,009	5,792	6,04	0,020	0,017	75,17
F _{máx}	9	5	32064696	2560291	3562744	512058	6,96	0,023	0,232	79,30

Valores tabulados de F : $F_{95\%}(9,7)=3,68$; $F_{95\%}(9,6)=4,10$; $F_{95\%}(9,5)=4,77$

Verificada a adequação dos modelos, os mesmos foram reduzidos através da remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(adj.)$ e a redução da variância S dos modelos. Desta forma, os modelos finais apresentam os formatos descritos pelas Equações (4.3) – (4.8). A **Tabela 4.7** indica os novos ajustes obtidos.

$$D = 8,396 - 0,463P + 256T - 0,229C + 0,210P^2 - 0,401T^2 - 0,434C^2 - 0,239PC \quad (4.3)$$

$$I = 10,513 - 0,547P + 0,595T + 1,073C + 0,932P^2 + 0,325T^2 - 0,859C^2 + 0,349PT + 0,867PC + 0,716TC \quad (4.4)$$

$$Pen = 2,763 - 0,097P + 0,029T - 0,087C + 0,313P^2 - 0,240T^2 - 0,230C^2 - 0,045PT - 0,198PC - 0,042TC \quad (4.5)$$

$$MD = 57,871 + 0,259P - 3,578T - 0,335C + 2,835T^2 + 0,273C^2 + 0,744PT - 0,661PC + 1,044TC \quad (4.6)$$

$$Poros = 12,721 + 2,805P + 1,589T - 4,380C - 2,117P^2 - 1,016T^2 + 0,744C^2 - 1,956PT + 2,081PC + 2,634TC \quad (4.7)$$

$$F_{máx} = 3029,4 + 791,1P + 448,6T + 494,4C + 218,1T^2 + 314,4C^2 + 1810,5PT - 674,6PC + 846,3TC \quad (4.8)$$

Os resultados da **Tabela 4.7** mostram que os modelos finais desenvolvidos para o diâmetro, indentação e penetração se caracterizam como expressões de confiabilidade por apresentarem ajustes superiores a 80%. Todavia, o procedimento de redução melhorou o ajuste da microdureza de 72,45% para 75,61% e da força máxima de 79,30% para 79,72%, estes modelos continuam com ajuste considerado satisfatório. No caso dos poros o ajuste

continua satisfatório, pois com o procedimento adotado não foi possível melhorar o modelo desta resposta.

Tabela 4.7 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos reduzidos

Resposta	R ² (adj.) (%)		S	
	Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido
D	77,15	81,57	0,3604	0,3237
I(%)	88,08	88,08	0,5620	0,5620
Pen	81,20	81,20	0,1897	0,1897
MD	72,45	75,61	1,7685	1,6642
Poros	75,17	75,17	2,4066	2,4066
F _{máx}	79,30	79,72	715,5820	708,2130

4.2.6. Análise dos resíduos

A análise dos resíduos caracteriza-se como um procedimento importante visando garantir que os modelos matemáticos desenvolvidos garantam a adequação do modelo. Os resíduos são definidos como sendo a diferença entre o valor previsto do modelo e o valor experimental observado em determinada condição, sendo que de acordo com Montgomery (2005), os mesmos devem ser normais, aleatórios e não correlacionados. Os resíduos relacionados aos modelos reduzidos foram analisados com o auxílio do software *MINITAB*®. Os resultados desta análise são apresentados na **Tabela 4.8**.

Tabela 4.8 – Análise dos resíduos

Análise dos Resíduos		D	I(%)	Pen	MD	Poros	F _{máx}
Teste de normalidade	AD	0,181	0,486	0,339	0,202	0,186	0,567
	<i>p-value</i>	0,898	0,196	0,456	0,854	0,889	0,118
Análise de Correlação	Pearson	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	<i>p-value</i>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Análise de Aleatoriedade	Causas Especiais	*	1,6	*	*	*	*

Analisando a tabela anterior verifica-se que os resíduos são normais para todas as respostas por apresentarem coeficientes de Anderson-Darling (AD) menores que um e *p-values* maiores que 5% de significância. A análise de correlação mostrou que todos os coeficientes de *Pearson* são iguais a zero e *p-values* de correlação iguais a um, indicando que os resíduos não são correlacionados. Por fim, o teste de causas especiais, utilizado para

analisar a aleatoriedade dos resíduos apresentou ausência de causas especiais para todas as respostas, com exceção da indentação. Para essa resposta foi acusada a causa especial 1 e 6, que, respectivamente, dizem respeito a presença de um ponto que está a mais de três desvios padrão da linha central e quatro de cinco pontos estão a mais que um desvio padrão da linha central. Todavia, tais causas especiais são pouco significativas na previsão do modelo, podendo-se dizer que os resíduos de todas as respostas são também aleatórios. Desta análise, verifica-se que os resíduos encontram-se adequados, pois foram caracterizados como normais, não correlacionados e aleatórios.

4.2.7. Obtenção das superfícies de resposta

O software *MINITAB*® foi empregado para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas do diâmetro, indentação, penetração, microdureza, poros e força máxima do ponto de solda. Entretanto, tais superfícies serão discutidas em maiores detalhes posteriormente junto com a análise das interações entre os parâmetros.

4.2.8. Análise dos efeitos principais dos parâmetros

Com o desenvolvimento dos modelos finais torna-se possível analisar a maneira como as respostas do processo se comportam em relação às alterações realizadas nos parâmetros de entrada. Através da variação do parâmetro cujo efeito deseja-se estudar, enquanto os demais permanecem constantes, sua influência sobre as respostas de interesse passam a ser conhecidas. Desta forma, informações importantes sobre o processo em análise tornam-se claras.

As influências dos parâmetros da soldagem de pontos por resistência elétrica sobre a geometria do ponto e a qualidade do mesmo na liga de alumínio 5052-H32 são obtidas através das análises dos modelos desenvolvidos, são discutidas nesta e na próxima seção.

4.2.8.1. Efeitos principais sobre a geometria do ponto de solda

As *Figuras 4.4 - 4.6* apresentam os efeitos principais sobre a geometria do ponto de solda, mostrando como o diâmetro do ponto, a indentação e a penetração são influenciados pelos parâmetros de soldagem.

A *Figura 4.4* mostra os resultados para o diâmetro do ponto. Observa-se a redução do diâmetro com a elevação da pressão até aproximadamente o nível zero (4 bar). Para níveis inferiores a este não há um contato perfeito entre o eletrodo e o metal base, desta forma a

resistividade elétrica é maior o que leva ao aumento da energia gerada e conseqüentemente a diâmetros maiores. A partir do nível zero o contato se torna adequado e a energia gerada se estabiliza levando a normalização do diâmetro.

O diâmetro do ponto de solda aumenta até um limite máximo de corrente a partir do qual diminui devido a ocorrência da expulsão de metal na zona fundida. A expulsão diminui a zona de fusão em função da perda de calor gerada quando um volume derretido é expulso do ponto de solda (GOODARZI *et al.*, 2009). Pereira *et al.* (2010) não observou este decréscimo, possivelmente porque a liga 6182-T6 utilizada em seu estudo é tratada termicamente. Os resultados deste estudo sugerem a utilização da corrente próxima de seu limite intermediário, pois espera-se que o diâmetro maior proporcione maior resistência da junta soldada.

A zona de fusão aumenta com o aumento do tempo de soldagem até um limite máximo a partir do qual ocorre redução do diâmetro devido a perda de calor para as regiões vizinhas da zona fundida. A perda de calor aumenta quando o tempo de soldagem aumenta (GOODARZI *et al.*, 2009). Observa-se que neste caso o tempo de soldagem deve estar entre os níveis zero e um (11 e 13 ciclos) por proporcionarem maior diâmetro.

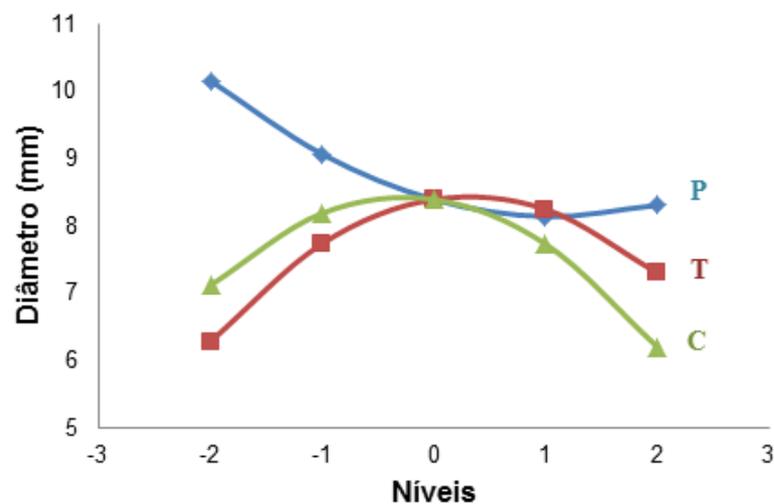


Figura 4.4 – Efeitos principais sobre o diâmetro do ponto

Os resultados para indentação (*Figura 4.5*) mostram a redução da mesma com a elevação da pressão até aproximadamente o nível zero. Para níveis inferiores a este não há um contato perfeito, desta forma a resistividade elétrica eleva-se fazendo com que a energia gerada seja maior. Por este motivo, o nível mais baixo de pressão reflete na maior indentação, pois o material é mais fluido nesta condição. Com a diminuição da geração de calor ocorre a

redução da indentação até seu limite intermediário, vindo a aumentar após este nível com a pressão prevalecendo sobre o material aquecido.

A corrente e o tempo de soldagem afetam a profundidade de indentação, a elevação destes dois parâmetros resultam no aumento desta resposta. A indentação pode afetar as propriedades mecânicas da junta soldada, sendo que esta resposta esta relacionada com a pressão do eletrodo e da temperatura entre a interface eletrodo/metal base. A maior entrada de calor eleva a temperatura entre a interface eletrodo/ metal base que acarreta no aumento do grau de deformação plástica que ocorre na superfície da chapa que esta sob a pressão dos eletrodos. Pontos de solda com expulsão apresentam severa indentação (GOODARZI *et al.*, 2009). Neste caso, observa-se o aumento da indentação com a elevação da corrente e do tempo de soldagem, porém de forma menos significativa para o segundo parâmetro. Desta forma, sugere-se trabalhar com estes parâmetros entre os níveis zero e um. Nos níveis estudados não detectou-se a expulsão de metal da zona fundida.

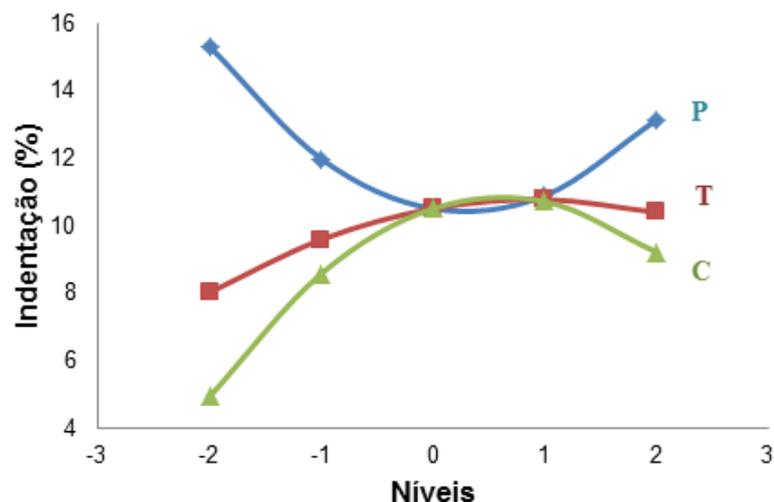


Figura 4.5 – Efeitos principais sobre a indentação

A **Figura 4.6** mostra o efeito da corrente e do tempo de soldagem na profundidade da penetração da solda. O aumento destes dois parâmetros resultam em maior penetração, ambos possuem um valor máximo que ocorre em função do avanço do eletrodo, assim como a expulsão que limita o crescimento da zona fundida. Em função disto, seria interessante que os valores de corrente e tempo de soldagem estivessem no nível zero, onde a maior penetração pode ser alcançada.

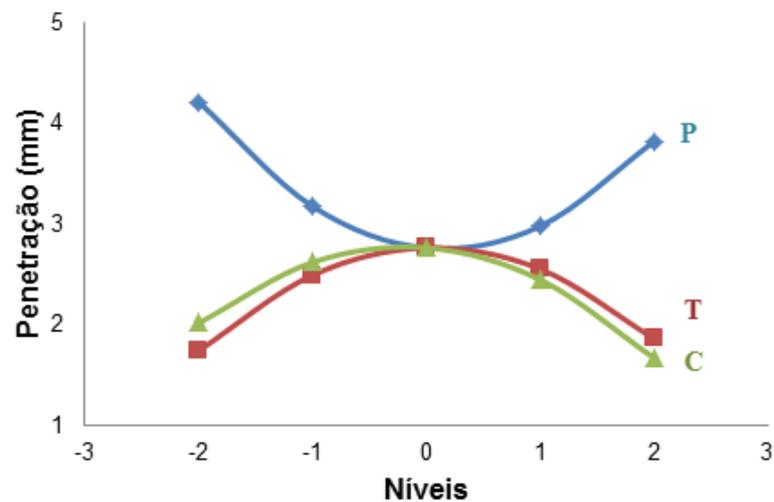


Figura 4.6 – Efeitos principais sobre a penetração

4.2.8.2. Efeitos principais sobre a qualidade do ponto de solda

A análise dos efeitos dos parâmetros sobre a qualidade do ponto de solda mostra-se importante para o monitoramento do processo em relação à microdureza, pois materiais mais duros tornam-se frágeis e a formação de poros na zona fundida podem influenciar a força máxima suportada pelo ponto de solda.

Neste contexto, a **Figura 4.7** mostra que o tempo de soldagem caracteriza-se como o parâmetro mais significativo para a microdureza e a pressão do eletrodo e corrente de soldagem praticamente não exerceram influência nesta resposta. A redução na dureza do ponto de solda é semelhante para todos os níveis de corrente de soldagem utilizados. Quanto maior o tempo de aplicação do fluxo de corrente de soldagem, maior será a energia gerada. Portanto, a velocidade da taxa de resfriamento será menor e, conseqüentemente, a dureza também, como ocorre entre os níveis zero e um. A partir deste momento a perda de calor se torna elevada e a dureza volta a aumentar devido a dissipação de calor da zona fundida para as regiões vizinhas. De acordo com Pereira *et al.* (2010), a elevação do tempo de soldagem aumenta a entrada de calor o que faz com que a dissolução de precipitados seja maior o que leva a redução da dureza na liga de alumínio 6XXX, principalmente no estado T6.

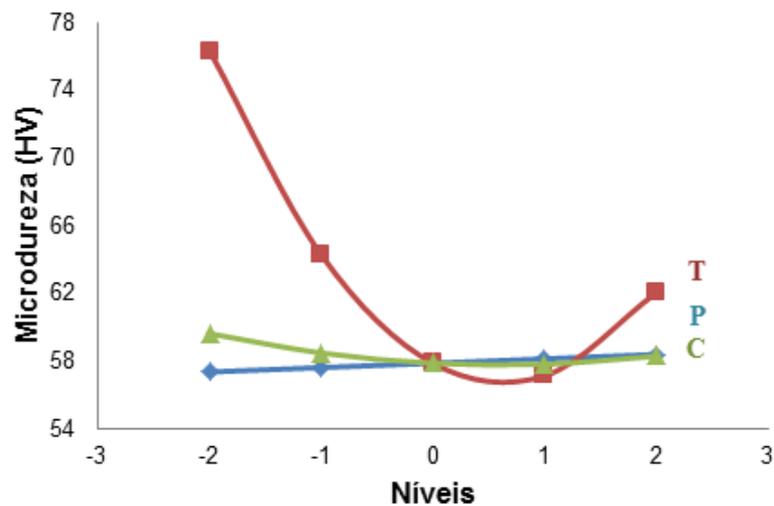


Figura 4.7– Efeitos principais sobre a microdureza

A expulsão de metal e as porosidades no ponto de solda aumentam com a elevação da corrente (GEAN *et al.*, 1999). A **Figura 4.8** apresenta os resultados para a porcentagem de poros na zona fundida. Observa-se que os poros apresentam seu maior valor nos níveis intermediários de pressão, entre zero e um. Níveis elevados de corrente de soldagem estão relacionados com a redução da porosidade. O aumento do tempo de soldagem e, conseqüentemente, da zona de fusão, implica no maior número de poros. Este parâmetro pode ser aumentado até um limite máximo a partir do qual ocorre à redução da zona fundida, devido à perda de calor para as regiões vizinhas, e a porosidade diminui. Os poros não foram medidos em função da zona fundida total, sendo assim, os resultados podem ter sido prejudicados e, possivelmente, por este motivo o comportamento da corrente de soldagem não condiz com o que foi encontrado no estudo de citado.

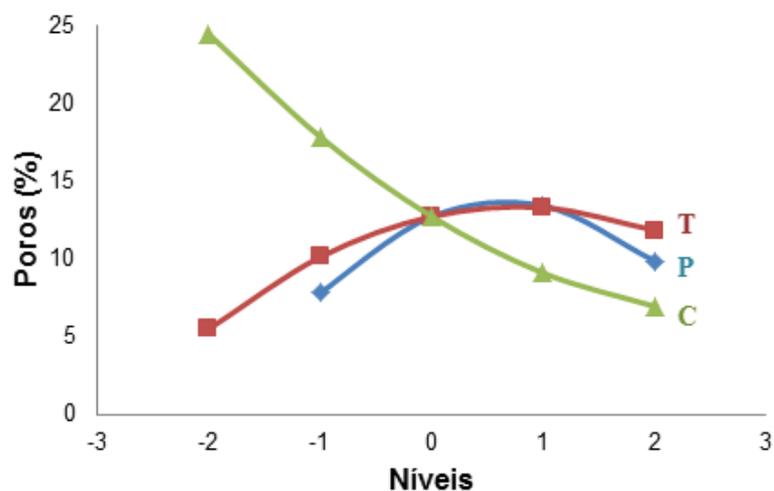


Figura 4.8 – Efeitos principais sobre os poros

Supõe-se que a resistência mecânica da solda ponto é influenciada principalmente pelo diâmetro, embora aceita-se que as propriedades mecânicas do ponto e da zona termicamente afetada da solda, onde as fraturas ocorrem, também possuem um papel relevante no desempenho das juntas soldadas. O tamanho e as propriedades mecânicas das soldas são influenciados diretamente pelos parâmetros de soldagem, como a corrente e o tempo de soldagem e a pressão do eletrodo (PEREIRA *et al.*, 2010). O aumento da força máxima, conforme indica a **Figura 4.9**, está relacionado com a elevação de todos os parâmetros. Todavia, estes valores não podem ser aumentados indefinidamente, pois o aumento da pressão do eletrodo leva ao aumento da indentação o que prejudica a qualidade do ponto de solda resultando em forças menores do que o esperado. A corrente de soldagem também tem um limite no qual ela deve ser trabalhada, pois a mesma pode levar a expulsão do metal na zona fundida. O aumento do tempo de soldagem está relacionado com uma maior zona de fusão, todavia existe um valor limite para este parâmetro, pois a elevação dele acima deste valor implica na perda de calor para regiões vizinhas que leva a redução do diâmetro e consequentemente da força.

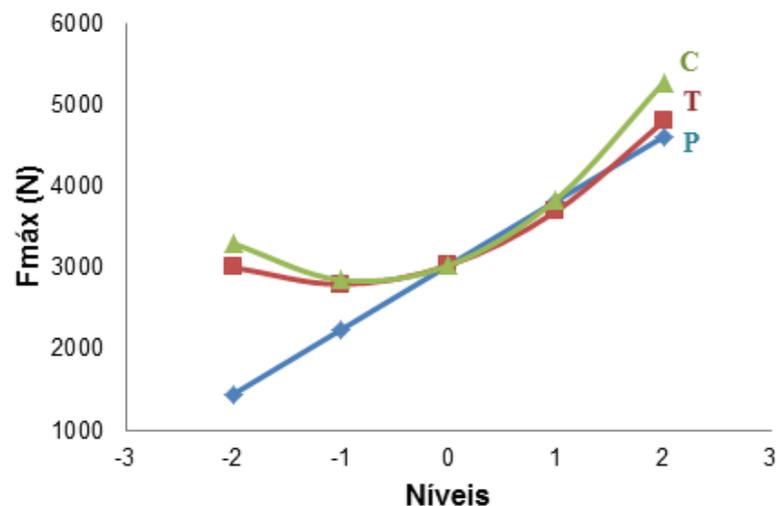


Figura 4.9 – Efeitos principais sobre a força máxima

4.2.9. Análise dos efeitos das interações entre parâmetros

A **Tabela 4.5** mostra que diversas interações entre os parâmetros se comportam como fatores significativos, ou seja, o efeito conjunto desses parâmetros exerce influência de forma significativa nos resultados do processo. A análise sobre estas interações foi avaliada através das superfícies de resposta desenvolvidas no item 4.2.7.

4.2.9.1. Efeito das interações sobre a geometria do ponto de solda

O diâmetro do ponto de solda não apresentou nenhuma interação significativa. A **Figura 4.10** apresenta o efeito conjunto da corrente de soldagem e da pressão do eletrodo sobre a indentação. Embora a **Figura 4.5** tenha mostrado que ambos os parâmetros são influentes sobre esta resposta, observa-se através da **Figura 4.10** que a interação entre eles também é significativa. A superfície obtida é côncava (Corrente *versus* I) e convexa (Pressão *versus* I), ou seja, temos uma função sela. Desta forma, o ponto ótimo ocorre para valores intermediários de corrente e pressão. A **Figura 4.11** apresenta o efeito da interação entre a corrente e o tempo de soldagem onde menor corrente e maior tempo e vice-versa implicam em valores inferiores para esta resposta. Caso o objetivo seja a minimização da indentação, a utilização de uma maior corrente em um menor tempo parece ser uma boa opção levando em conta a conservação do eletrodo de cobre. Esta condição permite uma maior vida do mesmo, o que é positivo para a solda. Nestes experimentos este critério não foi objetivo de avaliação, mas isso não implica que esta característica não seja importante. No ambiente fabril, o desgaste do eletrodo em soldas de alumínio é citado como fator crítico em função da alta condutividade elétrica do material base.

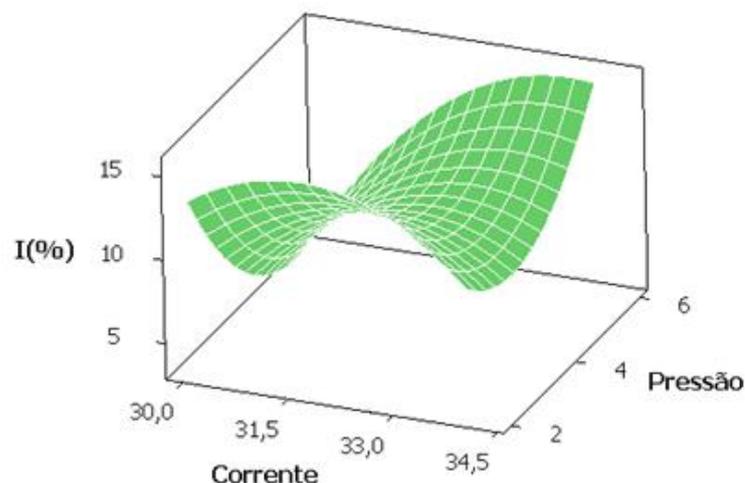


Figura 4.10 – Efeito da interação entre corrente de soldagem e a pressão do eletrodo sobre a indentação (Tempo = 11 ciclos)

No caso da penetração, o efeito da interação entre a corrente de soldagem e a pressão do eletrodo pode ser observado na **Figura 4.12**. Nota-se que a superfície é côncava (Corrente *versus* Pen) e convexa (Pressão *versus* Pen), sendo assim, como a função é sela, valores intermediários de pressão e corrente levam ao ponto ótimo. A penetração está diretamente

relacionada com a geração de calor no ponto de solda, desta forma, a utilização de uma maior pressão do eletrodo faz com que o contato entre as chapas seja melhor, não necessitando assim de uma corrente elevada para favorecer a penetração.

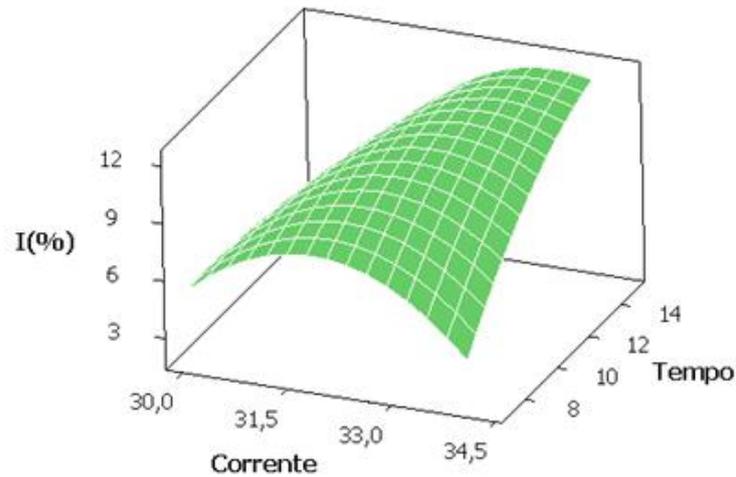


Figura 4.11 – Efeito da intera o entre corrente e o tempo de soldagem sobre a indenta o
(Press o = 4 bar)

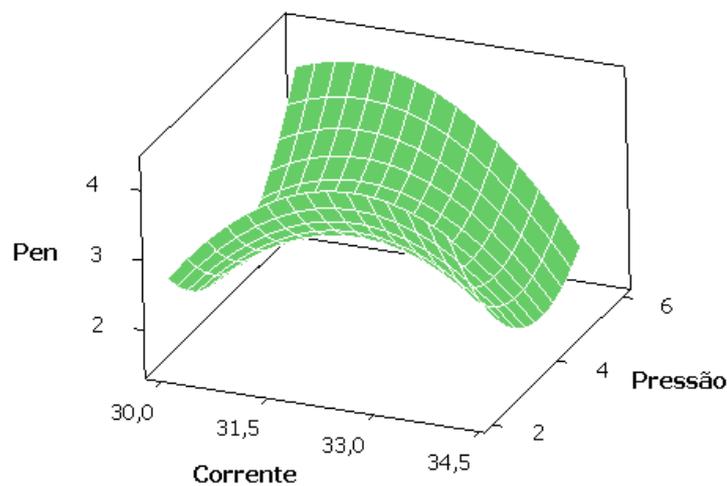


Figura 4.12 – Efeito da intera o entre corrente de soldagem e a press o do eletrodo sobre a penetra o (Tempo = 11 ciclos)

4.2.9.2. Efeito das intera es sobre a qualidade do ponto de solda

As *Figuras 4.13 – 4.15* representam os efeitos de algumas intera es relacionadas   qualidade da junta soldada, sendo que a microdureza n o apresentou nenhuma intera o significativa. Considerando a porosidade, verifica-se, atrav s da *Figura 4.13*, que a redu o

do número de poros pode ser obtida com menores tempos e maiores correntes de soldagem. Tal fenômeno também pode ser notado na **Figura 4.8**.

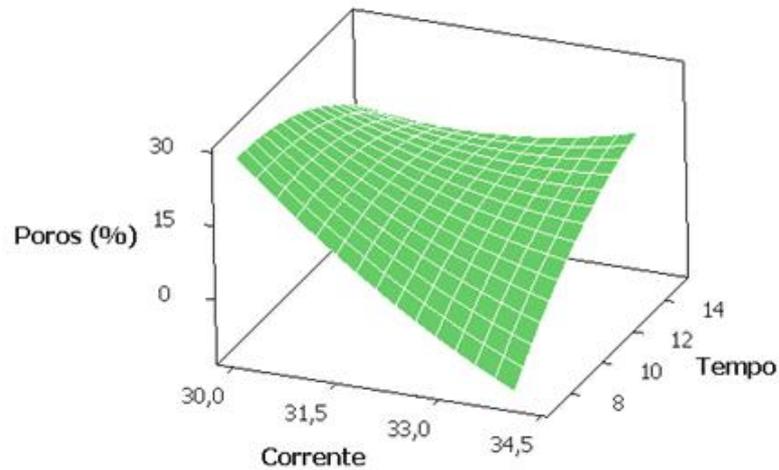


Figura 4.13 – Efeito da interação entre corrente e o tempo de soldagem sobre a porosidade (Pressão = 4 bar)

Considerando a força máxima, verifica-se, através das **Figura 4.14 e 4.15** que as interações entre o tempo de soldagem e pressão do eletrodo e corrente e tempo de soldagem são significativas. No caso da primeira interação, o aumento do tempo e da pressão resultam na maximização da resistência ao cisalhamento, como esperado. O mesmo pode ser notado na segunda interação, onde se percebe que a corrente e o tempo de soldagem nos seus níveis superiores, garantem a maior resistência das chapas à ruptura. A **Figura 4.9** também mostra o que foi descrito.

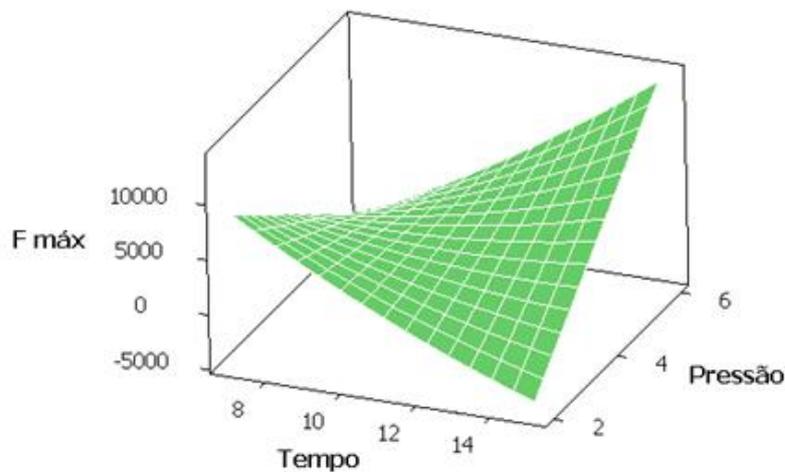


Figura 4.14 – Efeito da interação entre o tempo de soldagem e a pressão do eletrodo sobre a força máxima (Corrente = 32 kA)

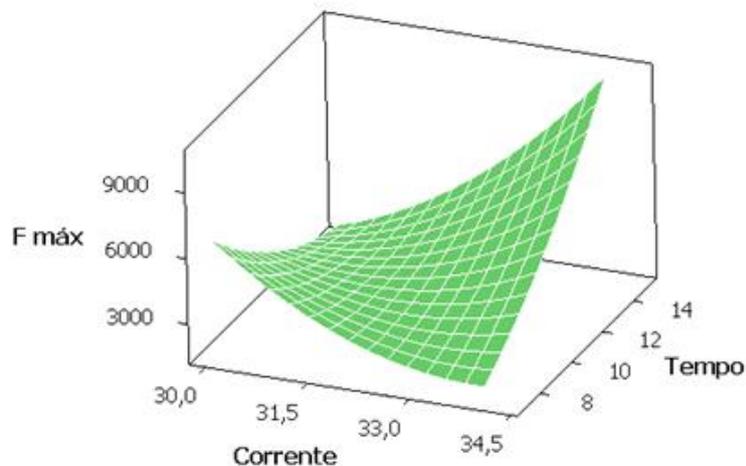


Figura 4.15 – Efeito da interação entre a corrente e o tempo de soldagem sobre a força máxima (Pressão = 4 bar)

4.3. Otimização do processo

A análise desenvolvida anteriormente é de grande relevância para o processo estudado, pois a partir da modelagem matemática realizada, muitas informações importantes passam a ser conhecidas. Entre elas, a influência que os parâmetros exercem sobre as respostas e a identificação das variáveis significativas permitem que estes fatores decisivos possam conduzir ao controle adequado do processo. Através de modelos confiáveis, é possível realizar a otimização dos resultados. Neste contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32 empregando a ferramenta *Desirability* do software Minitab®.

De acordo com os objetivos propostos, busca-se a otimização das características geométricas do ponto e da resistência da junta soldada. Portanto, o *Desirability* será aplicado sobre as respostas relacionadas ao diâmetro, indentação, penetração, microdureza, porosidade e força máxima do ponto de solda. Desta forma, as seções seguintes desenvolvem as etapas consideradas pela segunda fase do método experimental.

4.3.1. Método *desirability*

Como pode ser visto nos itens 4.2.8 e 4.2.9 há uma combinação de condições operacionais adequada para cada resposta estudada, de acordo com a faixa especificada. Quando o interesse for somente uma resposta, a análise realizada nestes dois itens pode ser suficiente ou um pouco mais aprofundada. Todavia, se o interesse for otimizar mais de uma

resposta (análise multivariada), a combinação dos parâmetros estudados para uma resposta isolada não é suficiente para otimizar o processo, visto que a combinação mais indicada para uma resposta não foi a mesma para todas.

O objetivo dessa fase do trabalho foi encontrar condições operacionais adequadas para um conjunto de resposta, além das individuais, ou seja, buscar a melhor solução que atenda a todas as respostas analisadas simultaneamente. Visando o que foi descrito anteriormente, o método *desirability* foi utilizado para otimizar o processo estudado.

Como descrito anteriormente no item 2.10, o índice global D pertence ao intervalo $[0;1]$ e quanto mais próximo este valor estiver de 1, mais próxima as respostas originais estarão de seus respectivos limites de especificação.

Para gerar a combinação ótima dos parâmetros analisados, estabeleceu-se uma faixa desejada para cada resposta, onde o resultado estava de acordo com critérios pré-estabelecidos conforme a necessidade. Desta forma, o *desirability* forneceu a melhor combinação de parâmetros que maximizou o diâmetro, penetração e força máxima da junta soldada e normalizou, ou seja, trabalhou com valores aceitáveis para a indentação, porosidade e microdureza do ponto de solda.

A **Tabela 4.9**, mostra a faixa das respostas pré-estabelecidas utilizadas para esta etapa, onde os pesos foram considerados iguais em todos os casos, o mesmo não acontece com a ordem de importância.

Tabela 4.9 – Faixas pré-estabelecidas para Solução Global 1

Resposta	Objetivo	Faixas utilizadas			Ordem de Importância
		Mínimo	Alvo	Máximo	
Diâmetro (mm)	Maximizar	7,0	8,0	8,0	7
Penetração (mm)	Maximizar	2,0	2,8	2,8	5
Microdureza (HV)	Normalizar	58,0	60,0	62,0	1
Poros (%)	Normalizar	0,0	5,0	10,0	1
Força Máxima (N)	Maximizar	3000,0	4000,0	4000,0	1

Através das respostas obtidas no experimento e das faixas desejadas dessas respostas, encontrou-se uma combinação dos parâmetros que satisfaz a todas as condições de maximização e normalização, simultaneamente. Tal combinação pode ser verificada na **Tabela 4.10**, onde a Solução Global 1 representa o conjunto dos parâmetros em sua forma praticável de ser realizada conforme a precisão dos equipamentos. Em função disso, a **Tabela 4.11** apresenta o conjunto de respostas otimizado.

Tabela 4.10 – Solução Global 1

Resultado	Desirability Global	Pressão	Tempo	Corrente
Solução Global	0,987842	2,64646	13,6263	33,5556
Solução Global 1	0,97672	2,6	13,6	33,5

Tabela 4.11 – Respostas previstas para Solução Global 1

Respostas	D	I	Pen	MD	Poros	Fmáx
Resultados	8,29	13,21	2,91	59,83	4,42	4094,27
Desirability	1,000	0,848	1,000	0,915	0,885	1,000

4.4. Validação dos resultados

Experimentos de confirmação foram realizados com o objetivo de comparar os resultados reais com os que foram calculados pela solução otimizada. Dessa forma, doze pontos de solda foram realizados para a solução determinada pelo *desirability* (Pressão = 2,6 bar, Tempo de soldagem = 13,6 ciclos e Corrente de soldagem = 33,5 kA). Mantiveram-se os parâmetros fixos para as demais variáveis do processo conforme a **Tabela 3.2**. Após a execução dos testes, quatro pontos de solda foram embutidos e o restante cisalhados as **Tabela 4.12 e 4.13** apresentam os resultados obtidos.

Tabela 4.12 – Resultados do experimento de confirmação para os corpos de prova embutidos

Experimento	Diâmetro	Indentação	Penetração	Microdureza	Poros
1	8,3	16,1	2,34	64,8	8,07
2	8,2	15,7	2,52	55,1	18,53
3	8,3	21,7	2,43	57,1	12,58
4	7,4	16,9	2,50	61,9	1,51
Média	8,05	17,60	2,448	59,73	10,173
Valor Previsto	8,3	13,21	2,91	59,83	4,42
Variação	-2,90%	33,23%	-15,89%	-0,18%	130,15%

Tabela 4.13 – Resultados do experimento de confirmação para os corpos de prova cisalhados

Experimento	Fmáx	Fratura
5	7092	A
6	5360	FI
7	5979	A
8	5518	FI
9	6503	FI
10	6813	FI
11	6970	FI
12	7221	A
Média	6432,0	*
Valor Previsto	4094,27	*
Variação	57,10%	*

Os resultados do experimento de confirmação mostram que para algumas respostas os resultados reais não ficaram próximos aos teóricos, como foi o caso da indentação, poros e força máxima. Todavia, o *desirability* para a indentação e poros é, respectivamente, 0,848 e 0,885, ou seja, o método utilizado indica que estas duas respostas serão mais difíceis de serem alcançadas.

Segundo Rossi (2007), no caso da indentação o valor normalmente aceito para aços é de 20% em relação a espessura da chapa, adotando este critério, o teste 3 de confirmação apresenta 21,7% e, portanto, este ponto apresentaria indentação excessiva. Já os outros experimentos de confirmação estariam dentro da faixa normalmente aceita. Mas como citado, este valor é adotado para aços, sendo assim, não é possível afirmar com exatidão que este seria um ponto de solda com indentação excessiva.

No caso da porosidade, possivelmente a medição desta resposta não foi a mais adequada, visto que apenas uma área representativa com aumento de cinquenta vezes com poros foi mensurada, ou seja, esta medida não corresponde a quantidade real de poros em relação à zona fundida. De acordo com Gean *et al.* (1999), quando a porosidade é elevada a resistência da solda fica mais fraca, porém a presença de poros em até 40% do diâmetro do ponto não tem efeito significativo no desempenho da junta soldada. Contudo, ao analisar a porosidade em função das outras respostas observa-se que a mesma não influenciou negativamente os resultados, pois as forças encontradas apresentam valores significativos.

O valor previsto para força máxima foi de 4094,27 N com *desirability* de 1,000, ou seja, é previsto que o experimento de confirmação atinja este valor teórico. O valor teórico não só foi atingido como foi superado, o que é favorável visando que o objetivo deste trabalho é encontrar a maior força da junta soldada.

Para validar as respostas analisadas foi calculado o intervalo de confiança (IC) de 95% com auxílio do software comercial MINITAB®. Esta faixa de variação foi comparada com os resultados do experimento de confirmação, verificando a validade dos resultados.

As **Tabela 4.14 e 4.15** mostram os valores calculados do intervalo de confiança para as respostas na tentativa de confirmar se os valores obtidos no experimento de confirmação estão de acordo com os previstos. Verifica-se que a maioria dos valores obtidos no experimento de confirmação está dentro do IC. No caso da indentação, a média não se encontra dentro do intervalo analisado. Todavia, conforme mencionado anteriormente, o valor normalmente aceito para aços é de 20% em relação a espessura da chapa, adotando este critério de avaliação a média esta dentro dos limites aceitos. Todos os valores previstos pelo *desirability* e as

médias dos experimentos de confirmação, com exceção da indentação, estão dentro do intervalo analisado, o que comprova que o modelo é bom.

Tabela 4.14 – Cálculo do intervalo de confiança das respostas analisadas embutidas

Experimento	Diâmetro	Indentação	Penetração	Microdureza	Poros
1	8,3	16,1	2,34	64,8	8,07
2	8,2	15,7	2,52	55,1	18,53
3	8,3	21,7	2,43	57,1	12,58
4	7,4	16,9	2,50	61,9	1,51
Valor Previsto	8,3	13,21	2,91	59,83	4,42
Média	8,05	17,60	2,448	59,73	10,173
Desvio Padrão	0,75	1,63	0,440	3,37	4,830
IC	$7,29 \leq D \leq 9,30$	$11,127 \leq I \leq 15,307$	$2,187 \leq P \leq 3,634$	$54,37 \leq MD \leq 65,28$	$0,0 \leq \text{Poros} \leq 13,939$

Tabela 4.15 – Cálculo do intervalo de confiança das respostas analisadas cisalhadas

Experimento	Fmáx	Fratura
5	7092	A
6	5360	IF
7	5979	A
8	5518	IF
9	6503	IF
10	6813	IF
11	6970	IF
12	7221	A
Valor Previsto	4094,27	*
Média	6432,0	*
Desvio Padrão	1572,60	*
IC	$1567,4 \leq F_{máx} \leq 6621,1$	*

Em relação ao tipo de fratura, a maioria obtida foi do tipo interfacial, mas não é possível afirmar que as maiores forças estão relacionadas com o arrancamento do ponto. No caso do experimento 7 (*Figura 4.16a*), temos o arrancamento do ponto e uma força máxima de 5979 N, enquanto o experimento 11 (*Figura 4.16b*) apresenta a fratura interfacial e uma força de 6970 N. Possivelmente, a fratura interfacial ocorre devido à presença de microtrincas presente na região soldada. Para Sun *et al.* (2004), os pontos que falhassem no modo interfacial seriam rejeitados pelos inspetores de qualidade por serem considerados de baixa qualidade e os que tivessem o arrancamento do ponto seriam considerados aceitáveis por produzir maior força na junta soldada. Entretanto, como observamos alguns pontos tiveram a fratura interfacial e apresentaram valores de força satisfatórios. Ou seja, a eficácia deste critério para a avaliação da qualidade da solda ponto em alumínio não se mostrou eficiente.

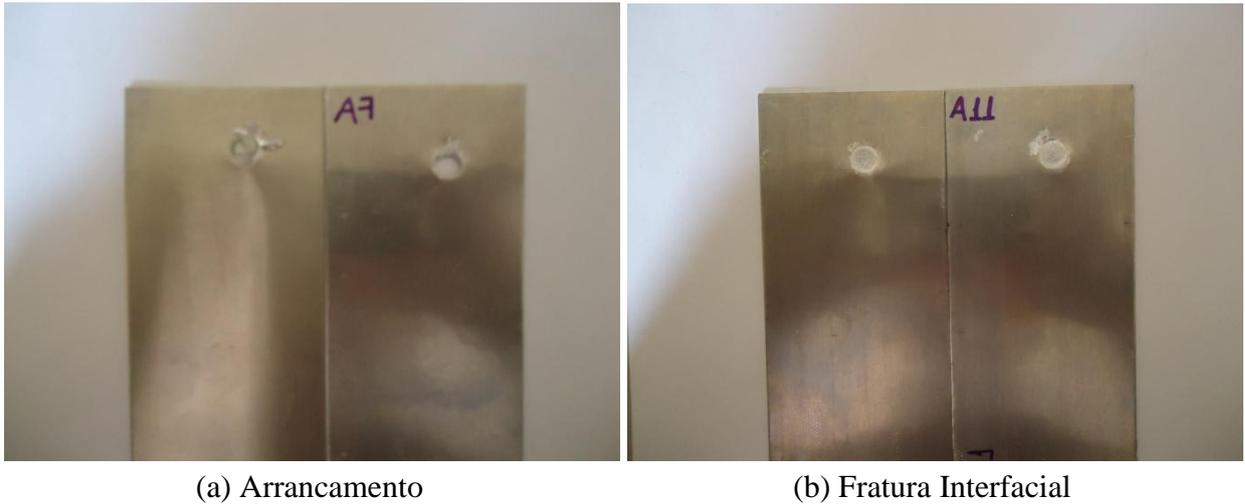


Figura 4.16 – Tipo de fraturas encontrado no experimento de confirmação no processo de soldagem de pontos na liga de alumínio 5052-H32

4.5. Considerações finais

Este capítulo teve o objetivo de finalizar a descrição da aplicação do método experimental descrito no Capítulo 3 para se obter a condição otimizada do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. Dessa forma, as etapas necessárias para completar o desenvolvimento da Metodologia da Superfície de Resposta e da Otimização *Desirability* foram aplicadas de forma sistemática, o que contribuiu para que resultados importantes fossem obtidos. Por outro lado, constatou-se que os resultados obtidos se mostraram satisfatórios apesar das dificuldades inerentes do processo.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

Considerando os objetivos deste trabalho de analisar os efeitos dos parâmetros na soldagem de pontos por resistência elétrica em chapas de ligas de alumínio 5052-H32, os resultados e análises realizados sobre a geometria e qualidade da solda permitiram concluir que:

1. Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse se caracterizam como expressões de confiabilidade por apresentarem ajustes superiores a 80% para o diâmetro, indentação e penetração. No caso da microdureza, presença de porosidade e força máxima de cisalhamento os ajustes obtidos se situaram entre 75 e 76%, desta forma estes modelos proporcionaram ajustes satisfatórios.
2. Em grande parte das soldas obtidas notou-se a presença de porosidades, com formatos e dispersão variados ao longo do ponto soldado. Em nenhum dos resultados obtidos se percebeu um nível de porosidade superior a 40%, condição esta considerada crítica para solda ponto em ligas de alumínio. Porém acredita-se que esta presença de porosidades tenha afetado o grau de ajuste dos modelos de microdureza do ponto de solda, porosidades e força máxima de cisalhamento.
3. Todos os parâmetros analisados apresentaram influência significativa sobre os resultados do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32. No entanto, o grau de importância entre eles varia de acordo com a resposta de interesse.
4. Considerando os efeitos dos parâmetros verificou-se que:
 - Um maior diâmetro do ponto de solda com maior penetração e menor nível de indentação pode ser obtido com valores intermediários de tempo, corrente de soldagem e pressão do eletrodo;
 - O nível de porosidade no ponto de solda pode ser reduzido com maior corrente, menor tempo de soldagem e pressão do eletrodo;
 - O tempo de soldagem foi o parâmetro mais influente no nível de microdureza do ponto de solda. Os resultados indicam que níveis máximos de corrente associado a menor tempo de soldagem é benéfico para um não endurecimento da solda, condição esta que pode minimizar o desgaste do eletrodo em pontos sucessivos;

- A maior resistência do ponto de solda ao cisalhamento ocorre quando todos os parâmetros estão em seus níveis mais altos, todavia estes parâmetros não podem ser aumentados indefinidamente, pois a qualidade da junta soldada será menor;
 - Verificou-se que a resistência ao cisalhamento é afetada pela presença de micro-trincas no limite entre zona fundida (ponto de solda) e zona termicamente afetada. No caso de arrancamento do ponto (desejável) provavelmente não há presença de micro-trincas, ao passo que no modo de fratura interfacial as micro-trincas influenciam no resultado final.
5. A análise das interações entre os parâmetros se apresentou como um elemento importante para o controle do processo, mostrando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Desta forma, esta análise não pode ser negligenciada.
6. O método *desirability* foi utilizado como ferramenta de otimização para as múltiplas respostas do processo estudado. Após a aplicação do mesmo, verificou-se que para o processo de soldagem de pontos por resistência elétrica na liga de alumínio 5052-H32, as melhores respostas resultam do emprego da seguinte combinação dos parâmetros: Pressão do eletrodo = 2,6 bar; Tempo de soldagem = 13,6 ciclos; Corrente de soldagem = 33,5 kA. Nestas condições, espera-se obter as seguintes respostas:
- Diâmetro = 8,29 mm
 - Indentação = 13,21%
 - Penetração = 2,91 mm
 - Microdureza = 59,83 HV
 - Poros = 4,42%
 - Força Máxima = 4094,27 N
7. Os experimentos de confirmação mostraram que no caso da indentação os valores reais não pertencem ao intervalo de confiança analisado, porém não é possível afirmar que os mesmos são ruins, pois o valor normalmente aceito para o aço é de 20% em relação a espessura da chapa, adotando tal critério os resultados encontrados geralmente estão abaixo deste limite. No caso das demais respostas, a média dos experimentos de confirmação e os valores previstos pelo *desirability* estão dentro do IC o que mostra que o modelo analisado é bom.

5.2. Sugestões para estudos futuros

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

- Avaliação do tempo de pré e pós pressão nas características geométricas e na qualidade do ponto de solda, sendo que possivelmente estes parâmetros podem exercer influência na formação dos poros e micro-trinca;
- Análise e medição dos poros em função da zona fundida total para verificar até que nível de porosidade afeta as propriedades mecânicas da liga estudada, bem como avaliar neste tipo de liga, a influência do teor de magnésio na formação dos poros;
- Avaliar a correlação entre porosidades, micro-trincas e tipo de fratura em testes de cisalhamento para diferentes tipos de liga da série 5XXX;
- Aplicação de outros métodos de otimização com restrições e pesos diferentes para os parâmetros analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. *Relatório de Sustentabilidade da Indústria do Alumínio*. Relatório, 2010. Disponível em:

http://www.abal.org.br/downloads/relatorio_sustentabilidade_industria_aluminio_2010.pdf

Acesso em: 06/04/2011.

ALCOA. *O alumínio na indústria automotiva*. Reportagem, 2010. Disponível em:

http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_automotivo.asp Acesso em 06/04/2011.

ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials and Design*, v. 27, p.125-131, 2006.

ASLANLAR, S.; OGUR, A.; OZSARAC, U.; ILHAN, E. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot spot welding. *Materials and Design*, v. 29, p. 1427-1431, 2008.

AWS/SAE D8.9M (1997). Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. American Welding Society. 550 N. Miami, 1997.

BARNES, T. A.; PASHBY, I. R. Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles Part II – adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of Materials Processing Technology*, v.99, p.72-79, 2000.

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

BRANDI, S. D. Soldagem por resistência. In: WAINER, E.; BRANDI S. D.; DE MELLO, F. B. H. *Soldagem Processos e Metalurgia*. São Paulo, 1992. p. 217-242.

CAPELARI, T. V. *Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052*. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Processos de Fabricação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

CHO, Y.; LI, W.; HU, S. J. Design of Experiment Analysis and Weld Lobe Estimation for Aluminum Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, v.85, p.45s-51s, 2006.

DAVIS, J. R. ASM International (Ed.) *ASM Handbook V.2: Properties and Selection – Nonferrous alloys and Special-Purpose materials*. Ohio, 1990. 1328 p.

DAVIS, J. R. ASM International (Ed.) *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum alloys*. Ohio, 2002. 784 p.

DARWISH, S. M.; AL-DEKHAL, S. D. Micro-hardness of spot welded (B. S. 1050) commercial aluminum as correlated with welding variables and strength attributes. *Journal of Materials Processing Technology*, v.91, p.43-51, 1999.

DENNISON, A. V.; TONCICH; MASOOD, S. Control and Process-Based Optimization of Spot-Welding in Manufacturing Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 13, p.256-263, 1997.

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*, v.78, p.80s-86s, 1999.

GOMES, J. H. F. *Otimização do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis*. 2010.120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

GOODARZI, M; MARASHI, S. P. H.; POURANVARI, M. Dependence of overload performance on weld attributes for resistance spot welded galvanized low carbon steel. *Journal os Material Processing Technology*, v.209, p.4379-4384, 2009.

HAN, L.; THORNTON, M.; BOOMER, D.; SHERGOLD, M. A correlation study of mechanical strength of resistance spot welding of AA 5754 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing and Technology*, v.211, p.513-521, 2011.

Intermachinery Comércio Ltda. I Seminário de Solda a Ponto, São Paulo: 2002.

KEARNS, W. H. *Welding Handbook: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes*. Miami: American Welding Society, 1980, 7. Vol. 3.

LI, Z.; HAO, C.; ZHANG, J.; ZHANG, H. Effects of Sheet Surface Conditions on Electrode Life in Resistance Welding Aluminum. *Welding Journal*, v.86, p.81s-89s, 2007.

MACHADO, I. G. *Soldagem e Técnicas Conexas*. Porto Alegre, 1996. 477p.

MARQUES, P. V. *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte, 1991. 325 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed. New York: John Wiley, 2005. 643 p.

NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2003.

OLSON, D. L.; ASM International (Ed.). *ASM Handbook V.6: Welding, Brazing, and Soldering*. Ohio, 1977. 1299 p.

OTOMAR, H. P. *Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA 1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo*. 2010. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

OZTURK, F.; TOROS, S.; KILIC, S. Evaluation of tensile properties of 5052 type aluminum-magnesium alloy at warm temperatures. *Archives of Materials Science and Engineering*, v.34, p.95-98, 2008.

PAIVA, A. P. *Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processo de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas*. 2006. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2006.

PEREIRA, A. M.; FERREIRA, J. M.; LOUREIRO, A.; COSTA, J. D. M.; BÁRTOLO, P. J. Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminum alloy. *Materials and Design*, v.31, p.2454-2463, 2010.

PHILLIPS, A. L. *Welding Handbook: Fundamentals of Welding*. London: American Welding Society, 1965. 4. Vol. 1.

POURANVARI, M.; ASGARI, H. R.; MOSAVIZADCH, S. M.; MARASHI.P. H.; GOODARZI, M. Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.12, p.217-225, 2007.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P. K. D. V. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 164-165, p.1106-1112, 2005.

RASHID, M.; MEDLEY, J. B.; ZHOU, Y. Nugget formation and growth during resistance spot welding of aluminium alloy 5182. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v.50, p.61-71, 2011.

REVISTA ALUMÍNIO. *Mais leves, menos poluentes*. Reportagem, 2010. Disponível em: <http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/4/artigo210824-1.asp>. Acesso em: 06/04/2011.

ROSSI, G. P. Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo método dos elementos finitos. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RUIZ, D. C. Contribuição ao desenvolvimento de processos de montagem e soldagem de carrocerias automotivas. 2005.107 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) – Engenharia Automotiva, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANTOS, F. B. Estudo da eficiência do processo de soldagem de pontos por resistência elétrica utilizado na indústria automobilística. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em

Sistemas de Gestão) – Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.

SENKARA, J.; ZHANG, H. Cracking in Spot Welding Aluminum Alloy AA5754. *Welding Journal*, v.79, p.194s-201s, 2000.

SUN, X.; STEPHENS, E. V.; DAVIES, R. W.; KHALEEL, M. A.; SPINELLA, D. J. Effect of Fusion Zone Size on Failure Modes and Static Strength of Aluminum Resistance Spot Welds. *Welding Journal*, v.83, p.308s-318s, 2004.

VARGAS, J. E. *Estudo da Formação, Geometria e Resistência do Ponto na Soldagem por Resistências: Uma Abordagem Estatística*. 2006. 143p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

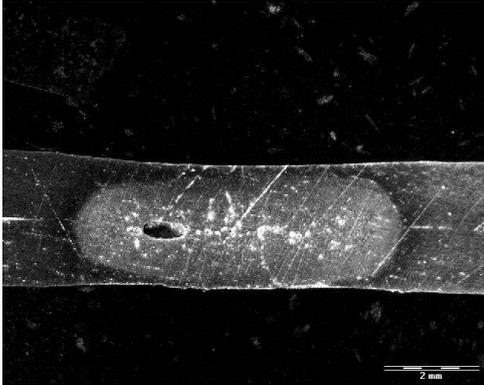
WEBTRANSPO. *Veículo X Alumínio: ótima combinação*. Artigo, 2010. Disponível em: <http://www.webtranspo.com.br/economia/17997-veiculos-x-aluminio-combinacao-perfeita>. Acesso em: 06/04/2011.

ZHOU, M.; ZHANG, H.; HU, S. J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds. *Welding Journal*, v.82, p.72s-77s, 2003.

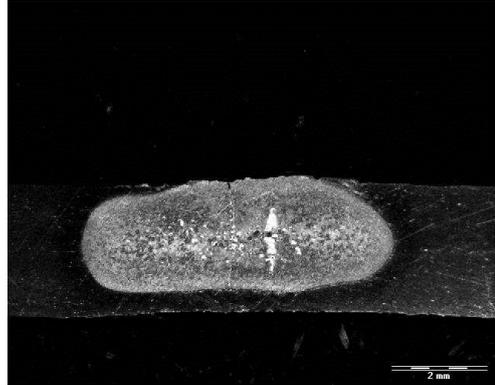
ANEXOS

Anexo A – Geometria dos pontos de solda observada nos experimentos

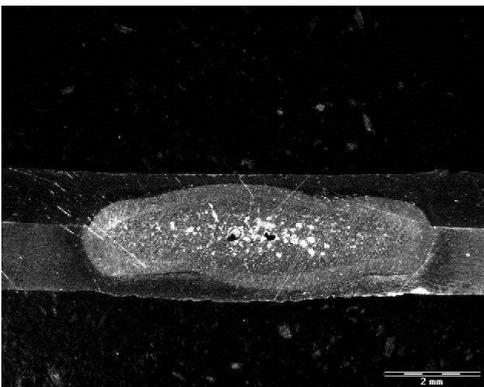
Corpo de Prova 1



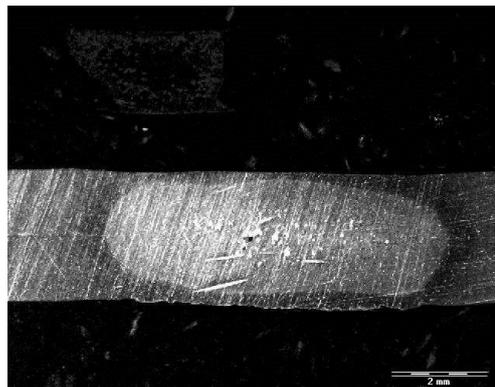
Corpo de Prova 2



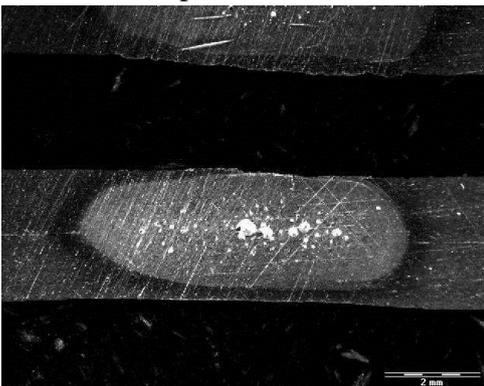
Corpo de Prova 3



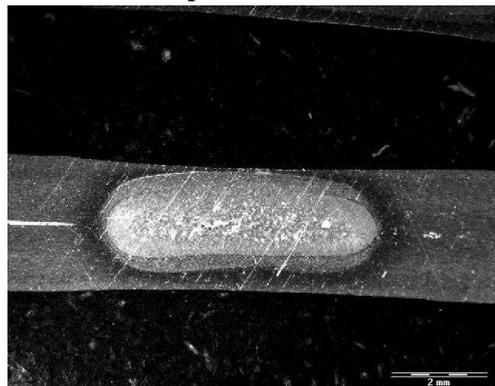
Corpo de Prova 4



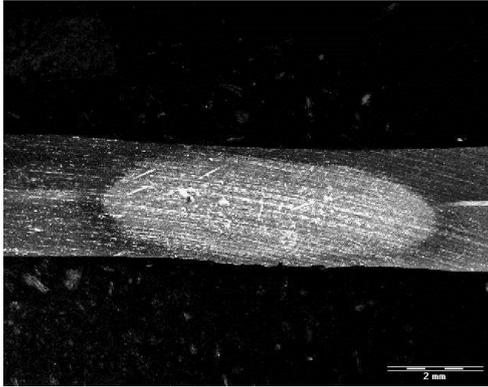
Corpo de Prova 5



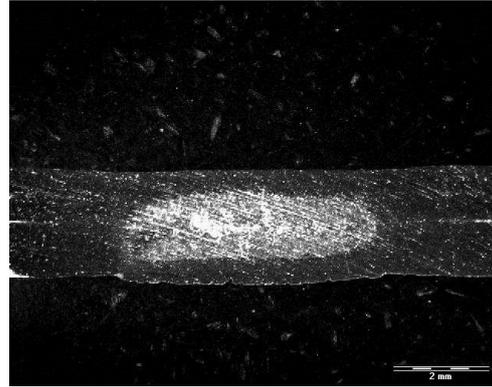
Corpo de Prova 6



Corpo de Prova 7



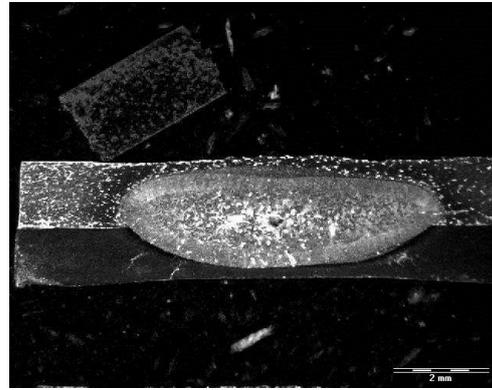
Corpo de Prova 8



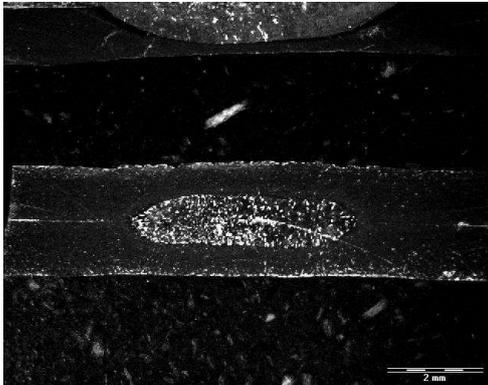
Corpo de Prova 9

Não foi possível soldar.

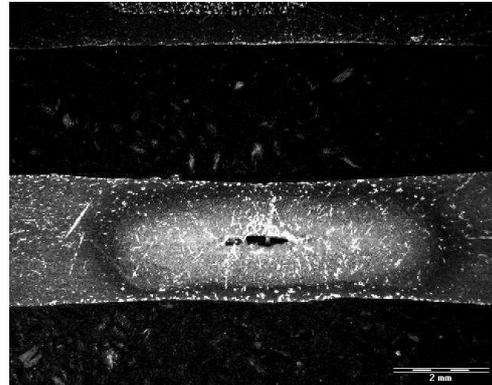
Corpo de Prova 10



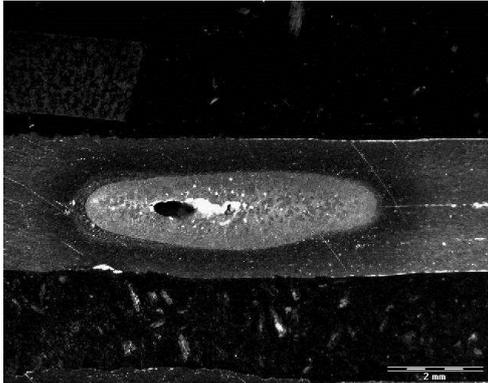
Corpo de Prova 11



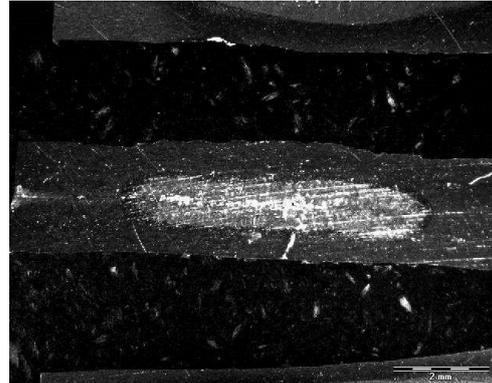
Corpo de Prova 12



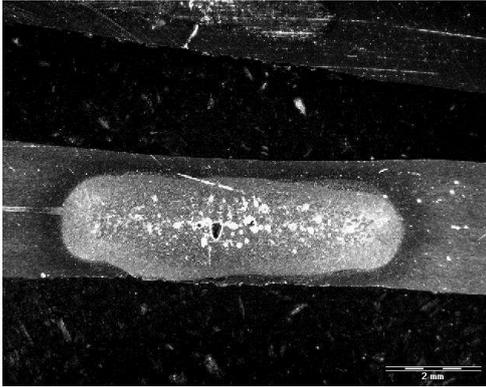
Corpo de Prova 13



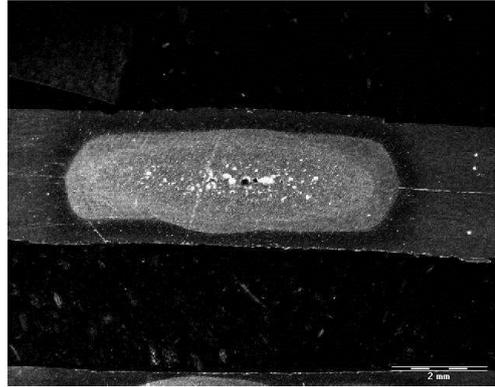
Corpo de Prova 14



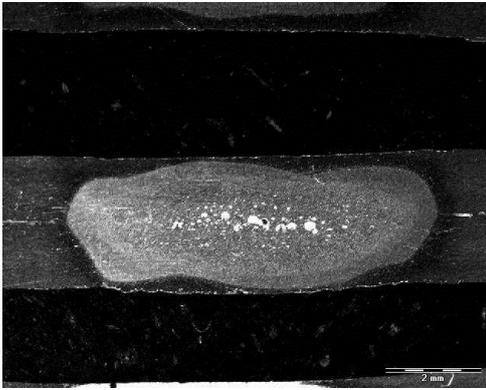
Corpo de Prova 15



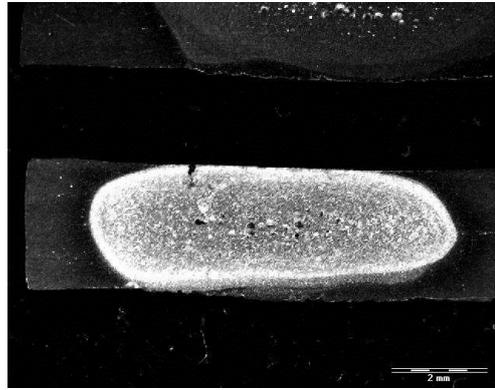
Corpo de Prova 16



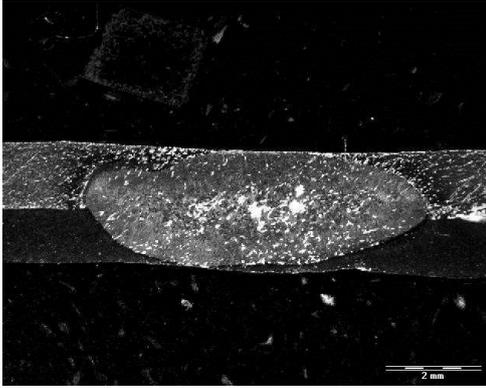
Corpo de Prova 17



Corpo de Prova 18

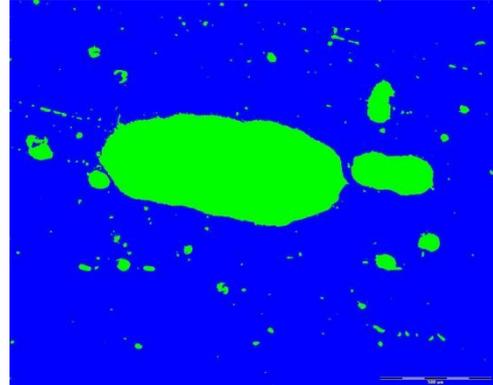
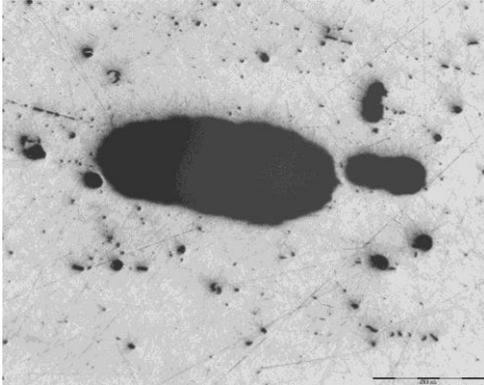


Corpo de Prova 19



Anexo B – Medição da área com poros na zona fundida

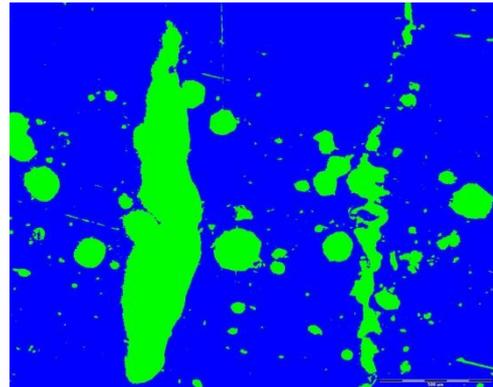
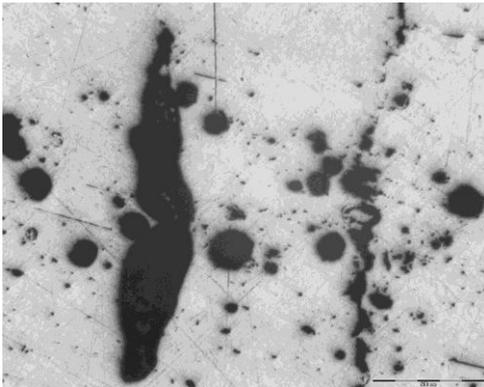
Corpo de Prova 1:



$$A_{\text{Poros}} = 0,55 \text{ mm}^2 \text{ (14,49\%)}$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,24 \text{ mm}^2 \text{ (85,51\%)}$$

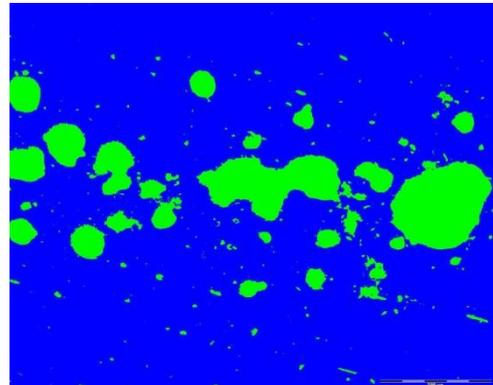
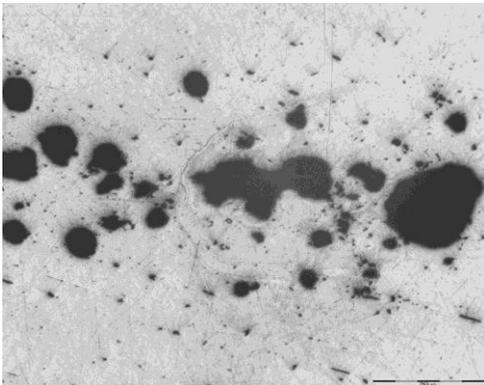
Corpo de Prova 2:



$$A_{\text{Poros}} = 0,72 \text{ mm}^2 \text{ (18,86\%)}$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,08 \text{ mm}^2 \text{ (81,14\%)}$$

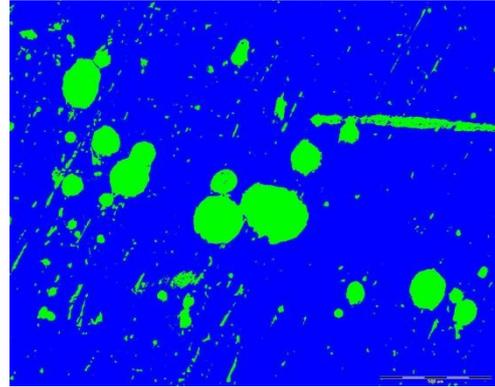
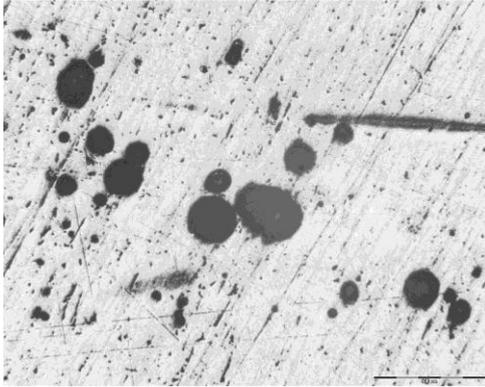
Corpo de Prova 3:



$$A_{\text{Poros}} = 0,53 \text{ mm}^2 \text{ (13,91\%)}$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,278 \text{ mm}^2 \text{ (86,09\%)}$$

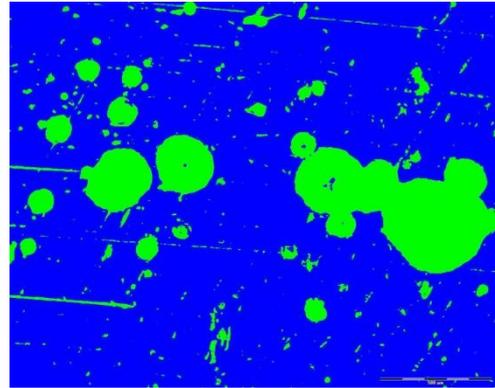
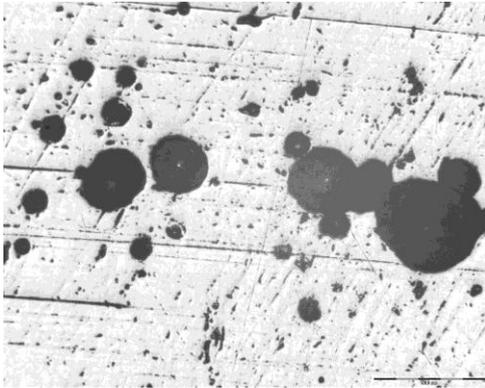
Corpo de Prova 4:



$$A_{\text{Poros}} = 0,42 \text{ mm}^2 (11,01\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,37 \text{ mm}^2 (88,99\%)$$

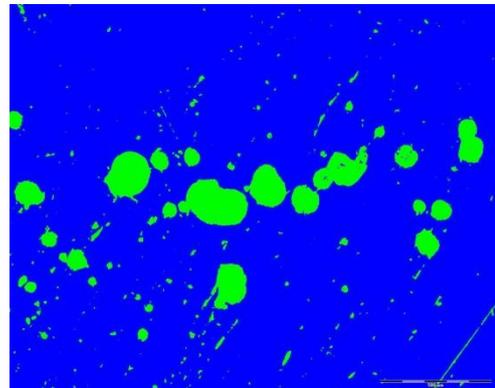
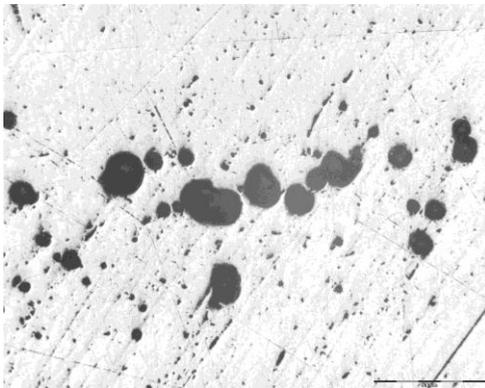
Corpo de Prova 5:



$$A_{\text{Poros}} = 0,65 \text{ mm}^2 (17,10\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,14 \text{ mm}^2 (82,90\%)$$

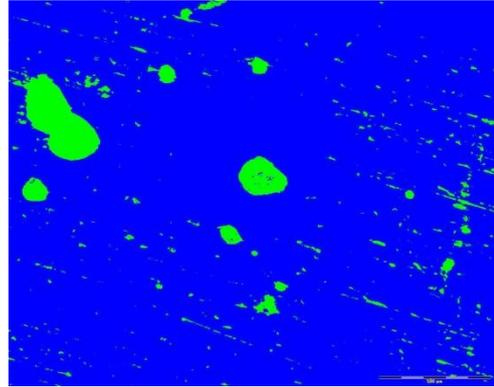
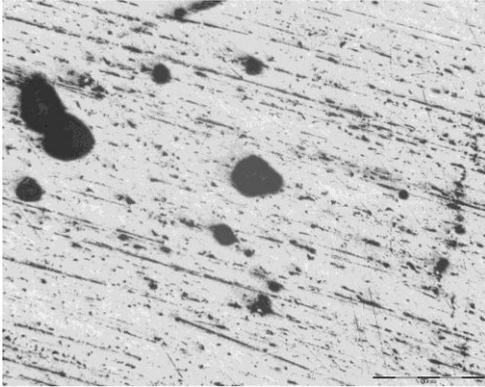
Corpo de Prova 6:



$$A_{\text{Poros}} = 0,31 \text{ mm}^2 (8,14\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,48 \text{ mm}^2 (91,86\%)$$

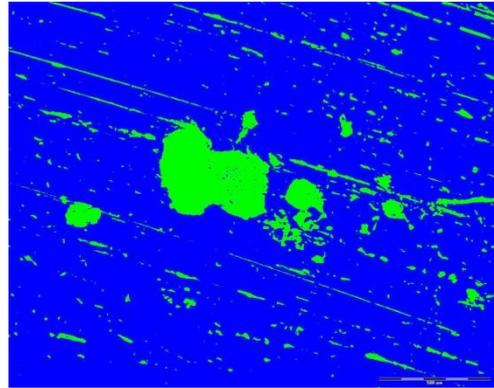
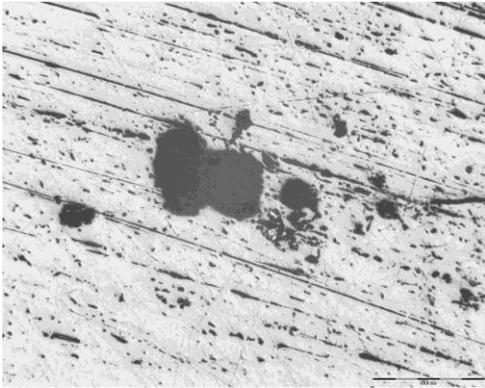
Corpo de Prova 7:



$$A_{\text{Poros}} = 0,20 \text{ mm}^2 (5,40\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,59 \text{ mm}^2 (94,60\%)$$

Corpo de Prova 8:

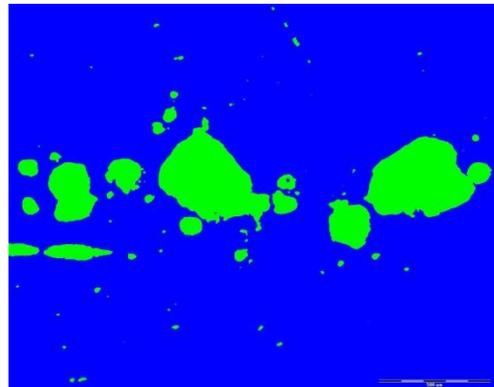
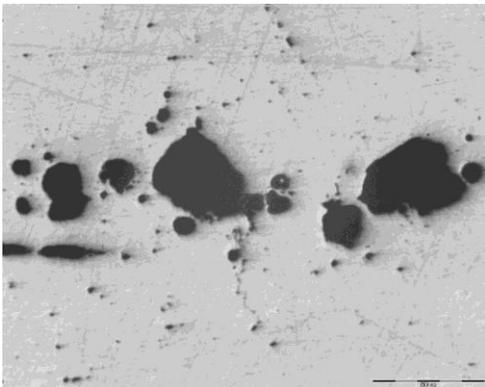


$$A_{\text{Poros}} = 0,39 \text{ mm}^2 (10,26\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,40 \text{ mm}^2 (89,74\%)$$

Corpo de prova 9: Não foi possível soldar.

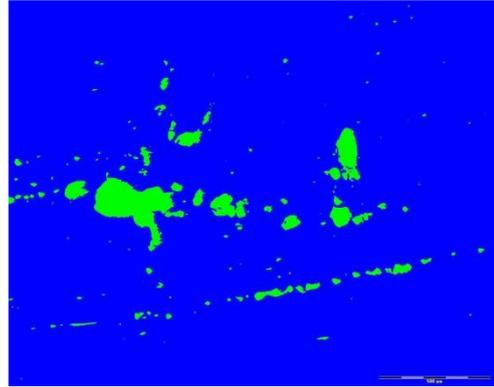
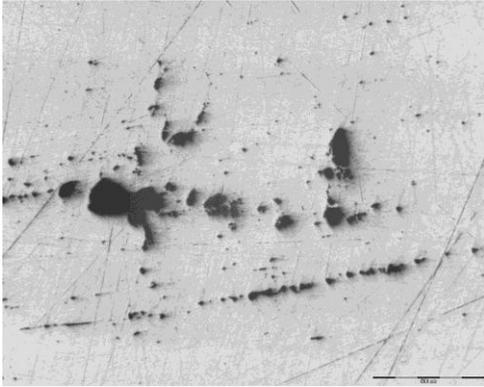
Corpo de Prova 10:



$$A_{\text{Poros}} = 0,43 \text{ mm}^2 (11,29\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,36 \text{ mm}^2 (88,71\%)$$

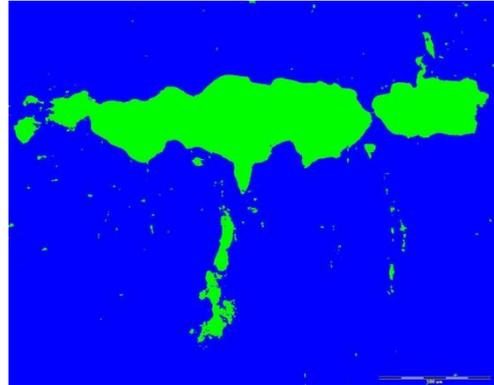
Corpo de Prova 11:



$$A_{\text{Poros}} = 0,15 \text{ mm}^2 (4,07\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,64 \text{ mm}^2 (95,93\%)$$

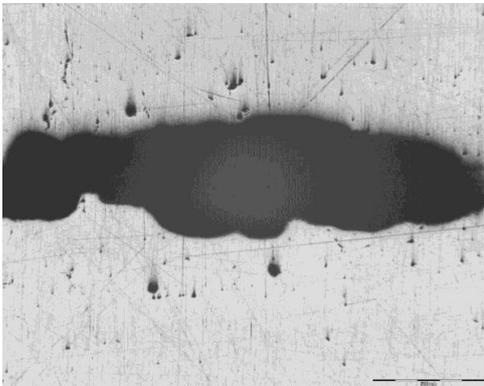
Corpo de Prova 12:



$$A_{\text{Poros}} = 0,56 \text{ mm}^2 (14,68\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,24 \text{ mm}^2 (85,32\%)$$

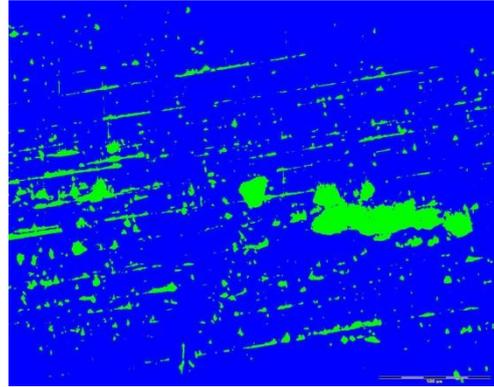
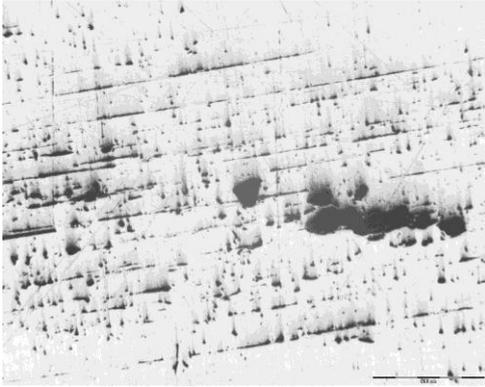
Corpo de Prova 13:



$$A_{\text{Poros}} = 0,91 \text{ mm}^2 (24,04\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 2,88 \text{ mm}^2 (75,96\%)$$

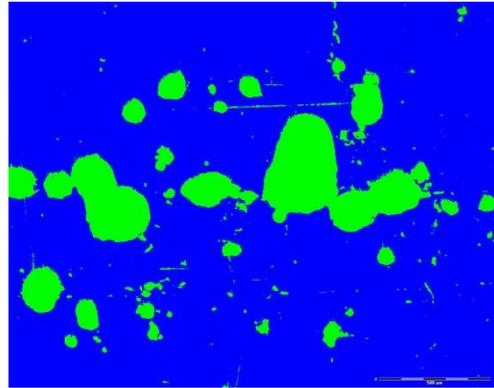
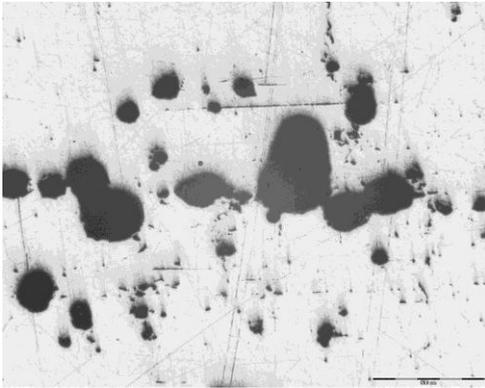
Corpo de Prova 14:



$$A_{\text{Poros}} = 0,33 \text{ mm}^2 (8,79\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,46 \text{ mm}^2 (91,21\%)$$

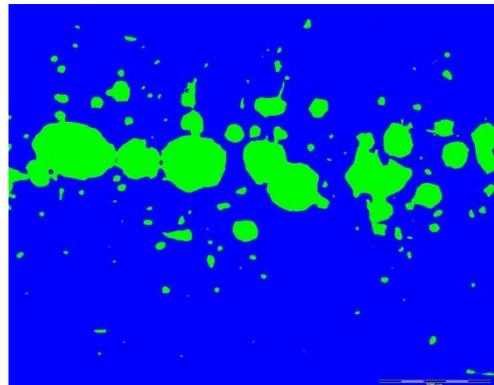
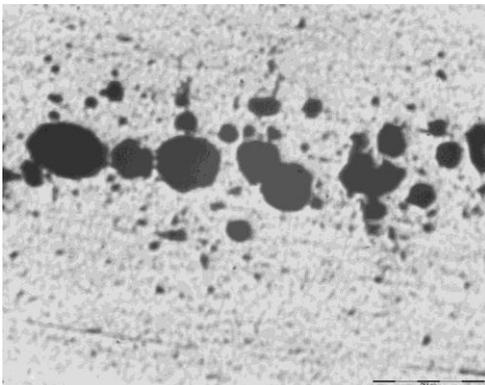
Corpo de Prova 15:



$$A_{\text{Poros}} = 0,53 \text{ mm}^2 (14,10\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,26 \text{ mm}^2 (85,90\%)$$

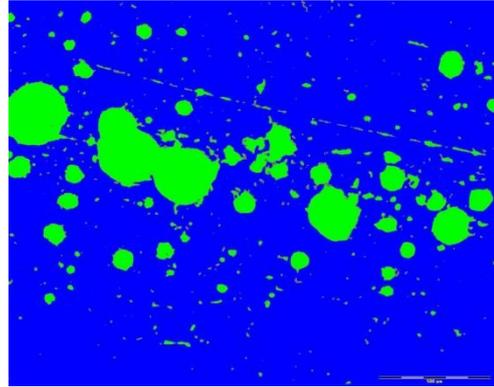
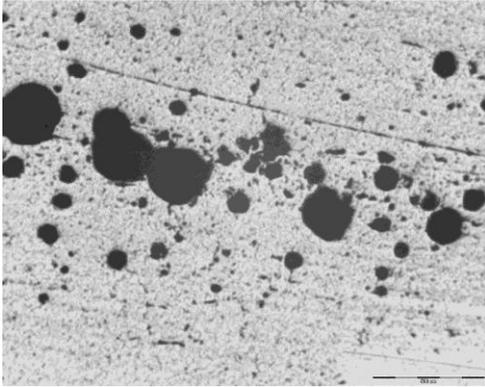
Corpo de Prova 16:



$$A_{\text{Poros}} = 0,49 \text{ mm}^2 (12,83\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,31 \text{ mm}^2 (87,17\%)$$

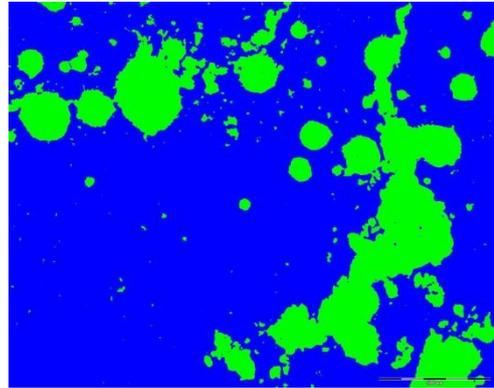
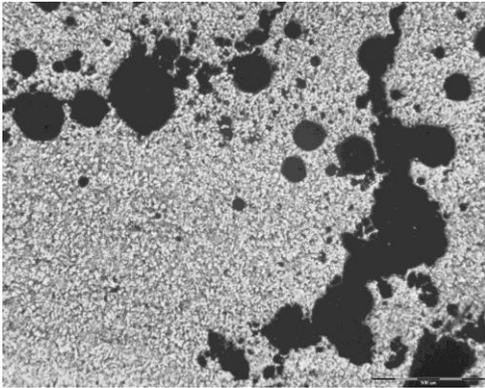
Corpo de Prova 17:



$$A_{\text{Poros}} = 0,49 \text{ mm}^2 (13,03\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,30 \text{ mm}^2 (86,97\%)$$

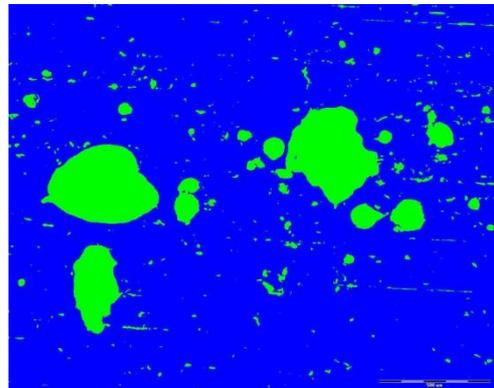
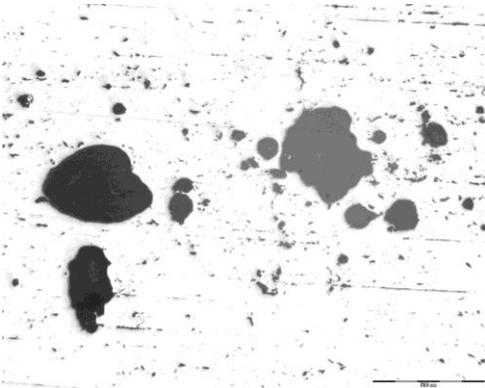
Corpo de Prova 18:



$$A_{\text{Poros}} = 1,13 \text{ mm}^2 (29,66\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 2,67 \text{ mm}^2 (70,34\%)$$

Corpo de Prova 19:



$$A_{\text{Poros}} = 0,47 \text{ mm}^2 (12,35\%)$$

$$A_{\text{ZF}} = 3,32 \text{ mm}^2 (87,65\%)$$