UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAMILA ALBUQUERQUE FERNANDES

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DE UNIÕES DA LIGA DE ALUMÍNIO, AA6061-T6, POR SOLDA A PONTO POR FRICÇÃO (FSpW)

RECIFE

2016

CAMILA ALBUQUERQUE FERNANDES

ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DE UNIÕES DA LIGA DE ALUMÍNIO, AA6061-T6, POR SOLDA A PONTO POR FRICÇÃO (FSpW)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho

RECIFE

2016

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F363e Fernandes, Camila Albuquerque.
Estudo do desempenho mecânico e microestrutural de uniões da liga de alumínio, AA6061-T6, por solda a ponto por fricção (FSpW) / Camila Albuquerque Fernandes. - 2016.
101 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Solda a ponto por fricção. 3. AA6061-T6. 4. Box-Behnken. 5. Desempenho mecânico. 6. Cisalhamento. I. Urtiga Filho, Severino Leopoldino. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2016-304

29 de julho de 2016.

"ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DE UNIÕES DA LIGA DE ALUMÍNIO, 6061-T6, POR SOLDA A PONTO POR FRICÇÃO (FSpW)"

CAMILA ALBUQUERQUE FERNANDES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

_____

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

_____

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

_____

Profª Drª IVANILDA RAMOS DE MELO (UFPE - CNPQ)

_____

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Dedico este trabalho aos meus familiares que sempre estiveram junto comigo, me apoiando em todas as minhas conquistas: Flávia, minha mãe; Gabriela, minha irmã; e Raphael, meu irmão. Em especial, agradeço a Deus por me conceber a vida e pelo cuidado que Ele teve comigo durante toda minha existência.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus por mostrar o caminho da salvação e pelo consolo nas dificuldades diárias.

À minha mãe Flávia e aos meus irmãos Raphael e Gabriela, por me entenderem e me apoiarem nos momentos de ausência.

Aos meus irmãos em Cristo, pelo apoio incessante e pelas orações.

Ao Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho, pela orientação, amizade, e por ter sido sempre um motivador.

Ao Dr. Jorge dos Santos e ao Dr. Uceu Suhuddin por todas as oportunidades de aprendizado.

À Prof. Dra. Magda e ao Prof. Dr. Oscar pelo apoio prestado.

À minha amiga Natália pelo companheirismo durante a estadia no HZG.

Ao instituto HZG, Alemanha, por fornecer equipamento, material e pessoal para a realização desse trabalho, fomentando o aperfeiçoamento tecnológico e humano.

Aos docentes da PPGEM-UFPE por toda ajuda acadêmica.

À Universidade Federal de Pernambuco, por contribuir para o meu desenvolvimento intelectual.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq.

Aos amigos no laboratório de Materiais Compósitos – COMPOLAB.

“De tudo que foi dito, a conclusão é esta:

Tema a Deus e obedeça aos seus mandamentos

Porque foi para isso que fomos criados’’

(Eclesiastes 12: 13)

RESUMO

Solda a Ponto por Fricção (Friction Spot Welding – FSpW) é um processo relativamente novo de soldagem desenvolvido e patenteado pelo GKSS na Alemanha, que visa complementar e/ou substituir tecnologias de uniões de soldagem convencionais. Essa nova tecnologia de soldagem se dá pela união no estado sólido, onde duas ou mais chapas são unidas através da transferência de energia térmica e mecânica que é gerada pela rotação da ferramenta. O presente trabalho visou avaliar a aplicabilidade da união da liga de alumínio 6061-T6 pela técnica de Solda a Ponto por Fricção. Essas soldas foram produzidas em configuração de sobreposição utilizando condições de soldagens variadas, por meio de diferentes combinações de velocidade de rotação, profundidade de penetração e velocidade de penetração; os quais foram estabelecidos através de uma análise estatística, utilizando como ferramenta o Box-Behnken. A integridade da junta soldada foi avaliada através dos efeitos dos parâmetros de processo, na geometria e na microestrutura da junta, e também no desempenho mecânico. Realizou-se também a otimização do processo de soldagem e um estudo sobre o comportamento de fratura das soldas submetidas a um esforço de cisalhamento**.** Os resultados mostraram que a melhor combinação de parâmetros foi encontrada na condição de soldagem: 130 rpm, 4,0 mm/s e 1,4 mm, com um valor médio de resistência ao cisalhamento de 6243,29 N, com boa reprodutibilidade. O botão da solda é constituído por três elementos geométricos que se mostraram inerentes ao processo: cunha, união principal e união secundária. Estes elementos mostraram possuir forte influência sobre o desempenho mecânico.

Palavras-chave: Solda a Ponto por Fricção. AA6061-T6. Box-Behnken.. Desempenho mecânico. Cisalhamento.

ABSTRACT

Friction Spot Welding (FSpW) is a relatively new welding process patented by GKSS in Germany. This new welding technology is given by the joining in a solid state, in which two or more plates are joined by thermal and mechanical energy transfer that is generated by the rotation of the welding tool. The aim of this work is to study the integrity of the welds of AA6061-T6, by the FSpW process. These welds were produced in an overlapping configuration using different welding conditions, through different combinations of rotational speed, depth of penetration and penetration speed, which were set through a statistical approach using the Box-Behnken. The integrity of the welded joint was evaluated by the effects of process parameters on geometry and microstructure of the joint, and also in the mechanical performance. It was also performed the optimization of the welding process and a brief study on the fracture behavior of the welds subjected to a shear stress. The results showed that the best combination of parameters was found in the welding condition: 130 rpm 4.0 mm / s and 1.4 mm with an average value of the shear strength of 6243.29 N, with good reproducibility. The metallurgical investigation revealed three geometric elements that are inherent to the process: primary union and secondary union and hook. These elements were shown to have strong influence on the mechanical performance.

Keywords: Friction Spot Welding. AA6061-T6. Box-Behnken. Mechanical behaviour. Shear fracture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desenho esquemático do processo FSW, com as principais definições envolvidas no processo. 31
Figura 2. Esquema representando as etapas do processo FSSW: (a) penetração, (b) mistura e (c) retração. 32
Figura 3. Desenho esquemático da ferramenta do FSpW: a) pino, b)camisa, c) anel de fixação e d)ferramenta 33
Figura 4. Esquema da variante de penetração do pino do processo FSpW. a) aperto das chapas e rotação da ferramenta; b) penetração do pino e retração da camisa; c) ferramentas voltam à superfície; d) remoção da ferramenta. 34
Figura 5 . Esquema da variante penetração da camisa do processo FSpW. a) aperto das chapas e rotação da ferramenta; b) penetração da camisa e retração do pino; c) ferramentas voltam à superfície; d) remoção da ferramenta. 35
Figura 6. Macrografia da seção transversal de um solda FSpW da liga AZ31. mostrando as zonas da solda....37
Figura 7. Micrografias óticas das diferentes zonas de solda do liga AZ31: a) MB, b) ZTA, c) ZTMA, d) ZM superior e e) ZM inferior 38
Figura 8. Relação entre resistência da solda: a) aporte de energia e b) área soldada. 39
Figura 9. Representação das corridas experimentas executadas pelo método Box-Behnken 42
Figura 10. Fluxograma da metodologia do procedimento experimental. 44
Figura 11. Ferramenta de soldagem do processo FSpW: a) anel de fixação, b) camisa e c) pino. 48
Figura 12. Máquina de soldagem FSpW – RPS 100. 49
Figura 13. Esquema do corpo de prova para o teste de cisalhamento. 50
Figura 14. Esquema do corpo de prova para o teste de descolamento. 50
Figura 15. Esquema do corpo de provas das amostras analisadas no MO. 51
Figura 16. Detalhes do sistema de fixação para o teste de: a) cisalhamento e b) descolamento. 53
Figura 17. Esquema do corpo de prova para o teste de descolamento. 54

Figura 18. Equipamento de auxílio para a preparação do corpo de prova para o ensaio de descolamento. 54
Figura 19. Condição de soldagem x RC. 57
Figura 20. Efeitos principais das variáveis do processo. 59
Figura 21. Resultado as interações dos parâmetros de soldagem. 60
Figura 22. RC-experimental x RC-teorico. 61
Figura 23. Condições otimizadas x RC (N). 62
Figura 24. Efeitos dos parâmetros de soldagem. 64
Figura 25. Efeito individual das variáveis do processo na resistência mecânica da junta: a) efeito individual da VR, fixados valores de VP e PP, b) efeito individual de PP, fixados valores de VR e VP e c) efeito individual da VP, fixados valores de VR e PP. 67
Figura 26. Botão da solda. 69
Figura 27. Macrografica da seção transversal da união da liga AA6061-T6 soldada pelo processo FSpW. 71
Figura 28. Micrografia óptica do MB da liga AA6061-T6. 71
Figura 29. Micrografias ópticas da ZM de solda da liga AA6061-T6. 72
Figura 30. Micrografias ópticas da ZTMA de solda da liga AA6061-T6. 73
Figura 31. Macrografia da seção transversal de solda ponto FSpW da liga 6061-T6 mostrando os três elementos inerentes ao processo de soldagem. 74
Figura 32. Esquema de medição da altura e largura de união. 75
Figura 33. Tamanho da cunha do lado esquerdo x RC. 76
Figura 34. Tamanho da cunha do lado direito x RC. 77
Figura 35. Detalhe da cunha formada pelo processo FSpW na condição 1300 rpm, 1,4 mm e 4 mm/s. 78
Figura 36. Detalhe da cunha formada pelo processo FSpW na condição 1300 rpm, 1,4 mm e 3,5 mm/s. 78
Figura 37. Relação entre o tamanho da união x RC. 79
Figura 38. Dureza da liga AA6061-T6. 80
Figura 39. Perfil de microdureza das soldas produzidas por FSpW. 81
Figura 40. Medição de temperatura no centro da solda. 83
Figura 41. Modos de falhas observados nos ensaios de cisalhamento: a) AT, b) AC. 84

Figura 42. MEV da amostra do modo de falha arrancamento total. 87
Figura 43. Avaliação do teste de descolamento. 89
Figura 44. Efeito individual das variáveis do processo na resistência mecânica da junta sob solicitação cisalhante e de descolamento: a) efeito individual da VR, fixados valores de VP e PP, b) efeito individual de PP, fixados valores de VR e VP e c) efeito individual da VP, fixados valores de VR e PP. 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da liga AA6061-T6 45
Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga AA6061-T6. 45
Tabela 3. Matriz de parâmetros.....46
Tabela 4. Condições de soldagem fornecida através do método Box-Behnken. 47
Tabela 5. Composição química (%peso) de um aço Hotvar. 48
Tabela 6. Condições experimentais do Box-Behnken e resultados do teste de resistência ao cisalhamento. 57
Tabela 7. Teste da condição otimizada. 62
Tabela 8. ANOVA. 64
Tabela 9. Fatorial único. 66
Tabela 10. Condições de soldagem avaliadas para as medições da cunha e da união principal. 75
Tabela 11. Modo de falha para cada condição soldada. 86
Tabela 12. Solicitação de descolamento. 88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Designação das ligas de alumínio. 25
Quadro 2. Tratamentos térmicos das ligas de alumínio. 26
Quadro 3. Subdivisões típicas da têmpera T para as ligas de alumínio 27
Quadro 4. Principais variáveis controláveis do processo e seus efeitos. 36

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Equação geral do aporte térmico de energia em soldas por fricção:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Força(n)(x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega\,(n)\Delta t$$ 39

(2) Equação simplificada do aporte de energia em soldas por fricção:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega\,(n)\Delta t$$ 40

(3) Equação da resistência ao cisalhamento teórica obtida a partir do *Minitab*

$$RC_{teorico} = 17420 + 3{,}79\ x\ VR - 7819\ x\ VP + 534\ x\ PP + 0{,}0009\ X\ VR^2$$

$$+ 448\ x\ VP^2 - 3351\ x\ PP^2 - 0{,}62\ x\ VR\ x\ VP\ 4{,}34\ x\ VR\ x\ PP + 414\ x\ VP$$.....58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC: Arrancamento circunferêncial;

AF: Anel de fixação;

AT: Arrancamento total;

ASTM: American Society of Testing and Materials;

C: Camisa;

CFC: Cúbia de face centrada;

DoE: Design of Experiment;

FSpW: Friction Spot Welding;

FSSW: Friction Stir Spot Welding;

FSW: Friction Stir Welding;

GKSS: GeseUPshaft fur Kernenergie inSchiffabau und Schifffahrt;

GL: Grau de liberdade;

GMAW: Gas Metal Arc Welding;

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding;

HZG : Helmholtz Zentrum Geesthacht;

MB: Metal base;

MEV: Microscopia eletrônica de varredura;

MO: Microscopia ótica;

n: número de amostra;

N: amostra final;

P: Pino;

PP: Profundidade de penetração;

Q: Aporte térmico;

QM: Quadrados médios

RC: Resistência ao cisalhamento;

SQ: Soma dos quadrados;

TA: Trinca anular;

TC: Trinca circunferêncial;

TWI: The Welding Institute;

T6: Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial;

UP: União principal;

US: União secundária;

VP: Velocidade de penetração;

VR: Velocidade de rotação;

X: profundidade de penetração da ferramenta;

ZM: Zona de mistura;

ZTA: Zona termicamente afetada;

ZTMA: Zona termomecânicamente afetada;

ω: velocidade angular da ferramenta;

∆t: tempo total de soldagem;

SUMÁRIO

CAPÍTULO I 19

1. INTRODUÇÃO 19

1.1 Objetivos 21

1.1.1 Objetivo Geral 21

1.1.2 Objetivos Específicos 21

1.2 Formulação do trabalho 21

1.3 Justificativa e Relevância 22

CAPÍTULO II 24

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24

2.1 Liga de alumínio 24

2.1.1 Alumínio e suas ligas 24

2.1.2 Liga de alumínio 6061-T6 27

2.1.3 Soldabilidade das ligas de alumínio 28

2.2 Soldagem por Fricção 30

2.2.1 Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) 30

2.2.2 Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto (FSSW) 31

2.2.3 Soldagem a Ponto por Fricção (FSpW) 32

2.3 Planejamento de experimento (DOE) – *Box-Behnken* 41

CAPÍTULO III 43

3. MATERIAIS E MÉTODOS 43

3.1 Metodologia 43

3.2 Descrição do Material 45

3.3 Planejamento Experimental - Box-Behnken 45

3.4 Abordagem tradicional para experimento – Fatorial único 47

3.5 Equipamento e Ferramenta utilizados no processo FSpW 48

3.6 Preparação dos corpos de provas 49

3.7 Caracterização Metalúrgica 51

3.8 Caracterização Mecânica 52

3.8.1 Ensaio de Cisalhamento e de Descolamento 52

3.8.2 Ensaio de microdureza 55

3.9 Medição de temperatura 55
CAPÍTILO IV.....56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 56
4.1 Otimização do processo - Método *Box-Behnken* 56
4.2 ANOVA.....63
4.3 Fatorial único (*One-factorial)* 65
4.4 Caracterização das juntas.....69
4.4.1 Análise metalográfica 70
4.4.2 Elementos geométricos inerentes ao processo 73
4.5 Microdureza 80
4.6 Medição de temperatura 82
4.7 Fratura no Cisalhamento.....83
4.8 Teste de descolamento.....88
CAPÍTULO V.....91
CONCLUSÃO.....91
CAPÍTULO VI.....93
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 93
REFERÊNCIAS.....94

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A motivação em se unir materiais de ligas leves, como as ligas de alumínio, provém das suas boas propriedades e, principalmente, do seu emprego nos setores das indústrias automotiva e aeronáutica. Pois, a utilização desses materiais resulta em uma estrutura mais leve, e consequentemente, há uma redução no consumo de combustíveis, e assim, uma redução na emissão de gases poluentes. Neste âmbito, muitos componentes feitos por essas ligas precisam ser unidos durante o processo de fabricação (*TRAN et al,* 2007).

O alumínio e suas ligas possuem boas propriedades: baixa densidade, elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão e boa reciclabilidade devido ao seu baixo ponto de fusão. Além disso, possui uma boa combinação de custo e uma facilidade de fabricação. Por causa dessas importantes características, materiais derivados dessas ligas vêm sendo bastante utilizados em diversos setores industriais *(ALTESSHUMMER, 1998).*

Na indústria aeronáutica o processo de união mais utilizado é o de rebitagem convencional e rebitagem por auto aprisionamento, no entanto esses processos elevam significativamente o peso da estrutura (*VARIS*, 2006).

No setor automobilístico, as técnicas mais usadas para união são os processos que envolvem fundição, isso traz certos inconvenientes resultantes da solidificação, que em geral produz juntas com baixo desempenho mecânico (*MAZDA,* 2003).

A fim de solucionar tais inconvenientes, novos métodos de soldagem que não elevem o peso das estruturas, nem exijam a fusão do metal base vem sendo desenvolvido.

Em 1991, na Inglaterra, foi desenvolvida a tecnologia de Soldagem por Fricção e Mistura (*Friction Stir Welding* – FSW), a qual vem sendo aplicada na união de diversos materiais. Essa técnica envolve calor por fricção e deformação plástica entre a ferramenta e a superfície a ser unida, e apresenta várias vantagens quando comparada aos processos de soldagens convencionais: compatibilidade com o meio ambiente, o menor consumo de energia e a possibilidade de se soldar ligas até

então não soldáveis, por exemplo, as ligas de alumínio das séries 2XXX e 7XXX *(DAMES, 1995).*

Entretanto, nem sempre é necessária a utilização de uma solda contínua para satisfazer os requisitos de desempenho de um determinado produto. Deste modo, surgiram processos inovadores de soldagem no estado sólido que utilizam pontos de soldas: Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto (*Friction Stir Spot Welding* – FSSW) e Solda a Ponto por Fricção (*Friction Spot Welding* – FSpW) *(MISHRA, 2005; SHILLING et al., 2004).*

O primeiro processo, FSSW, foi desenvolvido em 2001 no Japão, pela *Mazda Motor Corporation.* No entanto, ele possui uma desvantagem: deixa um furo na superfície da solda, que pode atuar como um concentrador de tensões. O segundo processo, o qual será o foco deste trabalho, é o FSpW, que tem como resultado uma botão de solda nivelado com a superfície e é caracterizado por produzir soldas praticamente livre de defeitos.

FSpW é um processo novo de soldagem, desenvolvido por um grupo de pesquisadores do centro de pesquisa GKSS (atual HZG), na Alemanha, patenteado em 2005 pelo mesmo grupo *(SHILLING et al.,2004).* Neste processo duas ou mais chapas são unidas pontualmente na forma de juntas sobrepostas. Essa união se dá através da geração de energias térmica e mecânica que são transferidas para as chapas através da rotação da ferramenta.

A ferramenta é composta por três elementos (anel, pino e camisa) que possuem movimentos independentes. Sua função inicial era de preencher o furo deixado no final do cordão da solda quando a união das chapas era realizada pelo processo FSW. Com o avanço dos estudos nesta área notou-se que esta ferramenta poderia ser aplicada para realizar soldas a ponto de forma similar ao FSSW, e assim, experimentos começaram a serem realizados a fim de avaliar este tipo processo, conhecido atualmente como FSpW.

Por este ser um processo de soldagem recente, mais estudos e experimentos nesta área ainda precisam ser realizados. Essa tecnologia de soldagem vem se mostrando eficiente para a união de materiais de ligas leves similares e dissimilares, e são compatíveis com meio ambiente. Além de possuir uma alta eficiência energética, alta velocidade de soldagem, reprodutibilidade e redução no número de etapas do processo *(KALANGRA et al., 2007).*

Desta forma, o estudo do processo FSpW em soldas de ligas leves é importante, por se apresentar como uma excelente opção para a redução do peso das estruturas soldadas e, consequentemente, na redução do consumo de combustíveis dos automóveis e aeronaves que utilizam tal processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a aplicabilidade da união da liga de alumínio 6061-T6 pela técnica de Solda a Ponto por Fricção, em diferentes condições de parâmetros de processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver parâmetros de soldagem otimizados para o processo FSpW aplicado à liga AA6061-T6 baseado em uma análise estatística utilizando o *Box-Behnken;*
- Avaliar os efeitos dos parâmetros de processo sobre a geometria da junta, de forma a estudar a evolução microestrutural e o comportamento mecânico dessa junta;
- Caracterizar metalurgicamente a interface da junta;
- Correlacionar às propriedades mecânicas e as características microestruturais observadas, visando identificar e definir os parâmetros ótimos de soldagem via processo FSpW.

1.2 Formulação do trabalho

A estrutura do trabalho foi desenvolvida através de seis capítulos.

O primeiro capítulo aborda a ideia central do tema estudado, seguida dos objetivos geral e específicos e o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

O segundo capítulo refere-se à revisão bibliográfica de acordo com o tema em estudo, onde foram descritos mais detalhadamente o processo de Solda a Ponto por Fricção encontrados em literaturas até o momento. Além de uma revisão sobre as ligas de alumínio, com um enfoque maior na liga AA6061-T6.

O terceiro capítulo é composto pela metodologia, que descreve os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa. Indicando a composição, as propriedades mecânicas e o formato dos corpos de prova estudados; os equipamentos e a ferramenta utilizados nas uniões dessas chapas; os procedimentos e técnicas para a caracterização mecânica, metalúrgica e de medição de temperatura.

O quarto capítulo abrange os resultados e discussão, onde são apresentadas as respostas correspondentes às caracterizações e análises das juntas soldadas por FSpW. Neste capítulo são expostos os resultados de todos os ensaios realizados, seguido da interpretação deles, fazendo referência ao que foi estudado até o momento.

O capítulo cinco são apresentadas as conclusões do trabalho, de acordo com os resultados e discussão apresentados no quarto capítulo.

No último capítulo, o capítulo seis, é exposto sugestões para dar continuidade ao trabalho, abrangendo temas relacionados ao presente estudo.

1.3 Justificativa e Relevância

As dificuldades de se unir alumínio e suas ligas, através de processos convencionais de soldagem estão ligadas ao fato de que uma camada de óxido se forma na superfície do metal, chamada de alumina. Este óxido tem um elevado ponto fusão (2038°C) e uma dureza próxima ao diamante. Além de ser porosa, podendo reter a sujeira e a umidade do ar, e assim, contaminar o cordão de solda. Sendo necessária a sua retirada para se conseguir soldas com resistência maiores *(OWEN et al., 2003).* Outro fator que exerce grande influência na soldabilidade das ligas de alumínio é a condutividade térmica, cerca de cinco vezes maior que a do aço. Assim, apesar de possuir um ponto de fusão menor que o aço, sua alta condutividade térmica faz com que seja necessário mais calor que o aço para ser soldado *(ABAL, 2006).*

As ligas da série 6XXX, por exemplo, não apresentam boa qualidade quando soldadas por processos convencionais de soldagem, pelo fato de surgirem trincas nas proximidades dos cordões de solda após sua solidificação *(Welding Handbook, 2004).* Isto ocorre por causa do superenvelhecimento na região da ZTA, que favorecem o coalecimento dos precipitados, deixando essa região fragilizada. As diferenças nas propriedades físicas entre as fases líquida e sólida próximas ao cordão da solda criam altos valores de tensões internas entre os grãos solidificados *(SURISH, 1998).* Uma solução para a união destes materiais é utilizar processos de soldagem que não envolva fusão.

Na última década, grupos de pesquisadores ao redor do mundo têm realizado estudos/experimentos na área de Solda a Ponto por Fricção. O crescimento e investimento por pesquisas nesta área estão associados ao seu elevado potencial em união de ligas leves similares e dissimilares a fim de serem aplicadas nas industriais, especialmente para as indústrias automotiva e aeronáutica.

A busca por sua utilização nessas indústrias se justifica, pois essa tecnologia vem se mostrando eficiente na união desses materiais e não elevam significativamente o peso das estruturas; com a crescente preocupação com as condições ambientais, cresce a busca por soluções que reduzam o peso das estruturas dos automóveis e aeronaves, visto que isso contribuirá para a redução da emissão de gases poluentes.

No entanto, por essa ser uma tecnologia de soldagem nova se faz necessário um conhecimento mais profundo e confiável, para que se possa consolidar sua utilização nas indústrias.

Outro fator de relevância é que esse processo é pouco conhecido e explorado pelas universidades e industriais brasileiras. Logo, o seu estudo é importante para colocar o Brasil em um patamar competitivo na área de pesquisa mundial.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica necessária para o embasamento deste trabalho esta descrita neste capítulo, ao abordar aspectos referentes às ligas de alumínio e à soldagem por fricção.

2.1 Liga de alumínio

2.1.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio tem sido cada vez mais usado em diversas aplicações industriais devido a sua baixa densidade (2,7 g/cm³ comparado com 7,9 g/cm³ do aço), sendo também usado no campo de transporte, embalagens, armação estrutural e construção. Outra característica do alumínio é a sua resistência à oxidação. Isto se dá devido a uma película de óxido de alumínio, em torno de 2-10 nm de espessura, que se forma na sua superfície quando exposto a oxidantes. Devido a esses fatores, a produção global de alumínio praticamente dobrou entre as décadas de 1960 e 1970. (*Chemistry of the Elements, 1997)*

A estrutura cristalina do alumínio é a cúbica de face centrada – CFC (quatro átomos por célula unitária e número de coordenação doze), sua estrutura é típica de metais dúctil, e sua ductilidade é mantida mesmo em baixas temperaturas (-269 °C). O Ponto de fusão do alumínio puro é de 660 °C, apresentando incerteza de 1 °C *(Handbook of Aluminum, 2003).*

O alumínio puro possui baixos valores de resistência mecânica. Entretanto, quando combinados com certos elementos químicos produzem ligas com excelentes propriedades, apresentando uma relação favorável entre a resistência mecânica e a massa específica, chegando até a ser comparável aos aços de elevada resistência *(Handbook of Aluminum, 2003).*

As ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente são classificadas de acordo com seus principais elementos de liga e pelo método de processamento final

utilizado. O Quadro 1 apresenta a classificação dessas ligas segundo a *Aluminum Association.*

O primeiro dígito indica o elemento de liga presente em maior quantidade, o segundo está relacionado com alguma modificação da liga original ou seus limites de pureza. Já os dois últimos números servem para discriminar as diferentes ligas dentro de cada grupo ou indica os seus graus de pureza.

Quadro 1. Designação das ligas de alumínio.

Nomenclatura	Principal elemento da liga
1xxx	Alumínio com pureza minímia de 99%
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos (ex. Lítio)
9xxx	Reservado para uso futuro

FONTE: Traduzido do *Handbook of Aluminum, 2003.*

O Quadro 2 apresenta a classificação das ligas de acordo com os tipos de tratamentos térmicos, classificados segundo a *Aluminum Association*. A designação é feita por letras específicas, e são separadas da classificação da liga por um *hifén*.

Existem, ainda, as subdivisões das têmperas básicas que são identificados por um ou mais dígito específico após a letra, como pode ser visto no Quadro 3, nesse caso foi explicitado apenas para as subdivisões das têmperas T, visto que será a liga utilizada neste trabalho.

Quadro 2. Tratamentos térmicos das ligas de alumínio.

Designação	Descrição
F	Como fabricado, aplica-se aos produtos na forma final de processamento através de tratamento a frio ou a quente, sem que tenha ocorrido nenhum controle refinado das condições de resfriamento e dimensionais.
O	Recozido, empregados para especificar as ligas trabalhadas mecanicamente, submetidas a um tratamento térmico para obtenção dos melhores valores de ductilidade e estabilidade dimensional para posterior conformação.
H	Endurecido por deformação, ligas não tratáveis termicamente, tendo suas propriedades mecânicas aumentadas exclusivamente devido às deformações mecânicas impostas (encruamento).
W	Solubulizado, condição termodinamicamente instável, na qual a liga se encontra supersaturada na temperatura ambiente.
T	Tratado termicamente, aplica-se as ligas de Al tratáveis por precipitação (envelhecimento), condição que pode ser precedida por deformação a frio (encruamento), com o objetivo de incrementar as propriedades mecânicas. Após a letra T sempre aparecem um ou mais dígitos complementares.

FONTE: Traduzido do *Handbook of Aluminum, 2003.*

As ligas tratáveis termicamente são as ligas das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX. Essas ligas apresentam como elemento ligante o cobre, magnésio e zinco, respectivamente. Possuem a particularidade que chegam a aumentar em até cinco vezes suas propriedades através de tratamentos térmicos. Solubilização, formação de soluções sólidas supersaturadas, seguido de resfriamento rápido e encerrando com o envelhecimento natural ou artificial, são as etapas do tratamento térmico (*Handbook of Aluminum, 2003)*

Já as ligas das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX são ligas que não são tratáveis termicamente, e a melhoria das suas propriedades é conseguida através da adição dos elementos de ligas, como manganês, silício, magnésio e ferro de maneira isolada ou combinada. E também através de trabalhos mecânicos a frio,

que produzem aumento das discordâncias na matriz (indicado pela letra H após o código da liga) (*Handbook of Aluminum, 2003).*

Quadro 3. Subdivisões típicas da têmpera T para as ligas de alumínio

Têmpera T	Descrição
T1	Estirpe endurecido, produtos forjados somente, para melhorar a força nos materiais que são insensíveis ao tratamento térmico
T2	Trabalho a quente + endurecimento + envelhecimento natural
T3	Solução de tratamento térmico + endurecimento + envelhecimento natural
T4	Solução de tratamento térmico + envelhecimento natural
T5	Tratado por solubilização + envelhecimento natural
T6	Tratado por solubilização + envelhecimento artificial
T7	Solução de tratamento térmico + envelhecido tardiamente
T8	Solução de tratamento térmico + endurecimento + envelhecido artificialmente
T9	Solução de tratamento térmico + envelhecido artificialmente + endurecimento
T10	Trabalho a quente + endurecimento + envelhecido artificialmente

FONTE: Traduzido do *Handbook of Aluminum, 2003.*

2.1.2 Liga de alumínio 6061-T6

A liga específica utilizada neste trabalho foi à liga AA6061-T6. Essa liga é uma das ligas mais utilizadas na série 6XXX. Como já citado, essa liga é tratável termicamente e apresentam combinações de magnésio e silício na matriz do alumínio. Na fase de envelhecimento artificial do tratamento térmico, há formação de precipitados intermetálicos de silicato de magnésio (Mg_2Si), que proporcionam boa conformidade e ótima resistência à corrosão *(ABAL, 2006).*

Os sufixos alfanuméricos ligados à liga representam o tipo de tratamento térmico e grau de dureza. No caso de uma liga de alumínio 6061-T6, o "T6" indica que foi tratado termicamente e envelhecido artificialmente. Embora as ligas dessa

série não sejam tão forte como as ligas da série 2XXX e 7XXX, a série 6XXX tem uma resistência à corrosão muito boa.

Esta é uma liga estrutural padrão de alta resistência, e possuem boas características de tenacidade e boa resistência mecânica, embora tenha a resistência reduzida na zona de solda. São aplicados em produtos extrudados que vão desde componentes de transporte para máquinas e equipamentos, aviões, transporte marítimo, aos produtos de lazer, como quadros e bicicletas (*ABAL, 2006).*

2.1.3 Soldabilidade das ligas de alumínio

A soldabilidade está associada à facilidade com que um material pode ser soldado, produzindo uma junta com adequada resistência mecânica e resistência à corrosão (PÓVOA, 1988). Assim que o alumínio passou a ser utilizado nas indústrias, foi considerado um material de difícil soldabilidade, pois eram empregadas as mesmas técnicas das usadas para soldagem de materiais ferrosos, isso resultava em juntas de baixa qualidade *(REIS, 1996).*

Um grande problema na soldagem do alumínio está relacionado ao fato que o alumínio reage prontamente com o oxigênio, formando uma camada de óxido, chamada de alumina. Essa camada possui um elevado ponto de fusão, aproximadamente 2000°C, que é muito superior ao do alumínio (aproximadamente 660°C), isso faz com que se forme uma barreira que impede o contato e mistura do metal base fundido e do metal de adição, formando inclusões na solda. Além disso, quando essa camada se torna mais expressiva, ela absorve a umidade do ar, e juntamente com ela vem outras contaminações superficiais, gerando porosidade da zona fundida de alumínio.

Outro fator que dificulta a soldagem em alumínio e sua ligas, é o fato dele possuir elevada condutividade térmica, cerca de 5 vezes a do aço. Por causa disso, o calor de soldagem é menos eficiente nesses materiais. A elevada condutividade térmica do alumínio favorece a rápida extração de calor e, assim, a rápida solidificação da poça de fusão o que facilita a sua soldagem fora da posição plana.

Além disso, o alumínio possui um elevado coeficiente de expansão, isso favorece o aparecimento de trincas e ocorrência de distorção. Outro ponto é por causa do seu baixo ponto de fusão, isso dificulta o controle da temperatura na

brasagem manual com chama, e na soldagem a arco de chapas finas *(FIGUEREDO, 2000).*

Nas séries em que é possível soldar esses materiais, os processos mais usados para a soldagem do alumínio são GTAW e GMAW. A soldagem GTAW é usada principalmente quando irá unir chapas de espessuras menores. Em geral, se trabalha com corrente alternada e o eletrodo usado é de tungstênio puro para garantir que haja a remoção da camada de óxido, sem um aquecimento excessivo do eletrodo. Enquanto que o processo GMAW é mais comum quando se deseja unir juntas de maiores espessuras. O spray é o modo de transferência mais usado *(ALTSHUMMER, 1998).*

Várias ligas de alumínio tem sua resistência mecânica baseada no seu endurecimento por precipitação. Esse mecanismo é sensível à elevação de temperatura e, portanto, durante a soldagem que envolve fusão, a zona termicamente afetada destas ligas pode ser amaciada. Isso gera problemas que limitam a sua soldabilidade, pois gerará trincas de liquefação nos contornos da zona fundida com a ZTA *(WESTON, 2003; NORMAN, 2003).*

A baixa soldabilidade das ligas de alumínio de elevada resistência, em especial às da série 2XXX, 6XXX e 7XXX, estão ligadas ao superenvelhecimento na região da ZTA, causados pelas elevadas temperaturas encontradas nesta região, favorecendo o coalescimento dos precipitados que fragilizam a estrutura do material e os deixam suscetíveis as trincas à quente. Essas trincas estão relacionadas à sua grande quantidade de elementos de adição, alta expansão térmica, grande variação de volume até a solidificação, e grande taxa de resfriamento *(YANG et al., 2001).* As diferenças entre as propriedades físicas entre as fases sólidas e líquidas próximas ao cordão da solda geram tensão internas entre os grãos solidificados, que ultrapassam os limites de resistência do material solidificado. Uma solução para soldagem desses materiais é utilizar processos de soldagem que não envolva fusão do metal base *(SURISH, 1998).*

2.2 Soldagem por Fricção

Processos de soldagem por fricção que utilizam ferramenta não consumível surgiram como alternativa para substituir ou complementar processos convencionais de soldagem por fusão e processos que elevem significativamente o peso da estrutura.

O primeiro processo a surgir foi a Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica, que possibilitou soldar juntas até então não soldáveis, como eram o caso das ligas de alumínio da série 2XXX e 7XXX (DAMES, 1995).

Entretanto, nem sempre é requerido uma solda contínua para satisfazer os requisitos de desempenho de um determinado produto. Deste modo, surgiram processos inovadores de soldagem no estado sólido que utilizam pontos de soldas: Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto e a Solda a Ponto por Fricção

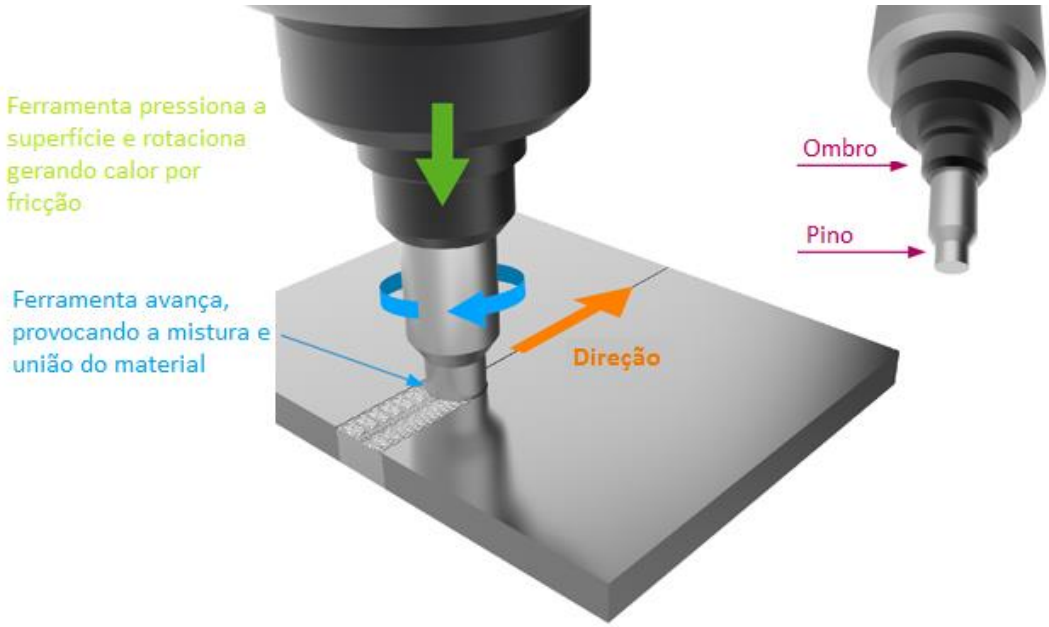
2.2.1 Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (FSW)

Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica é um processo de soldagem no estado sólido desenvolvido e patenteado pela *The Welding Institute* (TWI) em Cambridge, na Inglaterra em 1991. Ao longo dos anos, esta técnica vem sendo aprimorada e tem se tornado uma tecnologia utilizada comercialmente. Esse processo é derivado de técnicas convencionais de soldagem, permitindo as vantagens da soldagem no estado sólido para produzir juntas de boa qualidade. Esse é um processo que envolve geração de calor por fricção e deformação plástica *(DAMES, 1995).*

O esquema da Figura 1 ilustra as etapas do processo FSW. Ele consiste basicamente em três etapas: na primeira etapa a ferramenta, que é composta por pino e ombro, começa a rotacionar, criando uma superfície deformada plasticamente, na superfície do material que será unido, após isso, o pino é penetrado na junção das chapas, na linha a ser soldada, até que o ombro da ferramenta esteja em um contato compressivo com o material a soldar. Atingida a profundidade desejada, a ferramenta continua rotacionando, sem avançar, até atingir temperaturas suficientes para que haja a deformação plástica na região que consequentemente diminuirá a resistência do material, e assim, a ferramenta poderá

avançar. Após esse estágio, se inicia a segunda etapa, que é o avanço da ferramenta, provocando a mistura e união do material ao longo da junta. A fase final se dá quando a ferramenta chega ao final do curso a que foi pré-determinada e então, é afastada das peças de trabalho *(KOZMINSKI, 2015).*

Figura 1. Desenho esquemático do processo FSW, com as principais definições envolvidas no processo.



FONTE: Adaptado da Evercool.

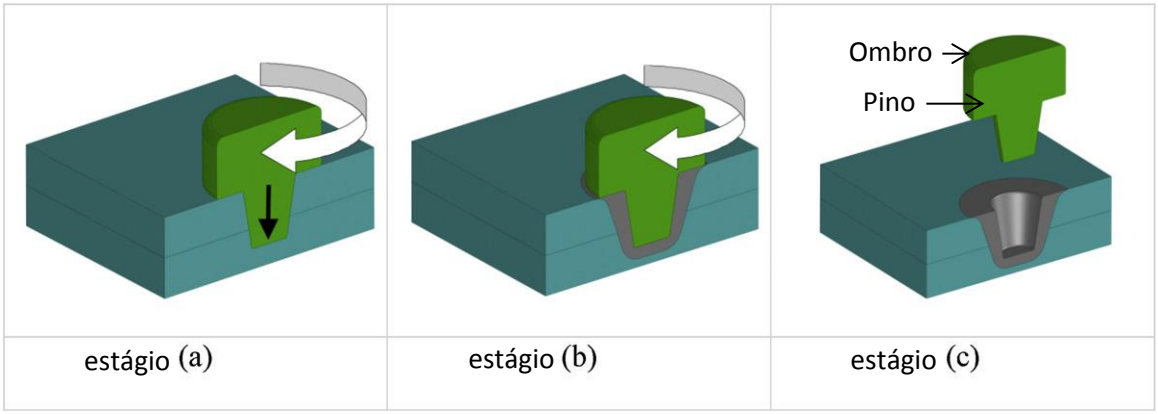
2.2.2 Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto (FSSW)

O processo FSSW é uma variação do FSW, desenvolvido em 2001 pela *Madza Motor Corporation*, no Japão. Este processo serve como uma alternativa a tecnologias convencionais, como solda ponto por resistência elétrica. *(SAKANO, 2001; IWASHITA, 2003).*

O FSSW é um processo realizado em três etapas e o resultado da união é um botão de solda com um furo no centro. A ferramenta utilizada nesse processo é a mesma que é utilizada no FSW. É apresentado na Figura 2 o esquema dos estágios desse processo: no estágio (a), a ferramenta em rotação é forçada contra as chapas a serem soldadas sob uma determinada pressão, isto cria calor por fricção entre as

chapas e o pino, plastificando o material das chapas. A partir daí, o pino penetra totalmente nas chapas, até que o ombro toca a superfície da chapa superior; no estágio (b), quando o pino atinge uma profundidade pré-estabelecida nas chapas, a ferramenta é mantida em rotação durante um determinado período de tempo, plastificando e misturando mecanicamente os materiais das chapas; e finalmente no estágio (c) a ferramenta é retirada (*LATHABAI, 2005).*

Figura 2. Esquema representando as etapas do processo FSSW: (a) penetração, (b) mistura e (c) retração.



FONTE: Adaptado do HZG

2.2.3 Soldagem a Ponto por Fricção (FSpW)

FSpW é um processo novo de soldagem, desenvolvido e patenteado pelo grupo de pesquisa GKSS, na Alemanha, em 2005. Este processo surgiu a partir da derivação dos processos FSW e FSSW. A princípio, foi criada uma ferramenta composta por três elementos (anel de fixação, pino e camisa) que tinha como função preencher o furo deixado no final do cordão da solda do processo FSW. Com o avanço dos experimentos nesta área, percebeu-se que esta ferramenta poderia ser aplicada para realizar soldas a ponto de forma similar ao FSSW, e assim, esse processo foi consolidado *(SHILLING et al., 2004).*

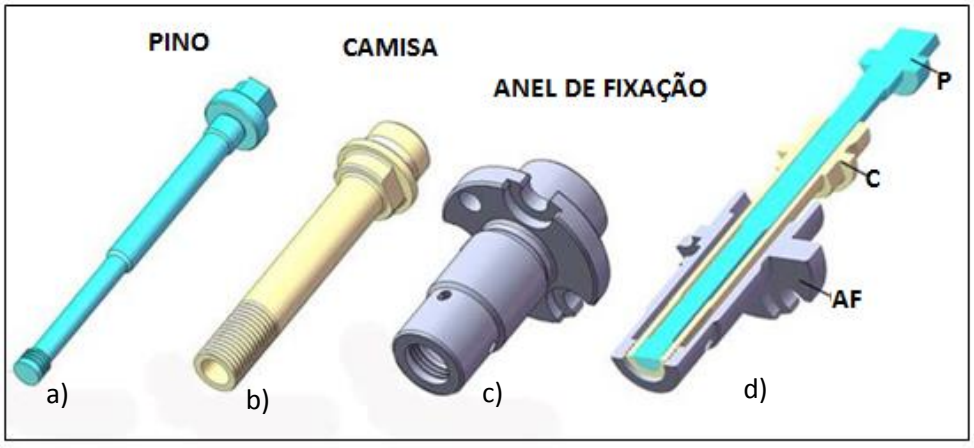
Este é um processo onde duas ou mais chapas são unidas sobrepostas e a região da solda é constituída por um material plastificado que preenche totalmente o botão da solda, deixando nivelado com a superfície superior. O processo baseia-se na geração de calor por fricção e deformação plástica produzida por uma ferramenta

rotativa não consumível que possui um deslocamento transversal *(SHILLING et al., 2004).*

2.2.3.1 Princípio de Funcionamento

O processo de Solda a Ponto por Fricção é relativamente complexo. A ferramenta utilizada neste processo é ilustrada na Figura 3, onde se podem observar os três componentes que a formam: (a) pino, (b) camisa e (c) anel de fixação. Os três componentes da ferramenta podem ser movidos para cima ou para baixo com movimentos independentes um do outro, pois cada um possui o seu sistema de atuação. O anel de fixação não apresenta movimento rotacional e sua função é assegurar que as chapas estejam posicionadas na maneira correta durante a soldagem, além de evitar que o material plastificado seja perdido na forma de rebarba. O seu atuador é responsável por mover o cabeçote da máquina contra a superfície que será unida, mantendo assim as placas juntas. Enquanto que o pino e a camisa possuem movimento de rotação e são capazes de penetrar no material. O processo permite duas variantes: *penetração da camisa e penetração do pino*, que são definidas em função de qual componente penetrará primeiro no material a ser soldado, ou seja, camisa e pino, respectivamente *(SILVA et,al.,2007; ROSENDO et al., 2011).*

Figura 3. Desenho esquemático da ferramenta do FSpW: a) pino, b)camisa, c) anel de fixação e d)ferramenta

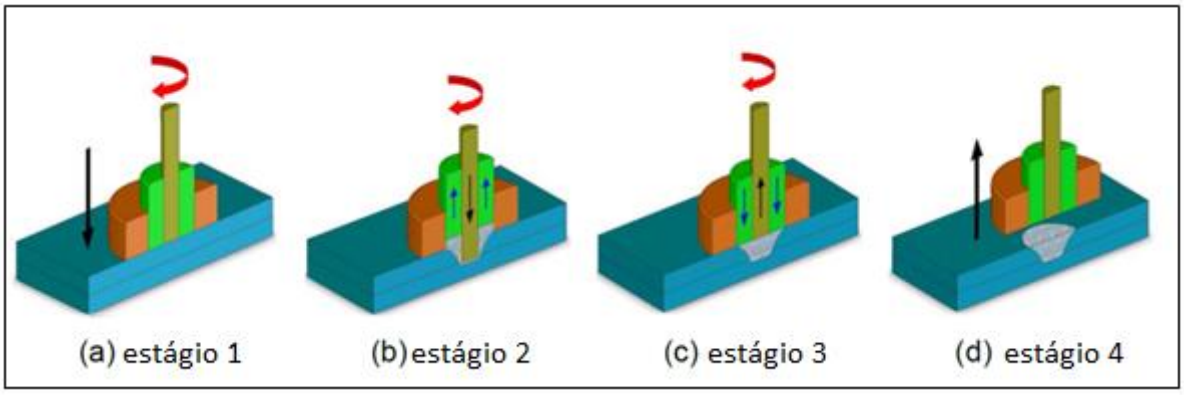


FONTE: Adaptada do HZG

A Figura 4 ilustra as etapas do processo FSpW : (a) durante o primeiro estágio, as chapas são fixadas e presas contra a ferramenta com uma força de aperto pré-determinada. Após isso, a ferramenta (pino e camisa) começa a rotacionar na superfície a ser soldada, produzindo calor por fricção, até iniciar a deformação plástica do material nesta região; (b) a partir daí o pino e camisa se movimentam em direções opostas (um penetra no material, enquanto o outro se move para cima, dependendo da variante do processo). O material plastificado é empurrado para dentro do espaço deixado pela ferramenta retraída; (c) na terceira fase, o pino e a camisa se movem para a superfície da chapa superior, empurrando o material plastificado de volta para a placa; (d) por fim, a ferramenta é retirada e o resultado é um ponto soldado por uma junta sobreposta com perda mínima de material e uma superfície plana *(SILVA et al.,2007; ROSENDO et al., 2011).*

No caso da variante *penetração do pino* (usada neste trabalho), o pino penetra inicialmente no material da chapa superior na direção da chapa inferior, e paralelo a esse movimento, a camisa faz movimento da retração que se cria uma cavidade, onde ficará o material plastificado descolado durante a penetração do pino. O pino penetra até uma profundidade pré-determinada e, após atingir esse valor, o mesmo passa a ser retraído em direção à superfície da chapa superior, e a camisa avança até a mesma superfície, deste modo, o movimento da camisa empurra o material plastificado de volta à região da solda, deixando assim a superfície nivelada. Finalmente, quando o pino e camisa atingem a superfície da chapa superior, a ferramenta pode ser retraída e a solda está finalizada *(PATNAIK et al., 2006).*

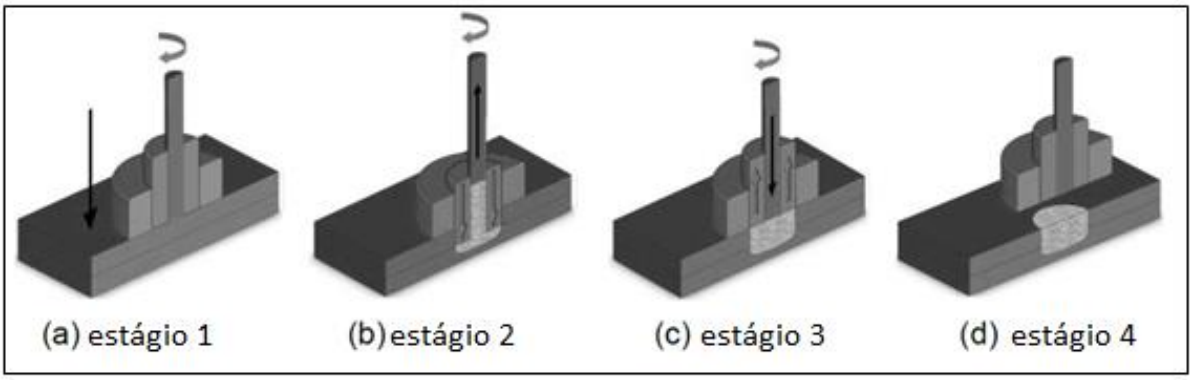
Figura 4. Esquema da variante de penetração do pino do processo FSpW. a) aperto das chapas e rotação da ferramenta; b) penetração do pino e retração da camisa; c) ferramentas voltam à superfície; d) remoção da ferramenta.



FONTE: Adaptada do HZG.

Conforme citado, o processo pode ser realizado através de outra variante do processo, isto é, da *penetração da camisa*. A sequência deste processo é a mesma da que ocorre quando a variante é a *penetração do pino*, diferenciando apenas pelo fato de que nesta situação quem penetra no material é a camisa, enquanto que o pino sofre a retração. A Figura 5 ilustra esse esquema, onde se observa que a mudança ocorre apenas na etapa (b). Nesta situação, no estágio 2 há a penetração da camisa e retração do pino. Após essa fase, segue o mesmo esquema descrito na variante *penetração do pino.*

Figura 5 . Esquema da variante penetração da camisa do processo FSpW. a) aperto das chapas e rotação da ferramenta; b) penetração da camisa e retração do pino; c) ferramentas voltam à superfície; d) remoção da ferramenta.



FONTE: Adaptada do HZG.

Ambas as variantes possuem suas vantagens e desvantagens. A variante *penetração da camisa* exige mais esforço da ferramenta e uma potência maior da máquina, no entanto se tem como resultado juntas mais resistentes, visto que o botão da solda é maior. Enquanto que na variante *penetração do pino*, a ferramenta sofre menos esforço, tendo assim uma vida útil maior, além de exigir uma potência menor da máquina, entretanto, o resultado são juntas menos resistentes quando comparadas com as que são obtidas através da variante *penetração da camisa (ROSENDO, 2009).*

2.2.3.2 Parâmetros de processo

Os parâmetros do processo interferem de forma direta nas propriedades mecânicas e na microestrutura da zona soldada. A busca, quando se desejam juntas

com elevada resistência, é por uma combinação de parâmetros que fornecerá os melhores resultados de resistência. Por isso, a importância de saber como cada parâmetro poderá afetar a união soldada.

As principais variáveis controláveis do processo são: velocidade de rotação, profundidade de penetração, tempo de penetração, *dwell time* (tempo de permanência sem que haja penetração), velocidade de penetração e a pressão entre as chapas. A velocidade de rotação da ferramenta tem uma grande influência sobre a temperatura, uma vez que uma maior velocidade de rotação gera mais calor, e consequentemente, uma temperatura mais elevada será conseguida. A profundidade de penetração depende da espessura das folhas, pois essa penetração é justamente a medida da distância que a ferramenta vai penetrar nas chapas. Já a força de aperto influência diretamente a aparência da solda e a não formação de rebarba no botão da solda. O Quadro 4 apresenta como cada parâmetro afeta na união (*PICCOLO, 2014).*

Quadro 4. Principais variáveis controláveis do processo e seus efeitos.

Parâmetros	Efeitos
Velocidade de rotação	Calor de fricção, mistura do material
Profundidade de penetração	Entrada de calor e mistura do material
Dwell time	Aparência da solda
Velocidade de penetração	Entrada de calor e aparência da solda
Tempo de penetração	Mistura do material
Força de aperto	Aparência da solda

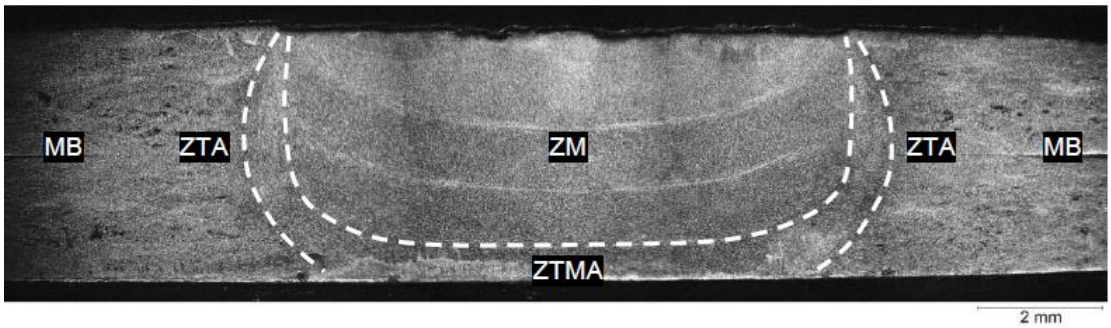
FONTE: Autora.

2.2.3.3 Macro e microestrutura da zona soldada

Os processo de soldagem por fricção apresentam na sua microestrutura quatro regiões distintas: a Zona da Mistura (ZM), a Zona Termo-mecanicamente afetada (ZTMA), a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e o Metal Base (MB). Cada região

possui particularidades microestruturais, apresentando uma diversidade no tamanho e orientação dos grãos *(CAMPANELLI et al., 2013; SILVA et al., 2007).* A macrografia da Figura 6 mostra essas regiões para a junta soldada da liga AZ31 *(CAMPANELLI, 2012)*.

Figura 6. Macrografia da seção transversal de um solda FSpW da liga AZ31.



FONTE: Campenelli, 2010.

A Figura 7 mostra as microestruturas das regiões encontradas no botão da solda, onde pode ser vista com mais clareza a diferença entre cada uma delas.

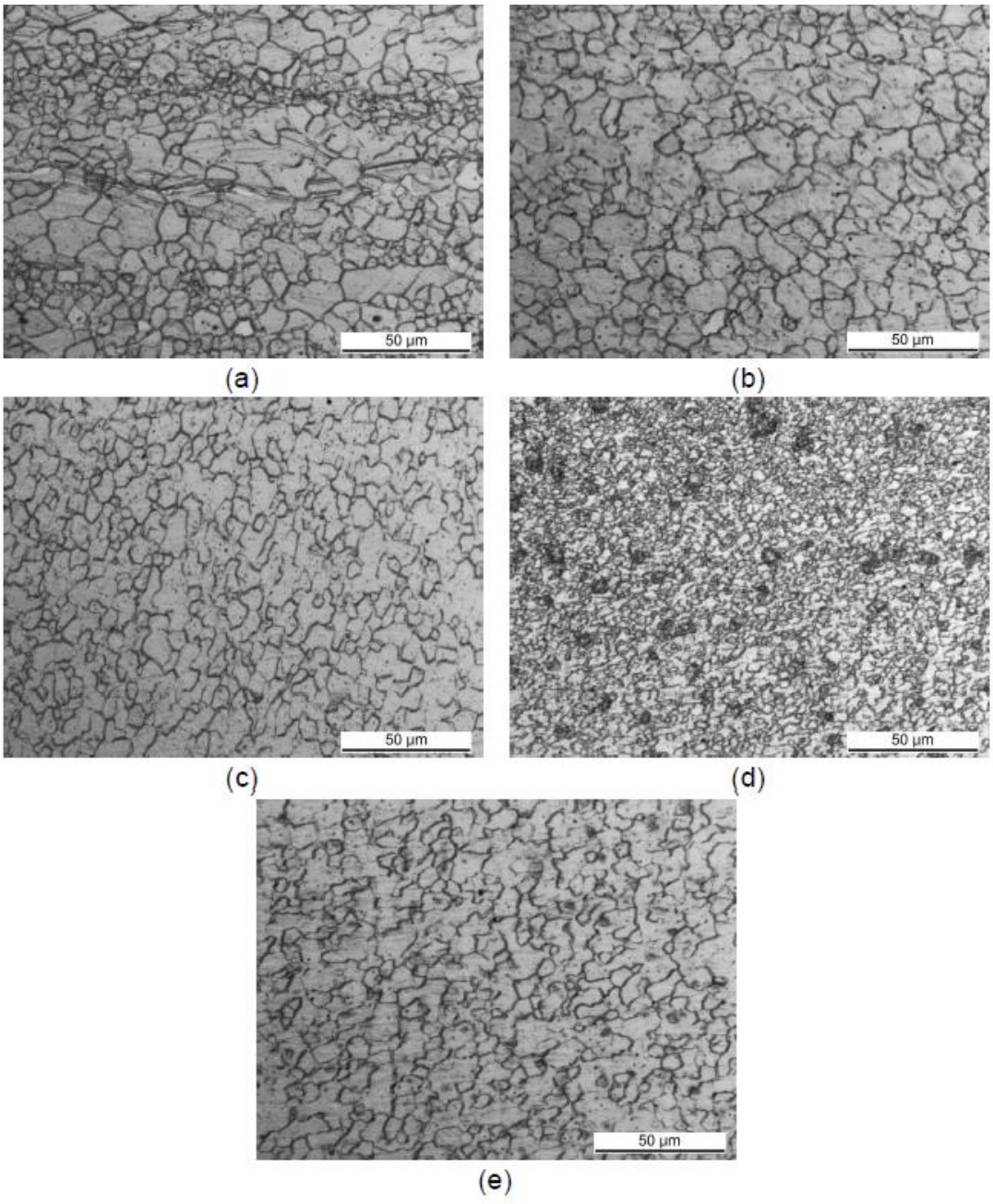
O MB, ilustrado na Figura 7(a), é a zona mais distante do botão da solda e não é afetado pelo calor, nem pela deformação no processo. Assim, as características dos grãos desta região são exclusivamente devido ao processamento e/ou tratamento de calor antes da soldagem *(CAMPANELLI, 2012; ROSENDO et al., 2011; SU et al., 2006).*

A Figura 7(b) ilustra a ZTA, nesta região não se observa deformação plástica, sendo encontrados grãos mais grossos, similares com os do MB. Essa região é afetada por ciclos térmicos durante a soldagem, e a temperatura pode atingir valores suficientes para ocasionar a recuperação da microestrutura laminada das chapas *(MITLING et al., 2006).*

Na ZTMA, mostrada na Figura 7(c), a temperatura encontrada não é suficientemente alta a ponto de haver recristalização dinâmica, porém é uma região caracterizada por um grau moderado de deformação plástica. Os grãos se encontram alongados em certa direção e altamente deformados se comparado com a ZTA e o MB. No caso de ligas endurecíveis por precipitação ocorre, geralmente, a recuperação do material na ZTMA e, eventualmente, a desestabilização do tratamento térmico da liga *(ROSENDO et al., 2011; SILVA el at., 2007).*

Finalmente, a Figura 7(d) e (e) mostram a ZM. Nesta zona encontram-se grãos finos e recristalizados dinamicamente e, isso acontece por causa da rotação e da penetração da ferramenta que geram calor por fricção suficiente para que a recristalização dinâmica se processe. Nesta região, ocorre uma intensa deformação plástica acompanhada de uma elevada temperatura (cerca de 80% da temperatura de fusão do material) que promovem a união entre as chapas *(CAMPANELLI, 2012).*

Figura 7. Micrografias óticas das diferentes zonas de solda do liga AZ31: a) MB, b) ZTA, c) ZTMA, d) ZM superior e e) ZM inferior

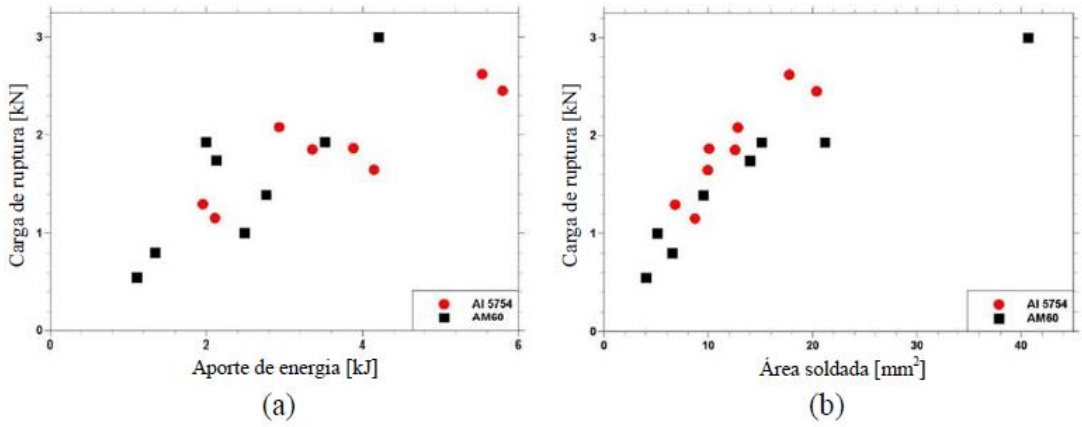


FONTE: Campanelli, 2012.

2.2.3.4 Propriedades mecânicas e aporte térmico

O que define as propriedades mecânicas das juntas soldadas são fatores, tais como: tamanho do botão da solda, presença de defeitos, dureza, nível de adesão entre as chapas, dentre outros *(ARAUL et al., 2007; GERLICH, 2005; SU et al., 2006).* Esses fatores estão relacionados não apenas ao aporte térmico, mas também com a mistura mecânica entre os materiais. Estudos realizados até o momento não conseguem definir exatamente o efeito individual de cada um desses agentes (energia térmica e mecânica) sobre a propriedade final da junta. No entanto, já pode chegar a alguns resultados. Conforme indica a Figura 8 (a) e (b), o efeito do aporte térmico e da área soldada afeta a resistência mecânica da junta soldada *(SU et al, 2006).*

Figura 8. Relação entre resistência da solda: a) aporte de energia e b) área soldada.



FONTE: SU, et al, 2006.

Os resultados do aporte térmico, representados na Figura 8(a), foi calculado analiticamente por meio de expressões estabelecidas para o aporte térmico. Conforme mostrado no trabalho de *North et. al*. (2006) o aporte térmico (Q) em soldas por fricção por ponto resultante da atuação de um ou mais componentes da ferramenta é expresso pela equação 1:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Força(n)(x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega\,(n)\Delta t \qquad (1)$$

Onde, n - é número de amostra, N - é a amostra final, x - é profundidade de penetração da ferramenta, ω é a velocidade angular da ferramenta (rad/s) e ∆t é o tempo total.

Experimentos realizados até o momento têm mostrado que o efeito do primeiro termo da equação (1) é muito menor que o efeito do segundo termo, podendo, portanto, ser desprezado, reduzindo a expressão de Q para a equação 2 *(NORTH et al., 2006; GERLICH et al., 2006).*

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n)\omega\,(n)\Delta t \qquad (2)$$

Conclui-se desta forma que tanto a velocidade de rotação, quanto o tempo de soldagem e o torque contribuem de modo significativo sobre o aporte térmico. Vale ser citado que se a rotação for muito elevada pode ocorrer um fenômeno conhecido como transição/escorregamento entre a ferramenta e o material, ocasionando desta forma a redução do torque, e consequentemente, do aporte térmico *(GERLICH et al., 2006).*

Conforme ilustrado na Figura 8 (b), o tamanho da junta soldada também tem relação direta com a carga máxima suportada pela junta. O aumento da zona soldada leva ao aumento da seção resistente efetiva da junta, e, por conseguinte, da carga necessária para levar a falha *(GERLICH et. al., 2006; SU et. al., 2006).*

2.2.3.5 Aplicação

FSpW é um processo de união, principalmente de ligas leves, que produz juntas de alta qualidade, mas na teoria pode ser aplicado a qualquer material que possua uma boa plasticidade. A gama de componentes e materiais para os quais FSpW pode ser utilizado está continuamente em expansão, mostrando, assim, o grande potencial que esse processo possui. Experimentos vêm sendo realizados em juntas dissimilares de alumínio, magnésio, aço e da união de um polímero com um metal.

Esse processo de união a ponto tem potencial de aplicações em indústrias automotiva e aeronáutica. No setor automotivo, o processo pode ser capaz de superar problemas enfrentados pelo RSW. Na indústria aeronáutica mais melhorias

são necessárias até que o processo atinja um nível de resistência e confiabilidade em comparação à rebitagem *(SILVA et al., 2007).*

Por esse ser um processo novo de soldagem, ainda em fase de experimentos, análises e estudos precisa-se percorrer um caminho para ser inserido nas indústrias em larga escala. Ferramentas para análise do processo que auxiliem no entendimento desta técnica são importantes para que essa imersão nas indústrias seja acelerada.

2.3 Planejamento de experimento (DOE) – *Box-Behnken*

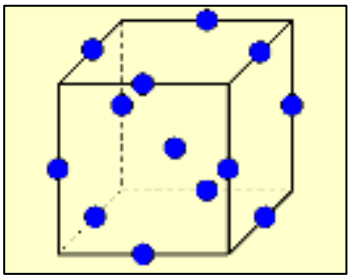
O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments* - DOE) é uma ferramenta utilizada com o intuito de melhorar a qualidade do processo ou produto que está sendo produzido através de parâmetros mais relevantes ao processo. Ela tem como função definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois objetivos: maior precisão estatística possível na resposta e menor custo. É, portanto, uma técnica de grande importância para a indústria, pois seu emprego permite resultados mais confiáveis economizando dinheiro e tempo, parâmetros fundamentais em tempos de concorrência acirrada. A partir dele é possível otimizar as características do processo, minimizando desta forma os fatores de ruídos *(Portal do Conhecimento; TJANTELÉ, 1991)*

Esse tipo planejamento de experimento possui métodos que auxiliam na análise da superfície de resposta. O Box-Behnken é um desses métodos, que é usado para a otimização do processo e para examinar a relação entre uma ou mais variáveis de resposta e um conjunto de parâmetros experimentais (*ANEES, 1995)*. Este método não contém um experimento fatorial completo ou fracionário incorporado, e as suas combinações de tratamentos estão nos pontos médios das bordas do espaço experimental, não em pontos axiais, assim, todos os pontos do projeto estão dentro da margem de segurança, e exigem pelo menos três fatores contínuos. Além disso, modelos Box-Behnken têm menos pontos do projeto, e cada fator requer apenas três níveis em vez de cinco, como ocorrem em projetos composto central, o que pode ser mais conveniente experimentalmente e menos

caro do que modelos composto central com o mesmo número de fatores *(RAGONESE, 2002).*

A Figura 9 mostra o esquema de um experimento de Box-Behnken com três fatores sendo avaliados em três níveis. Os pontos no diagrama representam as corridas experimentais executadas:

Figura 9. Representação das corridas experimentas executadas pelo método Box-Behnken



FONTE: Portal do conhecimento.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e metodologias utilizados durante a pesquisa, cujos tópicos apresentam o tipo do material e todo o desenvolvimento do processo, mostrando todos os ensaios e análises que foram realizados.

Este trabalho foi realizado no Centro de Pesquisa HZG na cidade de Geesthacht, Alemanha, no Departamento de Processos de Junção no Estado Sólido (*Department of Solid State Joining Processes*).

3.1 Metodologia

Na Figura 10, são apresentadas as etapas experimentais realizadas nessa pesquisa no formato de fluxograma. Esse fluxograma foi adotado para atingir o objetivo principal deste trabalho que é avaliar a aplicabilidade do processo FSpW para a liga AA6061-T6.

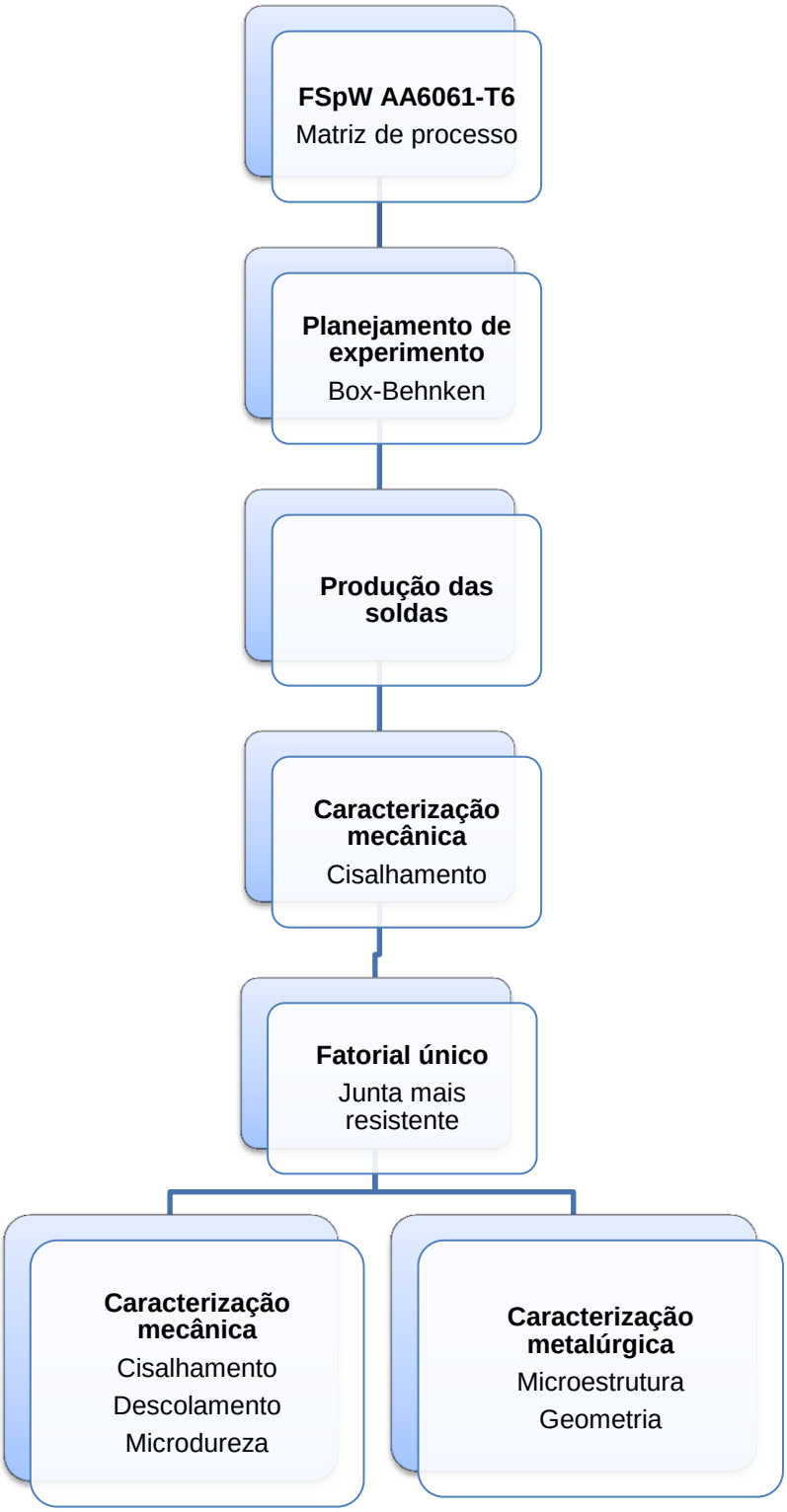
O desenvolvimento experimental foi iniciado com a definição da matriz de parâmetros de soldagem tendo como variáveis de processo a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de penetração do pino e a profundidade de penetração do pino. Estas três variáveis foram investigadas numa faixa de três níveis cada uma que foram determinados a partir de experiência prévia do grupo de pesquisa do HZG.

Após a determinação da faixa de parâmetros o Box-Behnken foi aplicado e as amostras de soldagem foram produzidas e testadas segundo o ensaio de cisalhamento.

A partir da condição do maior valor de resistência ao cisalhamento, foram realizadas novas condições de soldagem, em torno deste ponto. Essa análise é chamada de fatorial único.

Por fim, foi feita a caracterização através da análise mecânica e metalúrgica. As propriedades mecânicas foram analisadas por meio de testes de cisalhamento, descolamento e microdureza. Enquanto que as propriedades metalúrgicas foram avaliadas por análises macroscópica e microscópica.

Figura 10. Fluxograma da metodologia do procedimento experimental.



FONTE: Autora

3.2 Descrição do Material

Neste trabalho foram usadas chapas de liga de alumínio 6061-T6 com 1,25 mm de espessura. Como citado anteriormente, a liga AA6061-T6 é uma liga da série 6XXX. O material foi soldado na condição como recebido da *The Welding Institute - TWI* (tratado termicamente (T6)). Sendo realizada apenas a limpeza e desengraxe com acetona, para a retirada de impurezas presentes na superfície das chapas. As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição química e as propriedades mecânicas, respectivamente, da liga utilizada.

Tabela 1. Composição química da liga AA6061-T6

Mg	***Si***	***Fe***	***Cu***	***Cr***	***Mn***	***Ti***	***Zn***	***Al***
0,8-1,2	0,4-0,8	Max. 0,7	0,15-0,4	0,04-0,5	Max. 0,15	Max. 0,15	Max. 0,25	Restante

FONTE: Alcoa.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga AA6061-T6.

Resistência a tração (MPa)		**Dureza Brinell Típica (HB)**	**Resistência máxima ao cisalhamento (MPa)**	**Alongamento**
Limite de resistência à tração	Limite de escoamento			Porcentagem Min. em 50 mm
Min. 260	Min. 240	95	207	10

FONTE: Alcoa.

3.3 Planejamento Experimental - Box-Behnken

As variáveis operacionais do processo avaliadas foram: velocidade de rotação (VR), profundidade de penetração do pino (PP) e a velocidade de penetração do pino (VP), mantendo constante a força de aperto de 12 kN. Inicialmente buscou-se encontrar a janela de possibilidade do material que resultassem em juntas com boa qualidade, essa matriz foi determinada a partir de experiência prévia do grupo de pesquisa do HZG. A Tabela 3 apresenta a matriz de parâmetros avaliados.

Tabela 3. Matriz de parâmetros

Parâmetro	Nível 1 (-1)	Nível 2 (0)	Nível 3 (+1)
PP (mm)	1,2	1,4	1,6
VP (mm/sec)	3,0	3,5	4,0
VR (rpm)	1300	1800	2300

FONTE: Autora

Após determinada a matriz de processabilidade, a ferramenta estatística de planejamento de experimentos (DOE), usando o método *Box-Behnken,* foi utilizada para o estudo da otimização dos parâmetros de soldagem do processo FSpW da liga AA6061-T6. O software *Minitab* foi utilizado para a realização deste fim. Como indicado na Tabela 3, foram avaliados três parâmetros de processo em três níveis diferentes, que, usando este método de experimento, resulta em 13 condições de soldagem diferentes. O software fornece 15 condições a serem testadas, dentre as quais 12 pertencem à aresta do cubo e há 3 repetições que pertencem ao centro do cubo, essas condições de soldagem são indicadas na Tabela 4.

Box-Behnken é um método que assegura que os resultados estejam dentro de uma margem confiável. Logo, não se faz necessário a triplicata de todas as condições, apenas sendo realizada a triplicata da condição que se encontra no centro do cubo.

A variável resposta é a resistência ao cisalhamento. Ela foi tomada como parâmetro de determinação para definições dos parâmetros de soldagem otimizados. O critério de resposta adotado foi: “quanto maior, melhor”, visto que objetiva-se a obtenção de juntas o mais resistentes possíveis.

Tabela 4. Condições de soldagem fornecida através do método Box-Behnken.

Condição	VR (rpm)	PP(mm)	VP(mm/s)
1 (0;-1;+1)	1800	1,2	4
2 (0;0;0)	1800	1,4	3,5
3 (0;-1;-1)	1800	1,2	3
4 (-1;0;-1)	1300	1,4	3
5 (0;+1;+1)	1800	1,6	4
6 (+1;-1;0)	2300	1,2	3,5
7 (-1;-1;0)	1300	1,2	3,5
8 (-1;0;+1)	1300	1,4	4
9 (+1;0;-1)	2300	1,4	3
10 (1;0;+1)	2300	1,4	4
11 (0;0;0)	1800	1,4	3,5
12 (-1;+1;0)	1300	1,6	3,5
13 (+1;+1;0)	2300	1,6	3,5
14 (0;0;0)	1800	1,4	3,5
15 (0;+1;-1)	1800	1,6	3

FONTE: Minitab.

3.4 Abordagem tradicional para experimento – Fatorial único

Após definida a melhor condição de soldagem segundo o método Box-Behnken e a sua confirmação através de experimentos, foi analisada uma nova matriz de condições soldagem, seguindo a metodologia do fatorial único (*one-factoria*l). Esta metodologia avalia os pontos em torno do valor ótimo, ou seja, a variável a ser avaliada teve seu nível alterado em dois níveis (superior e inferior ao valor ótimo), enquanto os outros parâmetros foram mantidos constantes. O fator de resposta avaliado mais uma vez foi à resistência ao cisalhamento.

Para a realização desta análise, três juntas sobrepostas foram produzidas para cada uma das condições, todas as soldas foram realizadas na forma de corpos de prova para teste de cisalhamento.

Esta avaliação teve como objetivo compreender como a influência de cada variável do processo afeta no desempenho mecânico das juntas.

3.5 Equipamento e Ferramenta utilizados no processo FSpW

As soldas foram produzidas através do processo FSpW, realizadas no instituto de pesquisa HZG, na Alemanha. A variante de penetração foi à *penetração do pino*. A ferramenta utilizada foi uma ferramenta cilíndrica composta por anel de fixação, camisa e pino com diâmetros externos de 17, 9 e 6 mm, respectivamente, como pode ser visto na Figura 11. Essa ferramenta foi produzida a partir da liga Hotvar, que tem sua composição química apresentada na Tabela 5.

Figura 11. Ferramenta de soldagem do processo FSpW: a) anel de fixação, b) camisa e c) pino.

FONTE: HZG.

Tabela 5. Composição química (%peso) de um aço Hotvar.

C	Cr	Fe	Mn	Mo	Si	V
0,55	2,6	91,99	0,75	2,25	1,0	0,85

FONTE: HZG.

As soldas foram realizadas na máquina RPS 100, que é um equipamento de soldagem próprio para esse processo. Ela possui um sistema de monitoramento integrado que permite o controle da velocidade de rotação, do tempo de soldagem, da penetração do pino e da força axial. O sistema de aperto das chapas é feito por um sistema pneumático, o qual pode atingir um valor de até 21 kN. A força axial da

máquina pode chegar a 15 kN e a velocidade máxima de rotação de 3000 rpm. A Figura 12 exibe esse equipamento de soldagem.

Figura 12. Máquina de soldagem FSpW – RPS 100.

FONTE: Autora.

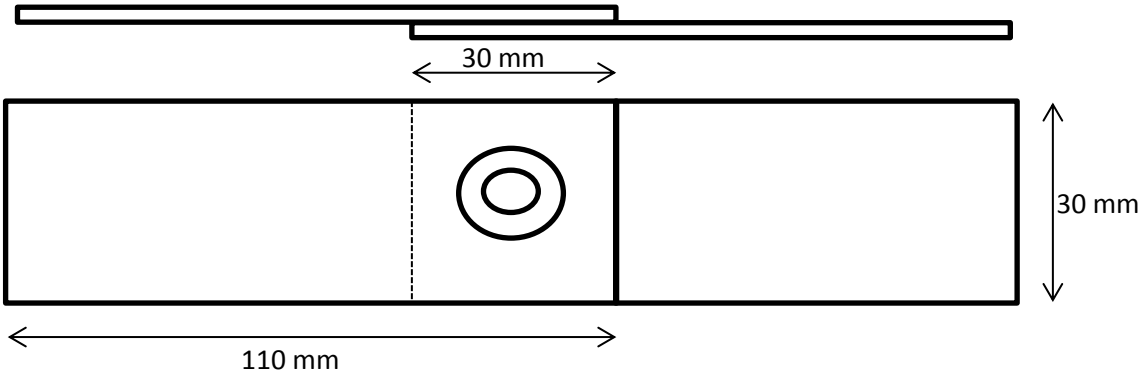
Antes da fixação da ferramenta na máquina, todos os seus componentes foram limpos através da imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH) por um período médio de 2 horas, assegurando assim que não havia nenhuma deposição de alumínio ou outro material na superfície da ferramenta.

3.6 Preparação dos corpos de provas

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se chapas de liga de alumínio 6061-T6, fornecida pela TWI. As amostras foram fornecidas em formato retangular de 130 mm x 30 mm x 1,25 mm.

O teste de cisalhamento foi baseado na norma DIN EN ISO 14273:2022, 2022 “ Speciments Dimensions and Procesure for Shear Testing Resistence Spot, Seam and Embossed Projection Welds” o qual determina que as chapas de alumínio sejam montadas sobre uma sobreposição de 30 mm de comprimento, como ilustrado no esquema da Figura 13.

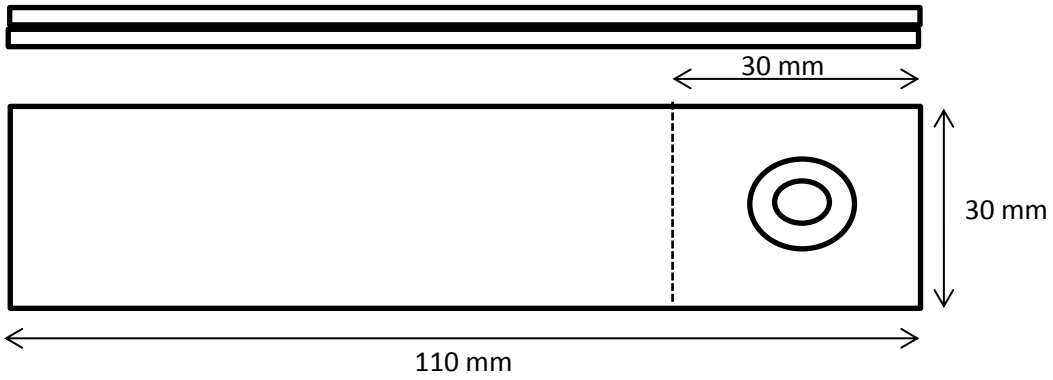
Figura 13. Esquema do corpo de prova para o teste de cisalhamento.



FONTE: Autora.

O teste de descolamento não é normatizado para juntas soldadas por FSpW, sua configuração foi baseada segundo a ASTM D1876-08 “*Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives”.* A Figura 14 ilustra a configuração dos corpos de provas para esse teste.

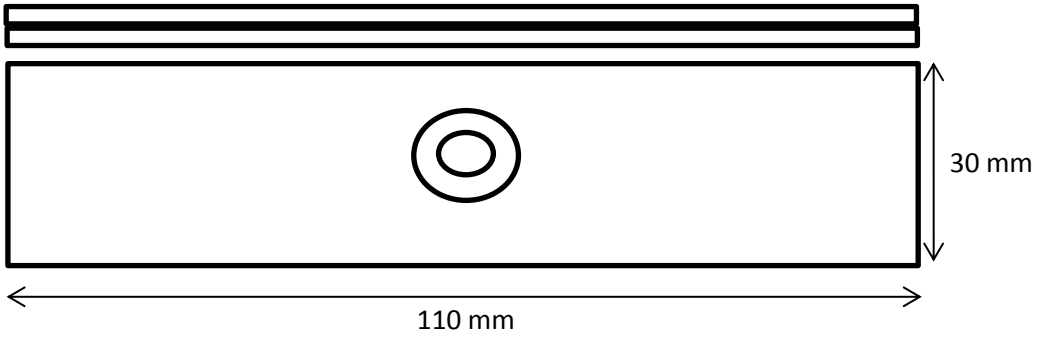
Figura 14. Esquema do corpo de prova para o teste de descolamento.



FONTE: Autora.

Para soldar as amostras que seriam utilizadas na análise macro e microscópica, as partes foram montadas uma diretamente sobre a outra, como pode ser visto no esquema da Figura 15, e a solda realizada no meio das chapas.

Figura 15. Esquema do corpo de provas das amostras analisadas no MO.



FONTE: Autora.

3.7 Caracterização Metalúrgica

A caracterização macroestrutural e microestrutural da solda e a sua qualidade foram verificadas através da análise metalográfica. Essa análise foi realizada em amostras seccionadas ao centro da solda.

Para realização desta análise as juntas soldadas passaram por etapas de preparação. O primeiro passo foi cortar cuidadosamente essas amostras, próximo ao centro da solda. Esta etapa foi feita em uma máquina de corte automática, *Struers Secotam-50,* utilizando um disco abrasivo de diamante. Em seguida, esses corpos de provas foram embutidos a frio em uma resina transparente (*Clarocit*) sob pressão, para evitar porosidade na resina. Após esse estágio, elas foram lixadas manualmente com uma lixa d'água de granulometria 120 para deixar a superfície das amostras em um nível mais plano e atingir o mais próximo possível o centro da solda.

Por fim, as amostras foram submetidas aos procedimentos convencionais de lixamento e polimento, utilizando uma máquina automática modelo *Struers Tegrapol-31*. Na primeira etapa ocorreu a abrasão com lixas d'água de granulometria 320, seguida de uma de 2500 *mesh.* Em seguida, as amostras foram polidas com suspensão de diamante de 9 µm, seguido dos de 3 µm, e finalizando com sílica de

0,05 µm. Ao final essas amostras foram submetidas a um processo de limpeza com etanol usando ultrassom.

A análise macroesturural das amostras foi realizada através do ataque químico por emersão do reagente *Kroll (96 ml H_2O + 6 ml $HN0_3$ + 2 ml HF)* na temperatura ambiente. Este ataque permitiu evidenciar os aspectos geométricos da solda. Enquanto que para a revelação de grãos foi utilizado o ataque eletroqúimico *Barker (1,8% HF em H_2O)*.

O microscópico óptico (MO) empregado foi o modelo *Leica DM IRM*, equipado com o software *Leica Application Suite 3.5*. Essa análise tinha como finalidade a revelação e caracterização das zonas da solda, bem como a presença de possíveis defeitos produzidas pelo processo FSpW e assim, correlacioná-los com os resultados dos testes mecânicos.

A avaliação da superfície da fratura proveniente do ensaio de cisalhamento foi realizada na microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o microscópio *Quanta 650 FEG Scanning electron microscopy.* A preparação dessa amostra foi realizada através da limpeza com etanol da superfície fraturada e um corte no centro do furo deixado após a fratura.

3.8 Caracterização Mecânica

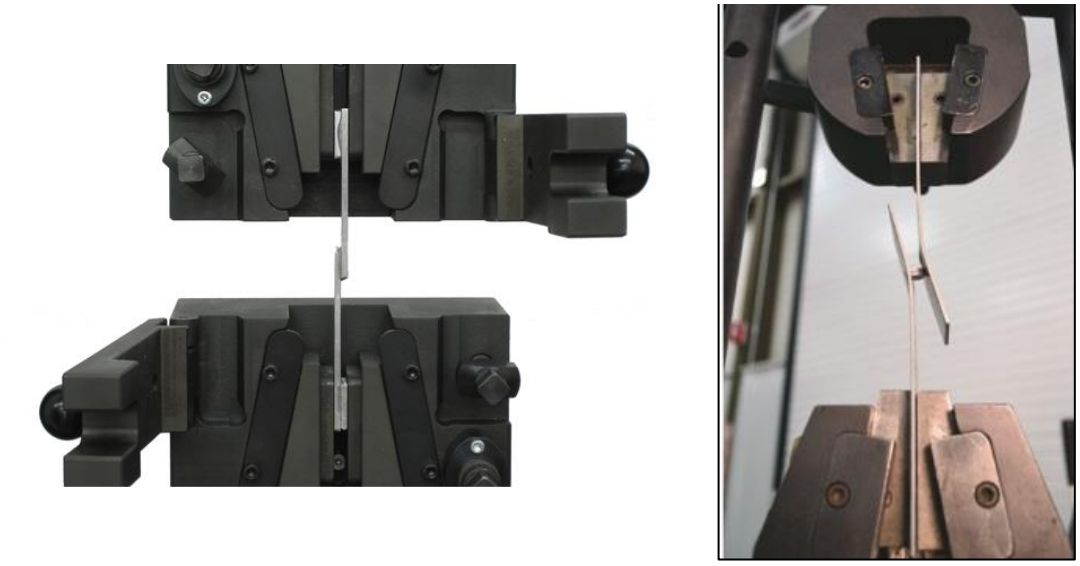
3.8.1 Ensaio de Cisalhamento e de Descolamento

A resistência da solda foi caracterizada através do teste de cisalhamento e, posteriormente, pelo teste de descolamento. O equipamento usado para estes testes foi a máquina universal de ensaios mecânicos *Zwick/Roell-driven* que tem uma capacidade de carga de 200 kN, integrada ao software *TestXpert* que forneceu os dados do ensaio. A taxa de carregamento usada foi de 2 mm/min e os testes foram realizados à temperatura ambiente. Detalhes do sistema de fixação para o teste de cisalhamento e descolamento são mostrados na Figura 16 (a) e (b), respectivamente.

O ensaio de cisalhamento não é normatizado para juntas soldadas por FspW, sendo suas dimensões baseadas na norma DIN EN ISO 14273:2022 *“ Speciments*

Dimensions and Procesure for Shear Testing Resistence Spot, Seam and Embossed Projection Welds". Após a preparação do corpo de prova, conforme descrita no ponto *3.6*, e da realização da soldagem, as amostras eram colocadas no sistema de fixação mostrado na Figura 16 (a), e um pequeno calço em cada extremidade era requerido para assegurar a correta aplicação das forças.

Figura 16. Detalhes do sistema de fixação para o teste de: a) cisalhamento e b) descolamento.

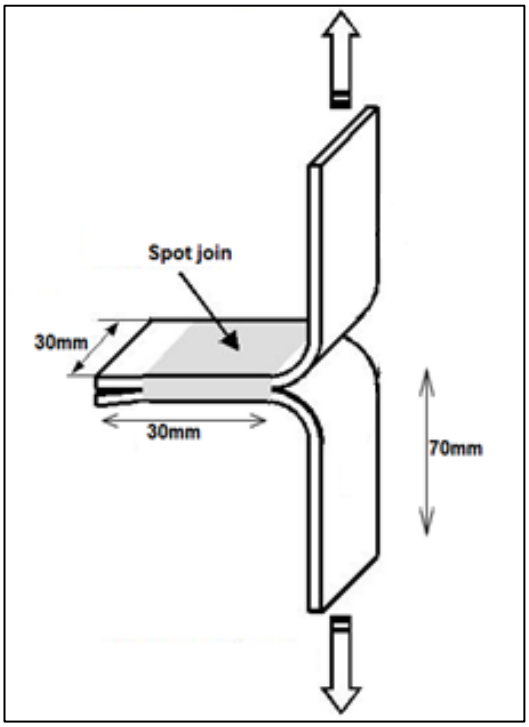


(a) (b)

FONTE: Autora.

Enquanto que para teste de descolamento a preparação entre a junta soldada, como descrita na seção *3,6,* e o início do teste é mais complicado. O esquema da Figura 17 mostra como as amostras devem ficar antes da sua fixação na máquina. Neste teste, após os corpos de provas terem sido soldados, são levados a um dispositivo de fixação, mostrado na Figura 18, e com um auxílio de uma ferramenta apropriada são dobrados até ficarem com um formato de um *T*. Finalizado esse procedimento, a amostra é inserida na máquina universal de ensaios mecânicos, como pode ser visto em maior detalhe a Figura 16 (b).

Figura 17. Esquema do corpo de prova para o teste de descolamento.



FONTE: Adaptado de SHUANG et al., 2015.

Figura 18. Equipamento de auxílio para a preparação do corpo de prova para o ensaio de descolamento.

FONTE: Autora.

3.8.2 Ensaio de microdureza

Com o objetivo de avaliar as modificações na resistência do material em cada região da solda foram realizados ensaios de microdureza.

Esses ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E384-11 "*Standard test method for microindentation hardness of materials*", em amostras embutidas, lixadas e polidas (mesmo procedimento realizado na análise metalúrgica).

Os testes de microdureza foram realizados em uma máquina de ensaios de dureza, *Zwick/Roeel ZHV*, que possui um microdurometro de dureza Vickers, com penetrador convencional.

Para cada amostra uma linha de indentação foi executada transversalmente à direção de solda, sendo realizada a meia espessura da chapa superior. A uma carga de 300 gf ($HV_{0,3}$), durante 10 segundos. O afastamento entre as indentações era de 0,5 mm ao longo de 15 mm de cada lado da solda centro correspondente a 59 pontos.

3.9 Medição de temperatura

Com a finalidade de avaliar o efeito do aporte térmico no desempenho mecânico da solda, foram realizadas medições do ciclo térmico na condição máxima de resistência ao cisalhamento (RC). Essa medição de temperatura foi realizada utilizando um termopar do tipo-K (níquel-cromo / níquel-alumínio) com 0,5 mm de diâmetro conectado ao sistema de condicionamento de sinal e aquisição de dados *National Instruments SCXI*, integrado a um computador. O software LAbView foi utilizado para avaliação dos dados em tempo real, fornecendo os diagramas de temperatura. Os termopares foram conectados entre as placas a serem soldadas e presos com uma fita a fim de que a medição no centro do botão da solda pudesse ser feita.

CAPÍTILO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Otimização do processo - Método *Box-Behnken*

A otimização estatística dos parâmetros de processo foi feita através do *Box-Behnken*, com o auxílio do software *Minitab*. Como citado no Capítulo III, foram avaliados três parâmetros de processo (velocidade de rotação (VR), profundidade de penetração (PP) e velocidade de penetração (VP)) em três níveis diferentes, que resultou em 15 condições de soldagem. A matriz de teste gerada pelo método *Box-Behnken* com os resultados da resistência ao cisalhamento (RC) obtido através dos ensaios mecânicos são apresentados na Tabela 6.

O objetivo era a obtenção de juntas mais resistentes possível, o critério de "quanto maior o valor de RC, melhor" foi utilizado como resposta. Cada uma das combinações de parâmetros fornecida pelo *software* foi definida como uma condição a ser soldada e foram numeradas de 1 a 15; essas condições foram soldadas e, posteriormente, testadas sob carga cisalhante. Em seguida, os resultados destes testes foram inseridos nesta matriz para assim poder compreender com ocorre essa variação de resistência com as escolhas dos parâmetros de processo. A Tabela 6 explicita esses valores; e a Figura 19 com um gráfico em barras indicando as condições testadas pelo resultado do teste de cisalhamento foi colocada tendo como objetivo facilitar a visualização dos dados fornecidos através da Tabela 6.

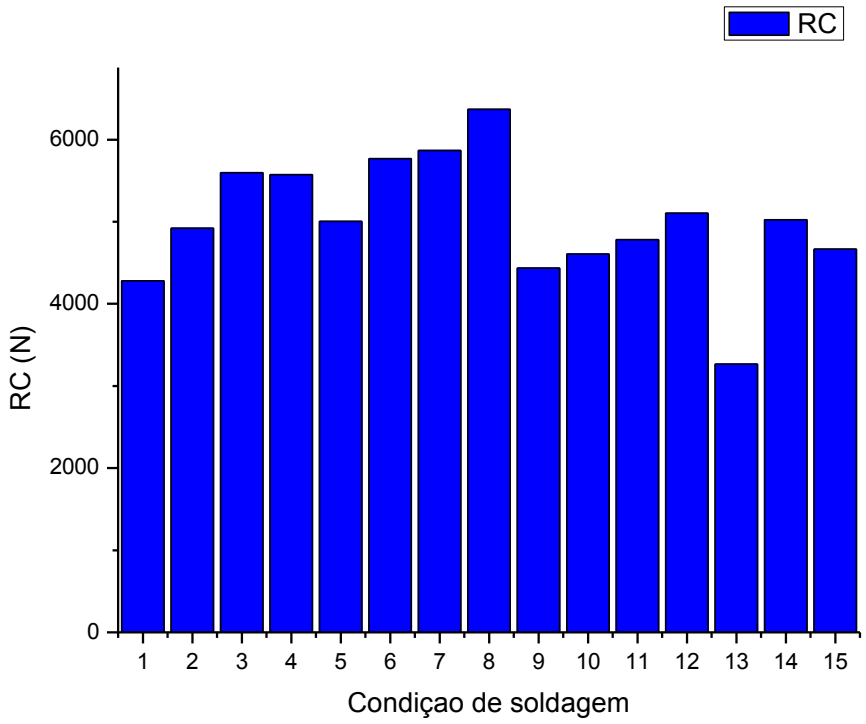
A partir da análise desta tabela percebe-se que as condições que forneceram os maiores valores de RC foram as condições 7 e 8, com 5868,27 N e 6368,62 N, respectivamente. O parâmetro de processo comum a essas condições foi a VR de 1300 rpm. Já a condição que forneceu o menor valor de RC (3264,56 N) foi à condição 13, onde foi utilizada uma VR de 2300 rpm. Conforme citado, esses resultados foram obtidos experimentalmente.

Tabela 6. Condições experimentais do Box-Behnken e resultados do teste de resistência ao cisalhamento.

Condição	VR (rpm)	PP(mm)	VP(mm/s)	RC (N)
1	1800	1,2	4	4279,11
2	1800	1,4	3,5	4921,21
3	1800	1,2	3	5598,45
4	1300	1,4	3	5575,1
5	1800	1,6	4	5003,67
6	2300	1,2	3,5	5767,37
7	1300	1,2	3,5	5868,27
8	1300	1,4	4	6368,62
9	2300	1,4	3	4435,67
10	2300	1,4	4	4607,68
11	1800	1,4	3,5	4782,44
12	1300	1,6	3,5	5102,65
13	2300	1,6	3,5	3264,56
14	1800	1,4	3,5	5023,31
15	1800	1,6	3	4666,72

FONTE: Autora.

Figura 19. Condição de soldagem x RC.



FONTE: Autora.

A fim de compreender como ocorreu essa variação de resistência com as escolhas dos parâmetros de processo, o método Box-Benhken gera resultados a partir da matriz de testes. Esses resultados são calculados automaticamente pelo software Minitab, tendo como base a Equação (3) gerada a partir dessa matriz.

$$RC_{teorico} = 17420 + 3{,}79 \times VR - 7819 \times VP + 534 \times PP + 0{,}0009 \times VR^2 + 448 \times VP^2 - 3351 \times PP^2 - 0{,}62 \times VR \times VP - 4{,}34 \times VR \times PP + 414 \times VP \quad (3)$$

A Figura 20 apresenta o resultado gerado pelo *software*, onde mostrou a influência de cada parâmetro isolado na resistência ao cisalhamento. A partir destes gráficos pôde ser analisado o parâmetro que mais afetou a resposta. Esse parâmetro foi a variável que produziu a maior amplitude na variação na resposta.

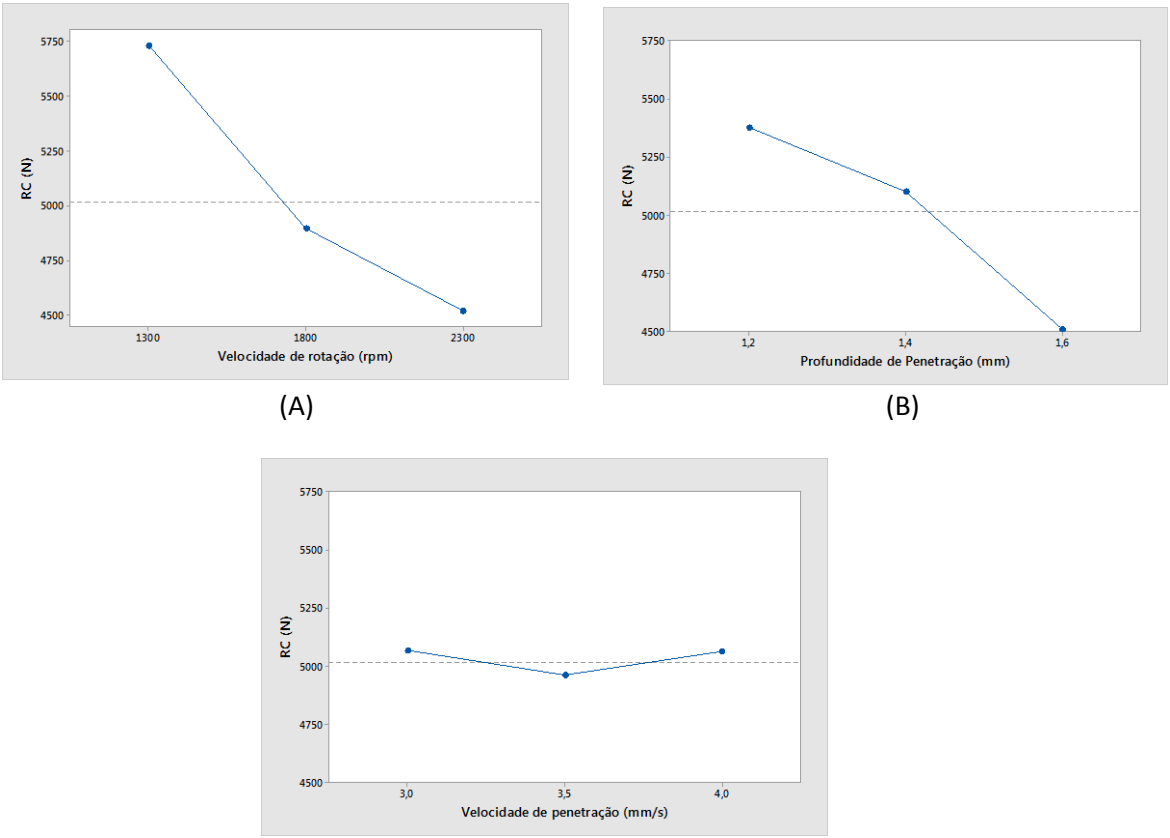
Sendo assim, ao analisar esses gráficos nota-se que a Figura 20 (A) fornece a maior amplitude de variação, isto significa que a velocidade de rotação foi o parâmetro que demonstrou maior influência na resistência ao cisalhamento. Esse resultado está de acordo com os valores encontrados experimentalmente os quais foram explicitados na Tabela 6.

A Figura 20 (B) apresenta a variação da resistência em função da profundidade de penetração, mostrando que esse é um parâmetro que influência significativamente sobre a resposta, pois houve uma amplitude considerável.

Enquanto que a menor delta de variação foi encontrada na Figura 20 (C), indicando que parâmetro de processo velocidade de rotação não possui efeito significativo na resposta. Confirmando o que foi obtido nos resultados experimentais, por exemplo, avaliando as condições de soldagem 9 e 10, indicadas na Tabela 6 e Figura 19, nota-se que mantendo constante a VR e PP e variando a VP houve apenas uma pequena variação.

Outra análise que este método estatístico fornece é poder avaliar como a interação entre os parâmetros afetou na resistência final da junta.

Figura 20. Efeitos principais das variáveis do processo.



(A) (B)

(C)

FONTE: Autora.

A Figura 21 apresenta os resultados das interações dos parâmetros de soldagem sobre a resposta: (a) interação VR e PP; (b) interação VR e VP; e (c) interação PP e VP.

A partir da análise destes gráficos, juntamente com a análise dos efeitos individuais, pode-se obter a otimização dos parâmetros através do método *Box-Behnken*.

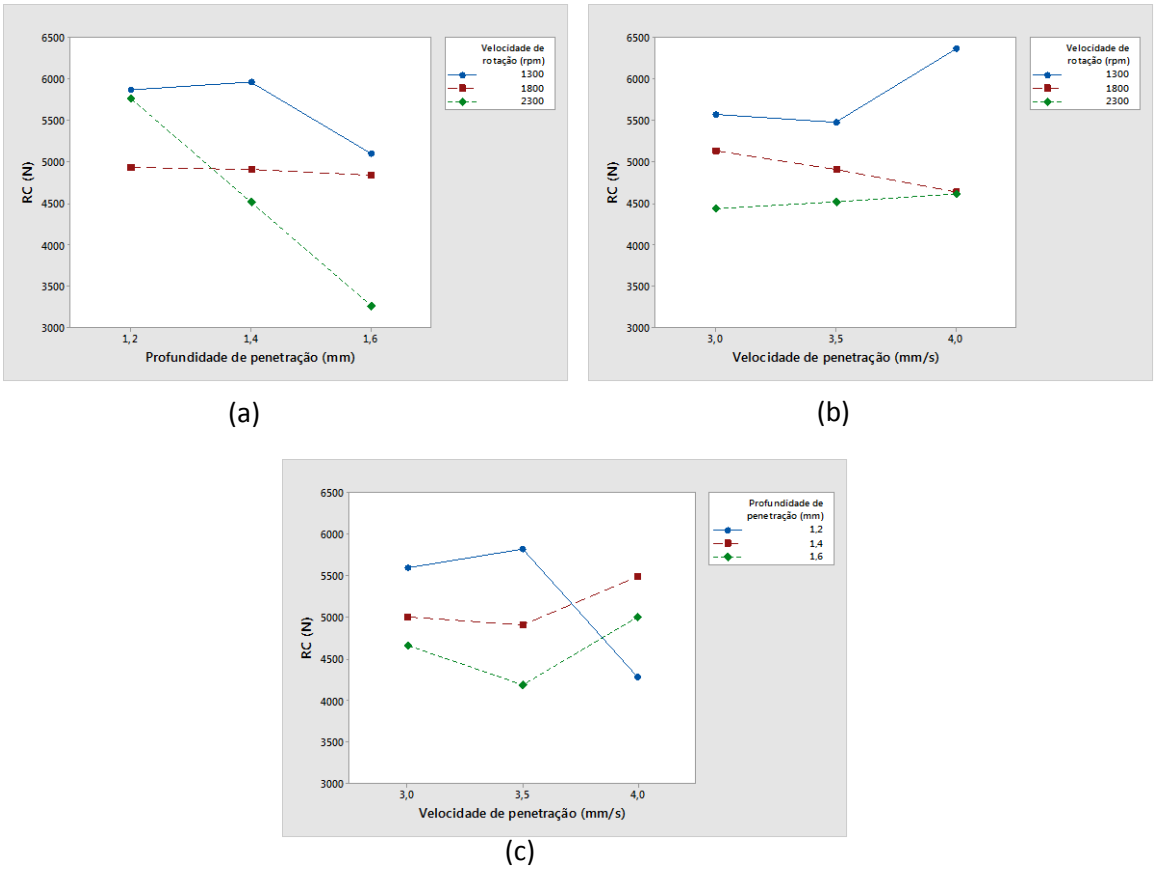
Observa-se nas Figura 21 (a) e (b) que valores mais elevados de RC são atingidos quando se usa uma VR de 1300 rpm. Valores inferiores são obervados para VR de 2300 rpm, excetuando a interação VR = 2300 rpm e PP = 1,2 que fornceu um valor elevado RC. Essa excessão se confirma no resultado experimental, onde mostra que a condição 6 de soldagem foi a que obteve o terceiro maior valor de RC = 5767,37 N.

Analisando a Figura 21 (a) e (c), nota-se que o maior valor de RC é conseguido quando a combinação de parâmetros utilizado foi de 1300 rpm e 1,4 mm, e o menor valor está na combinação de 2300 rpm e 1,6 mm. Os valores das interações com VP fornecem resutados intermediários, confirmando que essa variável não afeta significativamente na interação dos parâmetros.

Ao analisar mais uma vez a Figura 21 (b), percebe-se que o maior valor de RC é conseguido quando se usa uma VR = 1300 rpm e uma VP = 4,0 mm/s.

A conclusão da análise dessa Figura 21 fornece a combinação de parâmetro ótimo indicado pelo método Box-Behnken: 1300 rpm, 1,4 mm e 4,0 mm/s. Essa combinação foi a condição 8 de soldagem que forneceu o maior valor de RC = 6368,27 N.

Figura 21. Resultado as interações dos parâmetros de soldagem.



(a) (b)

(c)

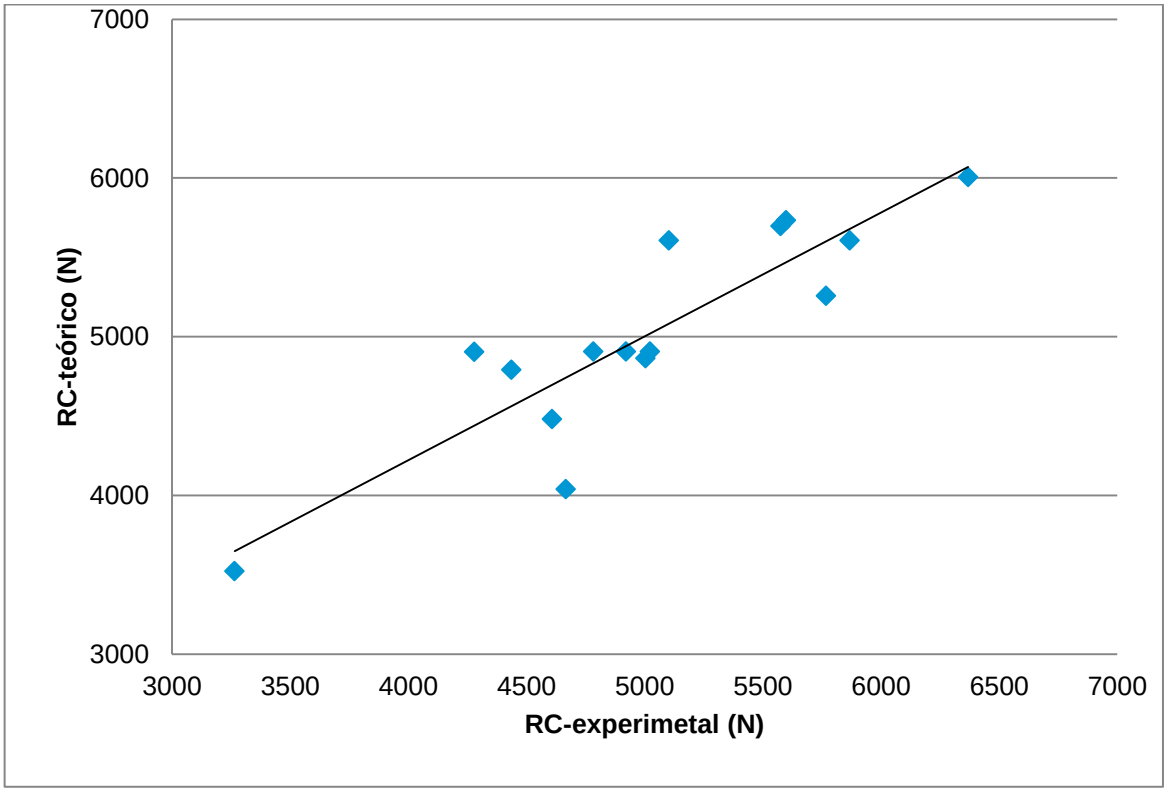
FONTE: Minitab.

A fim de certificar sobre a confiança do método experimental utilizado, foi feita a validação do seu modelo. Esta validação foi realizada através da comparação dos resultados obtidos experimentalmente (Tabela 6), com os resultados obtidos teoricamente, a partir da Equação (3).

O método é considerado confiável se a relação entre os valores de resultados experimentais e teóricos se aproximarem de uma reta com 45° de inclinação.

A Figura 22 apresenta essa relação, onde é possível observar que a linha de tendência desses pontos tem uma inclinação próxima a 45°. Logo, é possível afirmar que esse é método fornece resultados próximos aos reais.

Figura 22. RC-experimental x RC-teorico.



FONTE: Autora.

Após a validação do método, foram realizados novos ensaios de cisalhamento para a condição de soldagem otimizada: 1300 rpm, 4,0 mm/s e 1,4 mm, a fim de testar sua reprodutibilidade e qualidade.

A Tabela 7 mostra essa condição, os resultados dos testes de resistência ao cisalhamento, sua média e variação.

A conclusão após a análise desta tabela é que essa condição de soldagem possui uma boa reprodutibilidade e uma elevada resistência, uma vez que obteve um valor médio de resistência ao cisalhamento de 6243,29 N , e uma varição de apenas 2,7%. Na Figura 23 está apresentado o resultado destes quatro testes de cisalhamento, ela tem como objetivo apenas confirmar a boa reprodutibilidade desta combinação de parâmetros.

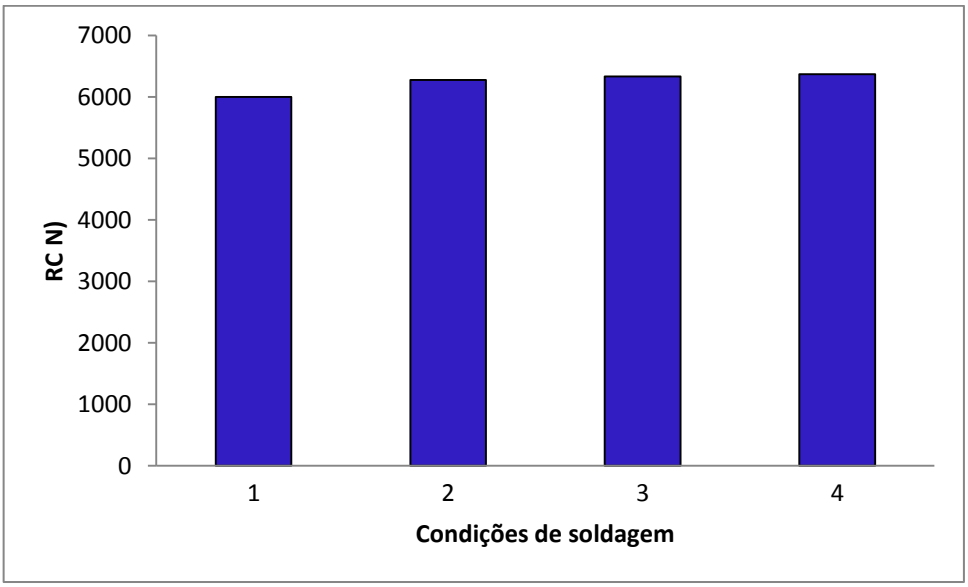
Tabela 7. Teste da condição otimizada.

VR (rpm)	VP (mm/s)	PP (mm)	RC (N)				Média da RC (N)	Variação %
			1	2	3	4*		
1300	4	1,4	5996,94	6275,4	6332,21	6368,62	6243,29	2,7

*teste realizado durante a análise do Box-Behnken

FONTE: Autora.

Figura 23. Condições otimizadas x RC (N).



FONTE: Autora.

4.2 ANOVA

Para se confirmar a influência relativa de cada fator na variação dos resultados e sua significância nas juntas soldadas de FSpW, foi feita a análise da variância (ANOVA), a qual foi calculada com a ajuda do software Minitab.

A Tabela 8 mostra os resultados da ANOVA para a carga de cisalhamento. O número de graus de liberdade (GL) para cada parâmetro e interação é dado pelo número de níveis avaliados pelo respectivo parâmetro menos um. A soma dos quadrados (SQ) é a expressão que indica a variação causada por um fator individual e sua interação. O teste *f* baseia-se na comparação entre as variâncias do modelo e do resíduo através da relação entre os respectivos quadrados médios (QM). Esse teste indica que se o valor de f é próximo à unidade, possui um efeito pouco significativo sobre a resposta. A percentagem de contribuição (P%) indica a variação total observada em um experimento atribuído para cada fator e interações significantes, e essa contribuição é função da soma dos quadrados (SQ).

As conclusões que podem ser retiradas da Tabela 8 é que os valores mais elevados de P% foram encontrados em VR, PP, VR*PP e VP*PP, indicando serem os fatores que afetam mais na resistência da junta, sendo confirmado pelos valores de f superiores a um. Todos os outros valores de f são inferiores a um, indicando, assim, que não afetam de modo significativo a resistência ao cisalhamento.

A Figura 24 mostra o gráfico plotado a partir da análise da ANOVA, a fim de visualizar como os efeitos dos parâmetros de soldagem afetam na resistência na junta.

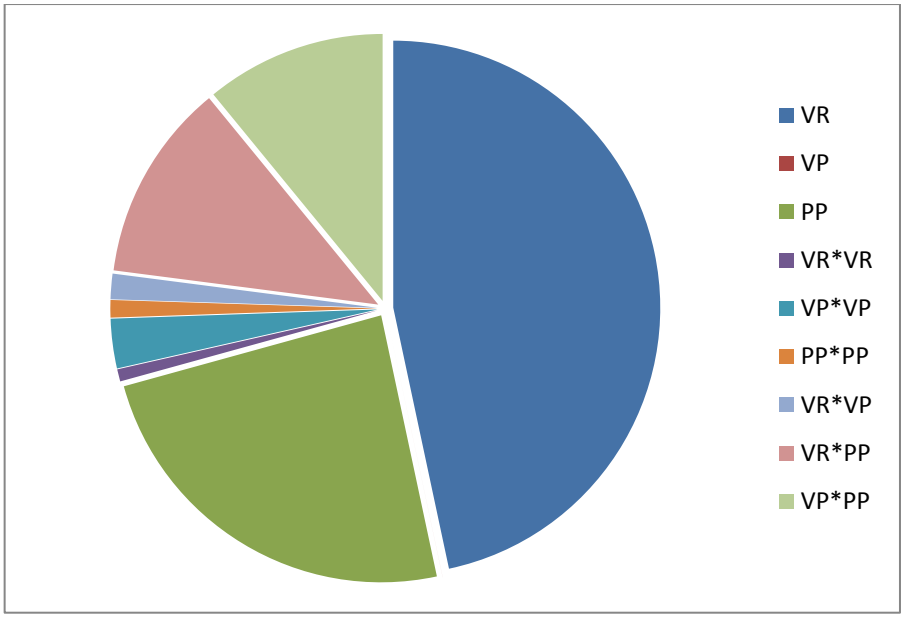
Pode-se concluir que a resistência ao cisalhamento foi afetada de modo significativo pela VR >PP >VR*PP > VP*PP.

Tabela 8. ANOVA.

FONTE	GL	SQ	QM	f	P%
Modelo	9	6289126	698792	1,95	77,8
Linear	3	4437436	1479145	4,13	54,9
VR	1	2927426	2927426	8,17	36,2
VP	1	36	36	0	0,0
PP	1	1509974	1509974	4,22	18,7
Quadrado	3	314841	104947	0,29	3,9
VR*VR	1	188176	188176	0,53	2,3
VP*VP	1	46339	46339	0,13	0,6
PP*PP	1	66326	66326	0,19	0,8
Interação 2-2	3	1536850	512283	1,43	19,0
VR*VP	1	96569	96569	0,27	1,2
VR*PP	1	754457	754457	2,11	9,3
VP*PP	1	685824	685824	1,92	8,5
Resíduo	5	1790478	358096		22,2
TIPO 1	3	1761245	587082	40,17	21,8
TIPO 2	2	29233	14617		0,4
TOTAL	14	8079604			

FONTE: Minitab.

Figura 24. Efeitos dos parâmetros de soldagem.



FONTE: Autora

4.3 Fatorial único (*One-factorial)*

Após determinado o parâmetro otimizado (1300 rpm, 1,4 mm e 4,0 mm/s), novos experimentos foram realizados a fim de avaliar o efeito de cada variável individual na resistência ao cisalhamento e de certificar que essa é combinação que irá produzir juntas mais resistentes.

Para isso foi feita uma avaliação chamada de *one factorial,* que é uma abordagem experimental tradicional. Essa avaliação foi realizada para os três fatores, variando o nível de uma variável, enquanto mantem-se as outras duas constantes.

A Tabela 9 mostra as condições de soldagem para essa avaliação e seus resultados quanto à resistência ao cisalhamento. Como pode ser visto cada condição foi testada em triplicata. Observa-se que condição 21 de soldagem não forneceu dados quanto ao RC, pois verificou-se que VR inferiores a 1300 rpm não geram calor por fricção suficientes para que haja a união das chapas.

A primeira conclusão da análise da Tabela 9 é a confirmação do parâmetro ótimo. Pois, esta condição resultou no maior valor médio da resistência ao cisalhamento, 6243,29 N.

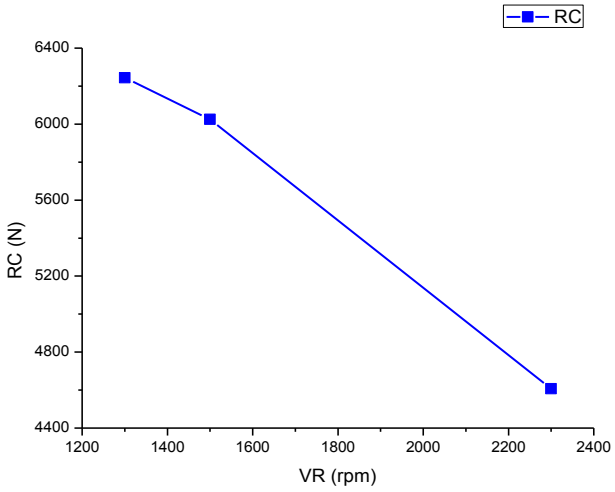
A partir da Tabela 9, foi realizado um estudo do efeito individual das variáveis do processo no desempenho mecânico das juntas soldadas. A Figura 25 apresenta as mesmas médias de resistência ao cisalhamento, comparando os níveis de cada fator com suas respectivas resistência em três gráficos distintos.

Tabela 9. Fatorial único.

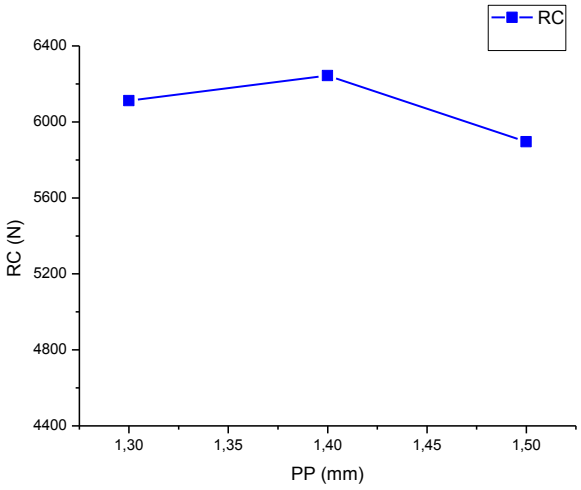
Condição de soldagem	VR (rpm)	VP (mm/s)	PP (mm)	RC (N)	Média RC (N)	Variação %
16	1300	4	1.3	6122,83 6019,76 6191,63	6111,41	1,42%
17	1300	4	1.5	5974,5 5452,2 6259,63	5895,44	6,95%
18	1300	3,5	1.4	5993,57 5589,31 6443.45	6008,78	7,11%
19	1300	4,5	1,4	6196,14 5702,12 6251,57	6049,94	5,00%
20	1500	4	1,4	6201,71 5456,92 6418,84	6025,82	8,37%
21	1100	4	1,4	-	-	-

FONTE: Autora.

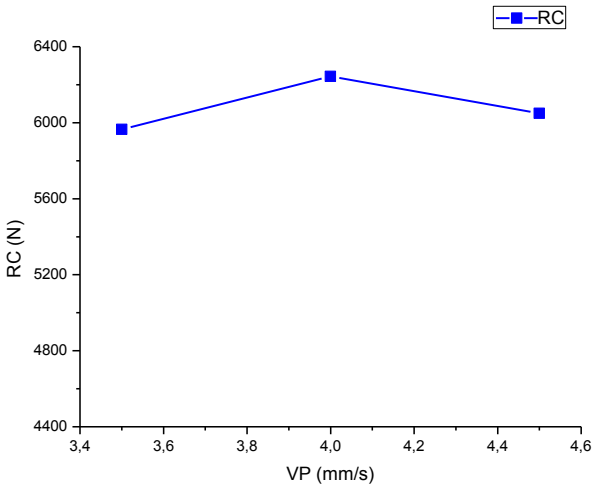
Figura 25. Efeito individual das variáveis do processo na resistência mecânica da junta: a) efeito individual da VR, fixados valores de VP e PP, b) efeito individual de PP, fixados valores de VR e VP e c) efeito individual da VP, fixados valores de VR e PP.



(a)



(b)



(c)

FONTE: Autora.

A Figura 25 (a) mostra o efeito individual da velocidade de rotação (VR) da ferramenta. Como pode ser observado o aumento da VR de 1300 a 1500 rpm levou a uma diminuição na resistência ao cisalhamento médio de cerca de 215 N. Continuando o aumento da VR de 1500 rpm a 2300 rpm nota uma queda acentuada na resistência, de cerca de 1,5 kN. Segundo *North et al., (2006)* o aporte térmico possui uma relação direta com a resistência da junta, isto é, uma quantidade maior de calor gerada por fricção resultaria em juntas com melhores desempenhos mecânicos. No entanto, ele também mostrou que um fenômeno conhecido como transição deslizamento/adesão pode ocorrer caso seja usada uma VR muito alta, pois nessa situação há um escorregamento entre a ferramenta e chapa, isso leva a dinimuição da viscosidade do material plastificado, e assim, promoveria uma redução na intensidade do torque e do aporte térmico, afetando de modo prejudicial a resistência da junta. No presente estudo, como as chapas utilizadas são bastante finas e o tempo de soldagem foi muito curto, para qualquer velocidade de rotação acima de 1300 rpm ocorreu esse fenômeno, justificando a redução na sua resistência para valores de VR superiores a esse valor.

O gráfico da Figura 25 (b) mostra que o melhor nível de PP usado foi o de 1,4 mm, onde o efeito da variável é caracterizado pelo aumento na RC de aproximadamente 132 N com o uso de penetrações mais profundas até um nível específico. Entretanto, valores mais elevados do que 1,4 mm levam à redução da resistência das juntas, é observado uma redução na RC de 350 N quando a PP passa de 1,4 mm para 1,5 mm. Essa redução estaria associada à formação de cunha mais delgada. Resultado semelhante foi encontrado por *Pieta (2013),* que fez associação ao fluxo de material plastificado.

A princípio, a avaliação da Figura 25 (b) estaria contradizendo o que o gráfico da Figura 20 (b) mostrou; no entanto, é importante destacar que os gráficos da Figura 20 não foram avaliados mantendo as outras duas variáveis do processo constante, logo nestes gráficos está implícito a relação entre as interações dos parâmetros.

Finalmente, analisando o gráfico da Figura 20 (c) observa-se que um aumento na VP de 3,5 mm/s para 4,0 mm/s leva a um aumento na RC de aproximadamente 280 N, sendo seu valor máximo neste ponto de 4,0 mm/s. Uma velocidade de penetração maior que 4,0 mm/s produz juntas menos resistentes, como pode ser

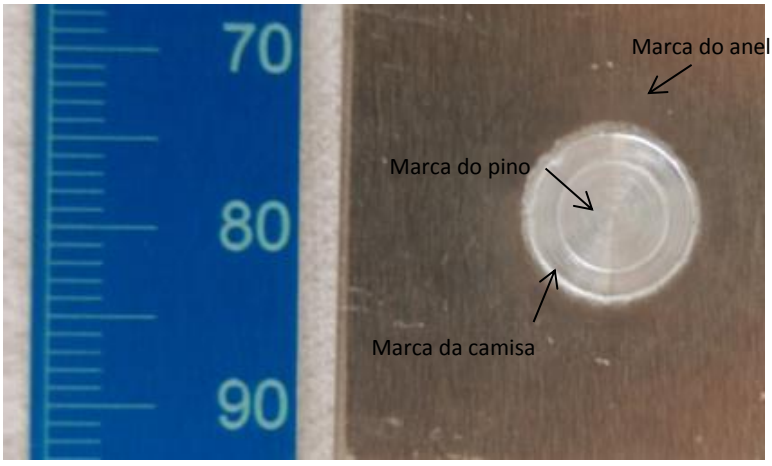
visto neste gráfico. Para *Gerlich (2005)* esses resultados não se mostram coerente com a teoria do aporte térmico, segundo está teoria, velocidade mais lentas de penetração teriam um tempo maior de soldagem, e consequentemente, um maior aporte de energia, o que resultaria em uniões mais resitentes. Entretanto, a explicação para tal resultado está na geometria da cunha, que será abordado mais adiante.

4.4 Caracterização das juntas

Visando à caracterização das juntas soldadas foram realizadas análises de: metalografias, ensaios de dureza, resistência mecânica sob solicitação de cisalhamento e descolamento e, por fim, a análise dos mecanismos de falhas.

Previamente, foi realizada uma análise superficial da junta soldada pelo processo FSpW, conforme é mostrado na Figura 26. A partir dessa imagem é possível observar que o botão da solda foi totalmente preenchido pelo material plastificado, resultando numa superfície nivelada, e assim evitando um concentrador de tensões nesta região. Outro fato que deve ser notado é a não formação de rebarba, isto indica que a força de aperto utilizada foi adequada. Também pode ser observado um bom acabamento superficial e as marcações de cada componente da ferramenta.

Figura 26. Botão da solda.



FONTE:Autora.

4.4.1 Análise metalográfica

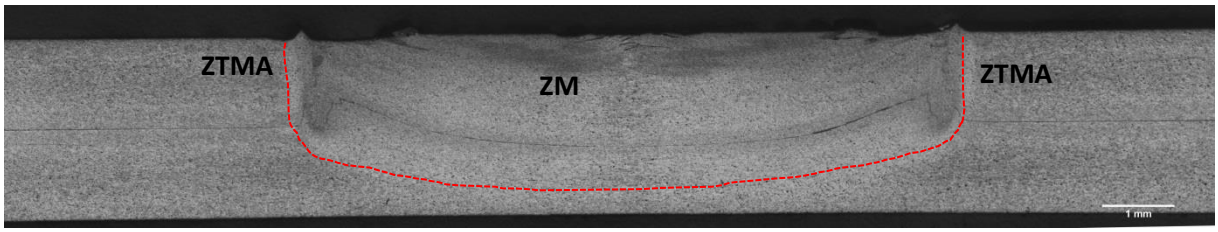
Com a finalidade de caracterizar as regiões das zonas soldadas, foram realizadas análises da microestrutura e macroestrutura das juntas através da microscopia óptica (MO).

Campanelli (2012) e Fisher (2015), em seus estudos sobre a aplicação do processo FSpW nas ligas de alumínio e magnésio, perceberam que as zonas soldadas não se modificam significativamente para os diferentes parâmetros de soldagem. Ou seja, através desta análise não é possível entender as diferenças dos desempenhos mecânicos para cada condição soldada. Para eles esta análise tem como objetivo principal observar as mudanças microestruturais dentro de cada zona de soldagem e, assim, avaliar como isso afeta nas propriedades da junta. Baseado nessas conclusões a análise macro e microestrutural neste trabalho será realizada apenas na condição otimizida.

De acordo com *Shen et al., (2014),* em seus estudos sobre avaliação microestrutural das ligas AA6061-T4 no processo FSpW, mostrou que juntas livres de defeitos de falta de preenchimento e falta de mistura são conseguidos devido a boa plasticidade desta liga.

A partir da Figura 27 nota-se o completo preenchimento do botão da solda, e que a mesa é livres de defeitos comuns em outros tipos de soldas de liga de alumínio. É possível também observar desta macrografia da seção transversal da junta soldada pelo processo FSpW da liga AA6061-T6 a distinção de duas zonas: Zona de Mistura (ZM), que é a região mais ao centro; e outra Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA), que circunda a ZM. A Zona Termicamente Afetada (ZTA) e o Metal Base (MB) não consegue ser visualizado nesta macrografia. .

Figura 27. Macrografica da seção transversal da união da liga AA6061-T6 soldada pelo processo FSpW.

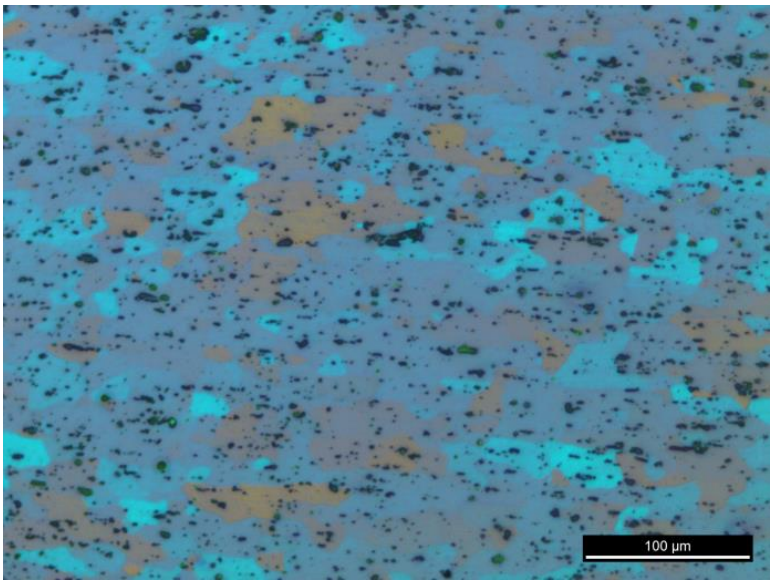


FONTE: Autora.

Os detalhes microestruturais de cada zona específica, da condição otimizada, são mostrados nas micrografias a seguir.

A Figura 28 mostra a micrografia do Metal Base. O MB conserva as características metalúrgicas do material original. Através da analise microestrutural não se consegue fazer a distinção entra a ZTA e o MB, visto que a ZTA não sofre nenhuma deformação plástica, apenas experimenta um ciclo térmico, resultando em grãos semelhantes ao MB.

Figura 28. Micrografia óptica do MB da liga AA6061-T6.



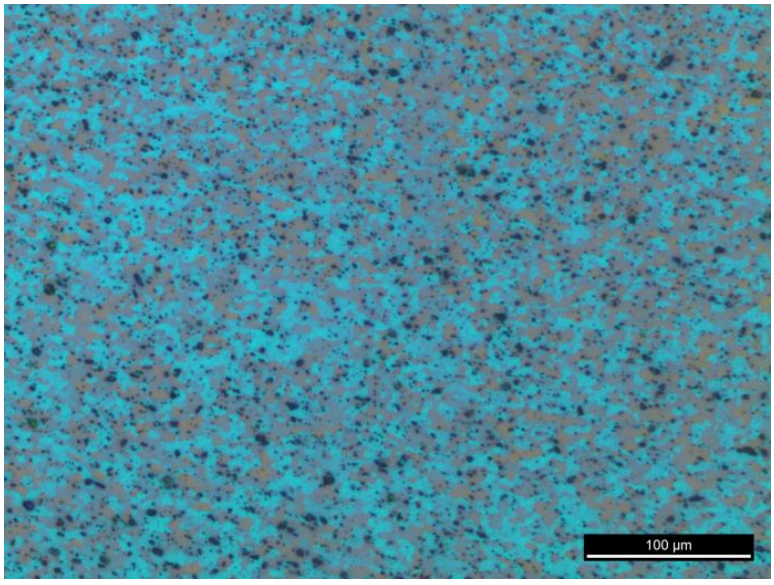
FONTE: Autora.

Suhuddin et al., (2013) analisaram a microestrutura da união soldada por FspW de materiais dissimilares e observaram que a região central do botão da solda foi a região que mais sofreu deformação plástica, devido ao contato direto e

mergulho da ferramenta nesta região. Resultando em uma região com grãos bastante finos e recristalizados dinamicamente.

A Figura 29 mostra a micrografica da ZM da liga AA6061-T6 soldada por FSpW. A partir desta imagem foi possível observar uma região formada por pequenos grãos, bastante deformados plasticamente, que é foi causado devido a rotação e penetração da ferramenta nesta área. Nesta região a temperatura antige os valores mais elavados, 80% da temperatura de fusão, como será mostrado na análise de medição de temperatura; e isso leva a recristalização dinâmica do material, conforme observado por *Suhuddin et al., (2013).*

Figura 29. Micrografias ópticas da ZM de solda da liga AA6061-T6.



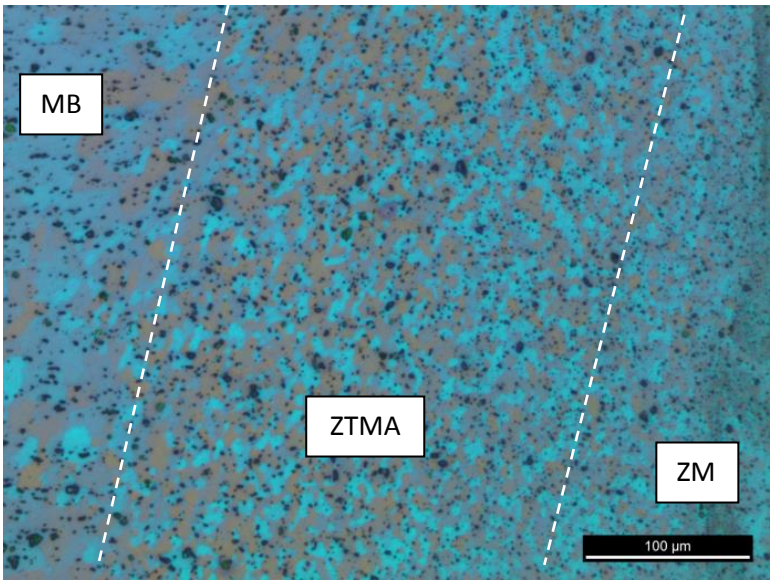
FONTE: Autora.

Por último, a Figura 30 mostra a região da ZTMA, que é a região de transição entre o metal original e a zona recristalizada. Pode ser observada a partir desta imagem que esta região se mostrou bastante pequena, como ficou evidenciado nas medições de dureza que será mostrada adiante. Essa região é formada por grãos deformados e alongados na direção da rotação da ferramenta.

Resultados semelhantes foram encontrados por *Rosendo (2009)*, neste trabalho ele concluiu que o formatado dos grãos nesta região é causado devido a temperaturas moderadas nesta região, que causa deformação plástica, e o formato

alongado é devido ao trabalho mecânico imposto pelo movimento rotacional da camisa da ferramenta.

Figura 30. Micrografias ópticas da ZTMA de solda da liga AA6061-T6.



FONTE: Autora.

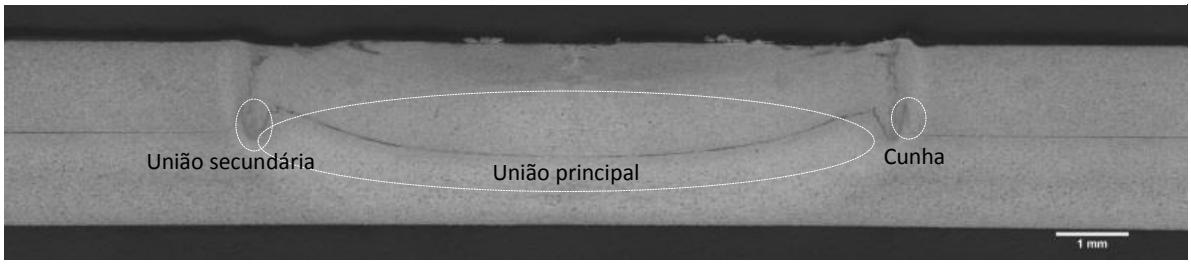
4.4.2 Elementos geométricos inerentes ao processo

Alguns elementos geométricos se mostraram inerentes ao processo de soldagem FSpW, uma vez que foram observados em todas as condições soldadas. Tais elementos são denominados de União Principal (UP), União Secundária (US) e cunha. Esses elementos geométricos possuem forte influência sobre o desempenho mecânico e o desenvolvimento da fratura da junta, por isso a importância de avalia-los em diferentes condições de soldagem (PICCOLO, 2014, ROSENDO, 2009, SHEN et al., 2014).

A Figura 31 mostra a macrografia da seção transversal de uma solda FSpW produzida na condição de soldagem 1300 rpm, 1,4 mm e 3,5 mm/s, onde é possível observar a US, UP e cunha.

A União Principal é a união entre as chapas inferior e superior; e é formada por uma forte ligação quando comparada a união secundária. A União Secundária é a região que fica entre a cunha e a união principal. E a cunha é decorrente da plastificação da chapa inferior, e, possui um formato pontiagudo *(ROSENDO, 2009).*

Figura 31. Macrografia da seção transversal de solda ponto FSpW da liga 6061-T6 mostrando os três elementos inerentes ao processo de soldagem.



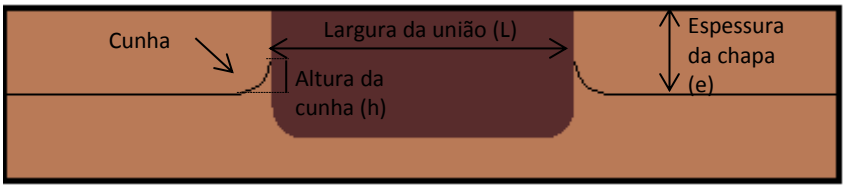
FONTE: Autora.

A cunha se forma na parte final do processo, quando a camisa desce empurrando o material plastificado para a sua posição inicial. E esta é a fase responsável também pela formação na união secundária. No início do processo, quando o pino mergulha nas chapas observa-se a formação da união principal *(ROSENDO, 2009).*

As extremidades curvadas e pontiagudas da cunha são decorrentes do fluxo de material plastificado, que ocorre quando a porção em contato com a superfície interna do pino é descolada para cima em função do movimento de retração do mesmo, que é formada mais precisamente pelo dobramento e pela desintegração parcial da extremidade da interface entre as chapas sobrepostas *(ROSENDO, 2009; SHEN et al., 2014).*

Uma análise mais detalhada da cunha se faz necessária, pois se observa uma forte relação entre as suas características morfológicas e as propriedades mecânicas das juntas. Outro fator importante é que a cunha atua como um concentrador de tensões, especialmente nos casos em que a extremidade da face sem união torna-se muito pronunciada verticalmente, sendo um caminho para a nucleação e propagação das trincas. Para realizar essa análise é necessário medir o tamanho de cada cunha em diferentes estágios de soldagem, e essa quantificação do deslocamento vertical é feita através da relação **h/e**, onde **h** é altura da porção sem união até a união principal, enquanto que ***e*** é a espessura da chapa (a Figura 32 ilustra esse esquema). Nesta figura também se observa a medida da largura da união, pois esse é outro elemento que exerce influência sobre a resistência da solda (*CAMPANELLI, 2012).*

Figura 32. Esquema de medição da altura e largura de união.



FONTE: Adaptado Campanelli, 2012.

Na Tabela 10 é apresentado as diferentes condições de soldagem em que a cunha e a largura da união foram avaliadas (mesmas condições avaliadas para a análise do *one-factorial*). Observa-se a partir desta tabela que o aumento de profundidade de penetração de 1,4 mm para 1,5 mm leva a maior queda de RC, aproximadamente 350 N, e isso está diretamente ligado a morfologia da cunha. Essa afirmação é confirmada pela condição 17 de soldagem, onde se tem uma cunha bastante pronunciada verticalmente. Outra queda significativa de resistência ocorre quando a velocidade de penetração é reduzida de 4,0 mm/s para 3,5 mm/s, e a explicação para isso também está na formação de cunhas maiores e cordão de soldas menores.

Tabela 10. Condições de soldagem avaliadas para as medições da cunha e da união principal.

Condição de soldagem	VR (rpm)	VP (mm/sec)	PP (mm)	Média da RC (N)	Altura da cunha lado esquerdo (mm)	Altura da cunha lado direito (mm)	Largura da união (mm)
1*	1300	4	1.4	6243.29	0,06774	0,12618	9,21
16	1300	4	1.3	6111.41	0,12134	0,10965	9,23977
17	1300	4	1.5	5895.44	0,28531	0,32345	9,114
18	1300	3.5	1.4	6008.78	0,30114	0,4375	9,12998
19	1300	4.5	1.4	6049.94	0,16239	0,20228	9,08781
20	1500	4	1.4	6025.82	0,24719	0,32865	8,99825

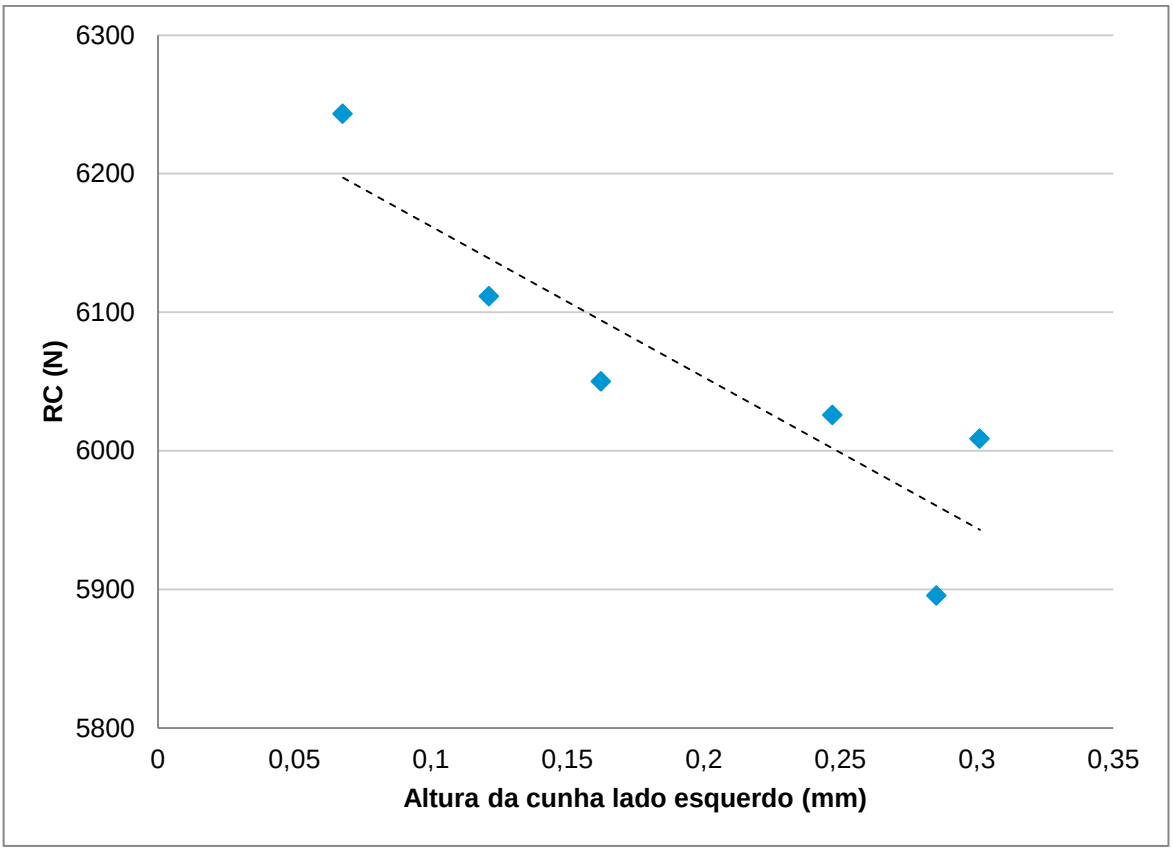
*condição otimizada.

FONTE: Autora.

As Figuras 33 e 34 facilitam o entendimento sobre como a morfologia da cunha afeta na resistência ao cisalhamento da junta soldada por FSpW.

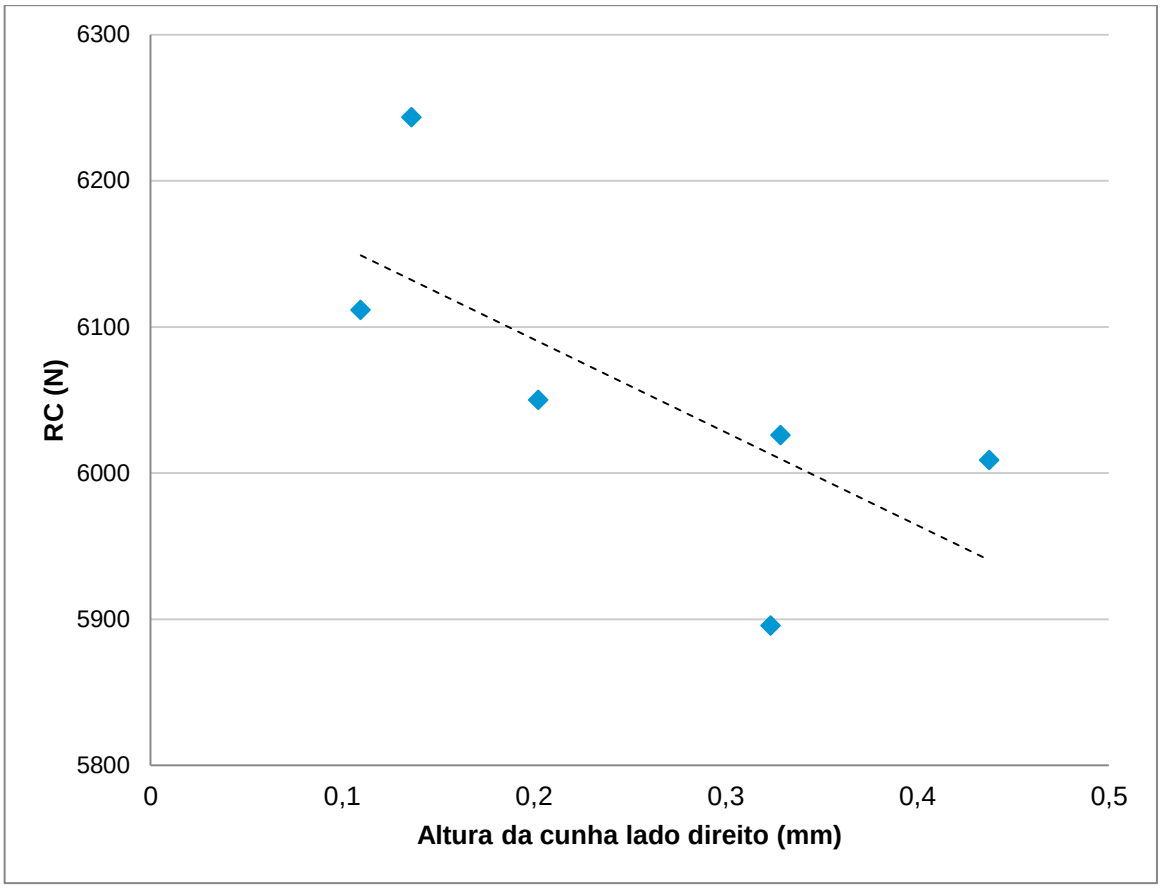
A primeira análise extraída desses gráficos é que a linha de tendência para ambos tendem a aumentar o valor da resistência ao cisalhamento quando o resultado final da união são cunhas que possuem um pronunciamento vertical menor. Estes resultados estão de acordo com o que foi analisado por *Shen et al.,(2014),* que em seus experimentos ele observa que uniões mais resistentes foram conseguidas para as situações em que cunha possuía um valor pequeno, pois nessa situação a nucleação e propagação da trinca não tiveram inicio na cunha.

Figura 33. Tamanho da cunha do lado esquerdo x RC.



FONTE: Autora.

Figura 34. Tamanho da cunha do lado direito x RC.

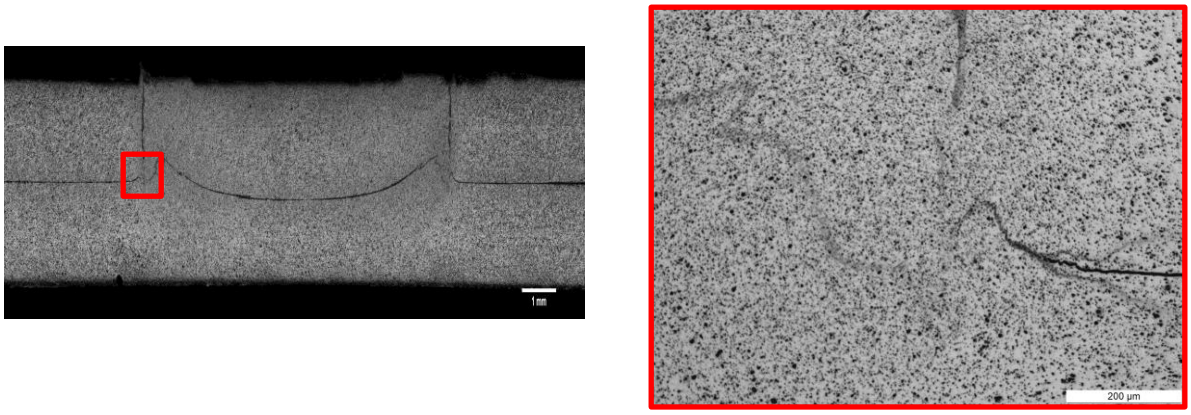


FONTE: Autora.

Rosendo (2009) afirmou, após a realização dos seus experimentos, que cunha muda de acordo com as combinações de parâmetros; e o mesmo traz pontos negativos ao botão da solda. A fim de confirmar essa constatação obtida por *Rosendo (2009)*, e de certificar sobre a discussão a cima, foram feitas MO das regiões de duas condições de soldagem.

A macrografia e a micrografia da Figura 35 mostram a condição 1* de soldagem (1300 rpm, 1,4 mm e 4,0 mm/s) indicada na Tabela 10. Essa condição obteve os melhores valores para a resistência ao cisalhamento médio, 6243,29 N e observa-se na micrografia que o pronunciamento da cunha é bastante reduzido.

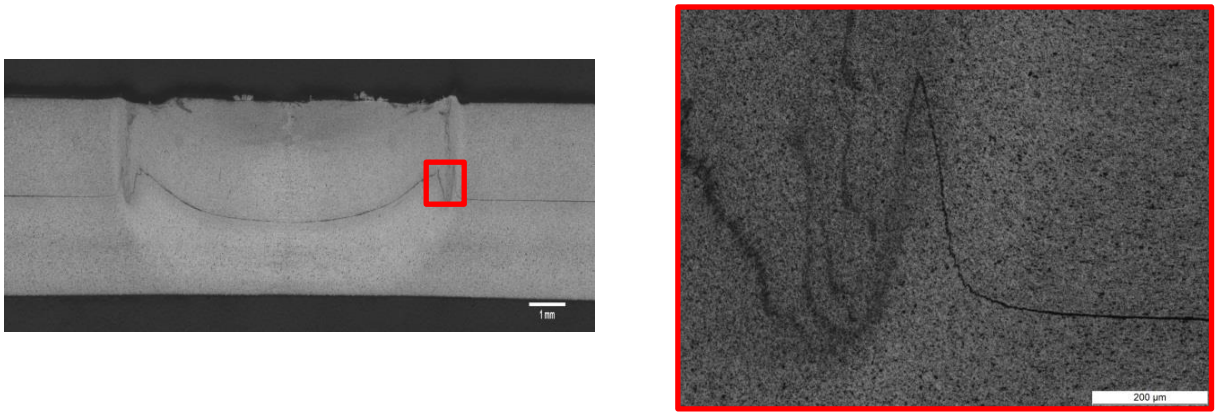
Figura 35. Detalhe da cunha formada pelo processo FSpW na condição 1300 rpm, 1,4 mm e 4 mm/s.



FONTE: Autora.

A Figura 36 ilustra a condição 18 de soldagem (1300 rpm, 1,4 mm e 3,5 mm/s), onde mostra um tamanho de cunha muito maior que a condição 1, e consequentemente um valor a resistência ao cisalhamento menor, 6008,78 N.

Figura 36. Detalhe da cunha formada pelo processo FSpW na condição 1300 rpm, 1,4 mm e 3,5 mm/s.



FONTE: Autora.

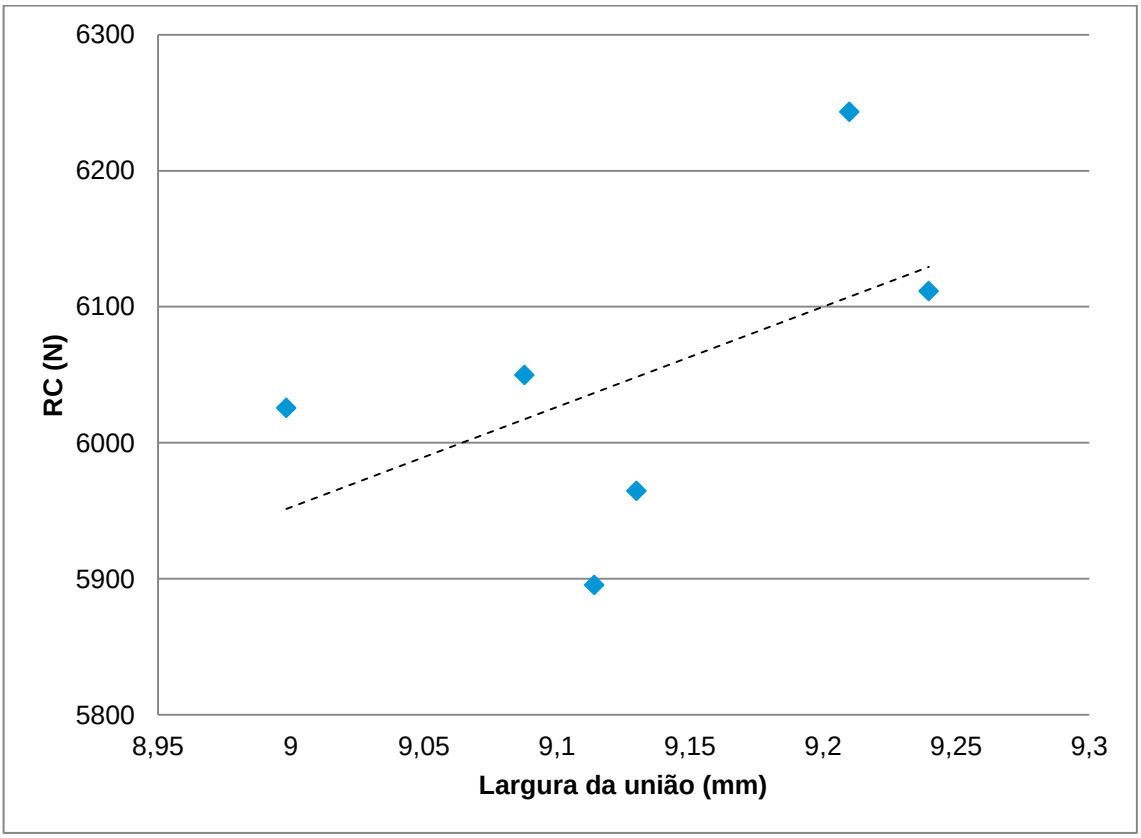
A partir das análises das Figuras 35 e 36 pode-se concluir o quanto à cunha afeta no desenvolvimento da falha sob solicitação de cisalhamento. *Rosendo (2009) e Campanelli (2012)* mostraram que cunhas mais pronunciadas verticalmente são

um ponto fácil para nucleação e propagação da trinca que levará a uma falha em níveis mais baixos de carregamento, isso foi confirmado durante este trabalho.

Ainda segundo da Tabela 10 pode ser analisado quanto à área da união afeta na resistência ao cisalhamento. A Figura 37 tem como objetivo facilitar esse entendimento. Apesar de uma dispersão maior, quando comparada ao tamanho da cunha, a reta de tendência indica que quanto maior o cordão da união principal, maior será a resistência da junta.

Este resultado está de acordo com o que foi estudo por Campanelli (2012) e *Piccolo (2014)* que nos seus experimentos observaram que o aumento da zona da união, e consequentemente da seção resistência efetiva levou ao aumento da carga necessária para provocar a falha.

Figura 37. Relação entre o tamanho da união x RC.



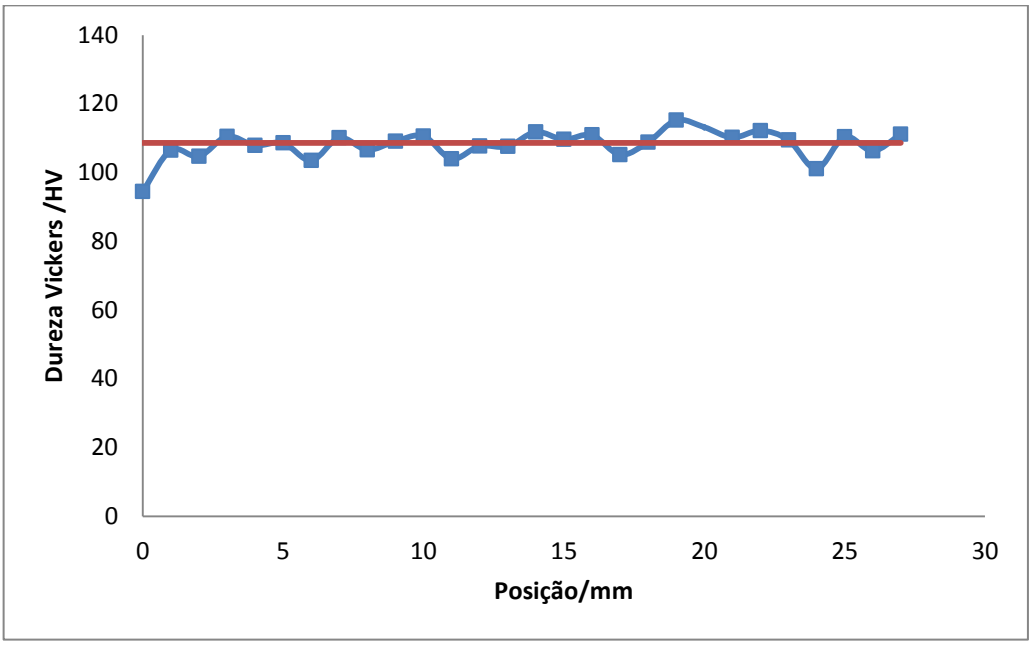
FONTE: Autora.

4.5 Microdureza

As medições de microdureza foram realizadas a meia altura da chapa superior, com o objetivo de analisar o perfil de dureza ao longo do botão da solda, e a fim de melhorar o entendimento a respeito das zonas da solda.

Como citado anteriormente à liga usada neste trabalho foi à liga AA6061-T6. Essa liga possui uma dureza média de 110 $HV_{0,5}$, conforme pode ser visto na Figura 38.

Figura 38. Dureza da liga AA6061-T6.



FONTE: Autora.

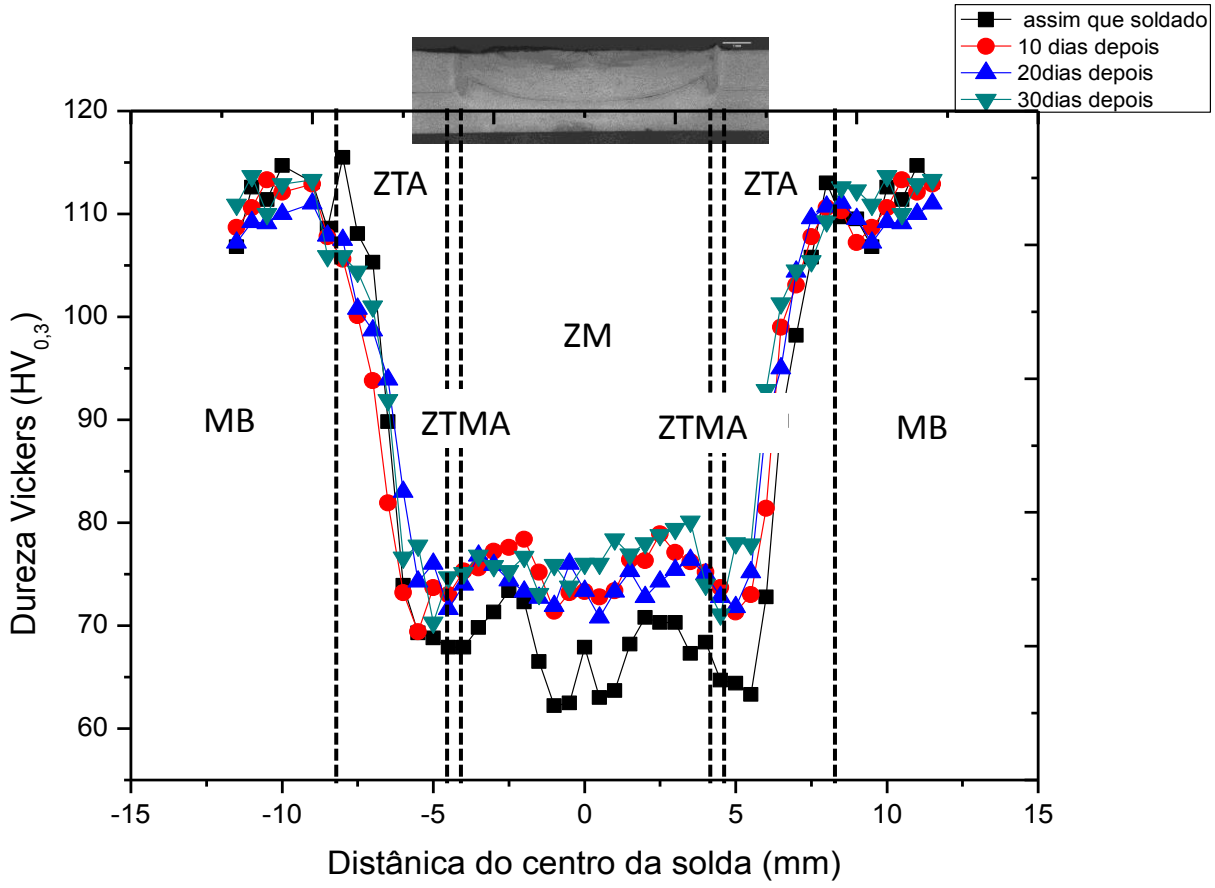
Por essa ser uma liga envelhecida termicamente, foram feitas medidas do perfil de dureza em períodos diferentes: assim que soldada, 10 dias após soldada, 20 dias após soldada e 30 dias após soldada, para saber onde a mesma se estabiliza.

De acordo com *Piccolo (2014) e Shen et al., (2014),* os perfis de dureza das ligas de alumínio não se alteram significativamente segundo a combinação de parâmetros; em geral, eles mantêm o mesmo formato para as diferentes combinações analisadas. Baseado nesses resultados, foi realizado o perfil de dureza apenas na condição otimizada.

A Figura 39 ilustra o perfil de dureza nesta condição. Nesta figura, nota-se também uma macrografia do botão da solda, o qual tem por objetivo facilitar a

visualização da localização relativa do perfil de dureza, e também das regiões da solda.

Figura 39. Perfil de microdureza das soldas produzidas por FSpW.



FONTE: Autora.

A partir deste perfil nota-se a existência de uma Zona Termicamente Afetada (ZTA), que não pode ser vista na análise microestrutural. Essa analise também mostrou que o perfil exibe uma aparência de *W* em todas as situações, e a que após dez dias a solda já não sofre mais sobre o efeito do envelhecimento. Pode-se também observar que o processo de soldagem exerce influência sobre a microestrutura até uma distância de cerca de 8 mm em relação ao centro do botão da solda.

A Figura 39 mostra que na região da solda há uma queda da dureza, quando comparada com o metal base. Isso acontece, pois essa é uma liga endurecível por

precipitação, logo o processo de soldagem afeta os agentes endurecedores desta liga. Acredita-se que nesta região houve uma desestabilização do tratamento térmico T6, isto é, houve solubilização do Mg_2Si durante a soldagem, isto faz com que a resistência sofra uma redução *(OLEA, 2008).*

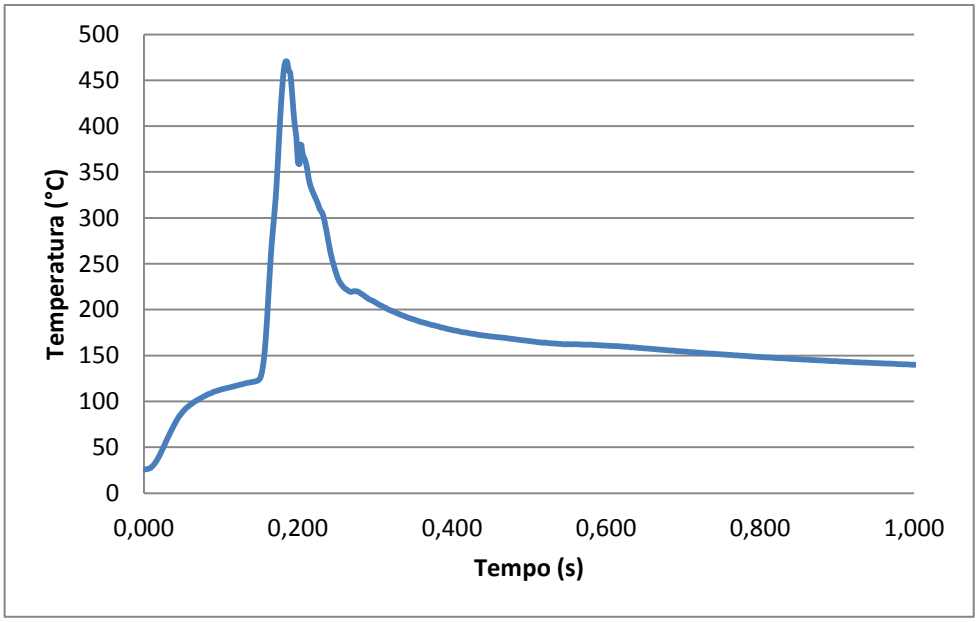
O perfil mostra que o maior decréscimo de dureza se dá na região ZTA, havendo uma queda de aproximadamente 110 HV no Metal Base até 75 HV nas proximidades da ZTMA. Essa queda na ZTA é explicada pelo fato de haver coalescimento das partículas endurecedoras que se encontram na matriz *(Olea, 2008)*. O valor de dureza mínima é, encontrado na ZTMA, de aproximadamente 72 HV. Em seguida nota-se um pequeno aumento na ZM, que é explicado pelo fato de nessa região haver intensa deformação plástica e altas temperaturas que fazem com que a microestrutura sofra recristalização dinâmica, reduzindo e refinando bastante os grãos, o que leva um aumento da dureza nesta região *(Olea, 2008).*

Estes resultados comprovam que a resistência do material varia ao longo da região soldada.

4.6 Medição de temperatura

A Figura 40 mostra o perfil de temperatura no centro da solda, na região do pino. Observa-se que a temperatura máxima atinge um valor de 470,5 °C. O ponto de fusão da liga AA6061-T6 é de aproximadamente 580 °C. Logo, conclui-se que o material não sofreu fusão, apenas deformações plásticas e recristalização devido à temperatura ter atingido cerca de 80% da temperatura de fusão. Percebe-se ainda, que a temperatura sobe drasticamente logo no primeiro estágio, que é quando há a penetração do pino, e logo após atingir o pico máximo a temperatura começa a decair. Esse decaimento de temperatura se inicia quando o material plastificado começa a ser empurrado para dentro do furo deixado quando o pino penetra no material. Isso se explica, pois neste momento o material já está plastificado, logo, não exige que a ferramenta gere mais calor por fricção, consequentemente a temperatura começa a diminuir e essa região se esfria.

Figura 40. Medição de temperatura no centro da solda.



FONTE: Autora.

4.7 Fratura no Cisalhamento

Conforme descrito anteriormente, para os ensaios de cisalhamento as amostras foram soldadas em juntas sobrepostas e só então testadas. As análises das fraturas foram feitas através de uma pequena ampliação, utilizando uma lente de aumento, que tinha por finalidade caracterizar os modos e mecanismos de falhas. Para a avaliação da melhor condição de soldagem, foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

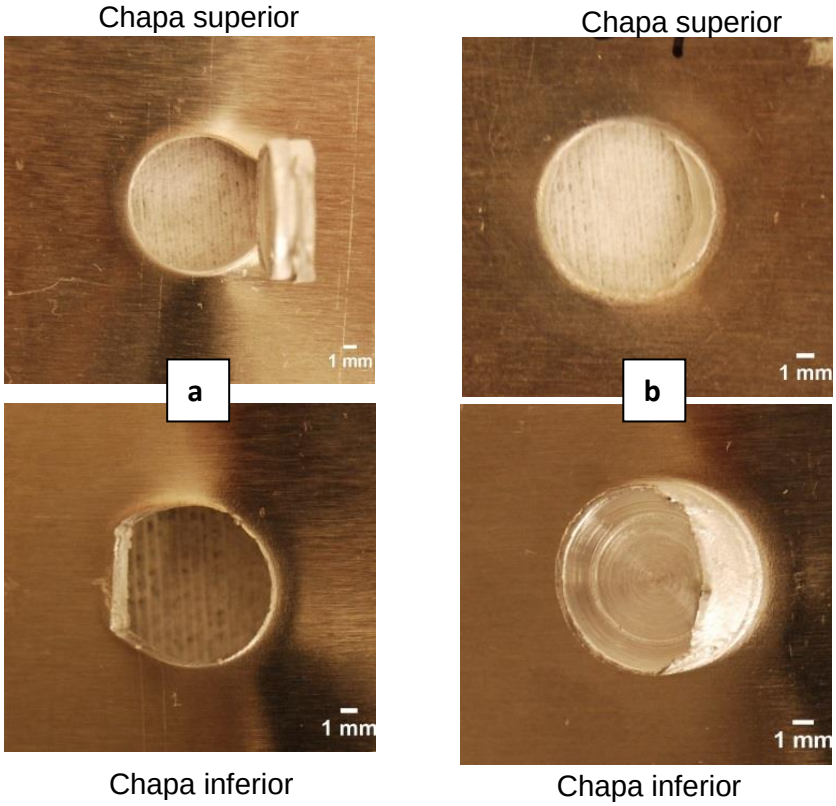
Os ensaios de cisalhamento resultaram em dois tipos de falhas distintos, apresentados na Figura 41: a) arrancamento circunferencial (AC) e b) arrancamento total (AT).

A Tabela 11 mostra as condições de soldagem com seus respectivos resultados de RC e o tipo de falha para cada situação. A partir dele, observa-se que o tipo de fratura que mais se repetiu foi o arrancamento circunferencial, cerca de 80% dos casos testados. No entanto, as juntas mais resistentes ao cisalhamento ocorreu no tipo de falha AT.

A falha tipo arrancamento circunferencial é caracterizada pela fratura no entorno do botão de solda na chapa superior, de modo que o botão fica aderido à chapa inferior ao final da fratura.

Já o modo de falha tipo arrancamento total é o tipo de fratura onde o botão da solda é totalmente arrancado das chapas, ou fica aderido apenas por uma porção desprezível de material, ou seja, neste caso a fratura consiste no entorno do botão da solda em ambas as chapas.

Figura 41. Modos de falhas observados nos ensaios de cisalhamento: a) AT, b) AC.



FONTE: Autora.

Rosendo et al., (2009) observaram, em seus experimentos, tipos de falhas semelhantes ao encontrado neste trabalho. Eles notaram que esses modos de falha possuem dois aspectos em comum: trinca anular (TA) e trinca circunferencial (TC) que levam a falha. Os desenvolvimentos destas trincas definem o tipo de falha da junta. Entretanto, no presente estudo não foi realizada uma análise detalhada destas trincas, sendo, portanto, usado o trabalho de Rosendo (2009) para o entendimento do desenvolvimento de cada trinca.

Ainda segundo *Rosendo et al., (2009)*, mostrou-se que a TA se inicia através do rasgamento da união secundária, por ser uma região de ligação não muito forte, tende a haver um descolamento quando uma carga é aplicada. Enquanto que a TC se forma no entorno do botão da solda e se propaga contornando o botão da solda, nesse caso a nucleação da trinca ocorre a partir da cunha, que atua como concentrador de tensões.

Conforme mencionado, a falha por arrancamento total é preferível, pois possuiu os valores mais altos de resistência ao cisalhamento, como mostrado na Tabela 11. Os corpos de provas para esse tipo de fratura apresentam um elevado grau de absorção de energia antes da fratura, pois se tem uma fratura tipo dúctil.
Para avaliação dos micromecanismos associados à fratura por arrancamento total foi realizado Microscopia Eletrônica por Varredura. As imagens de MEV são mostradas na Figura 42.

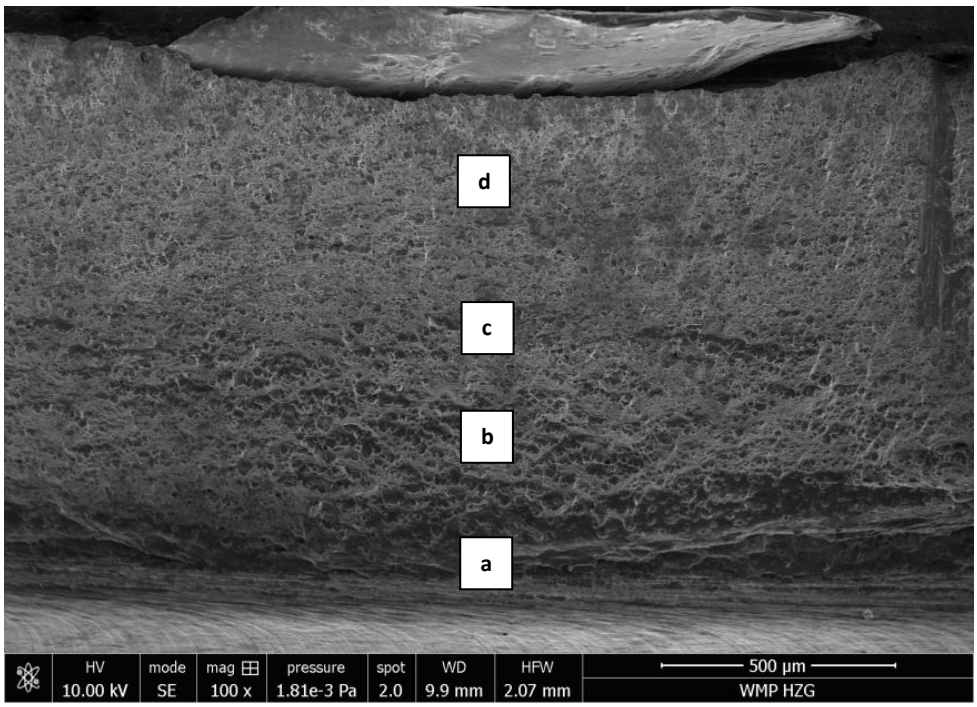
A região da Figura 42 (a) corresponde à localização da cunha, pois é uma região que apresenta estrias. Nesta região há a propagação da trinca que levará a fratura da união.

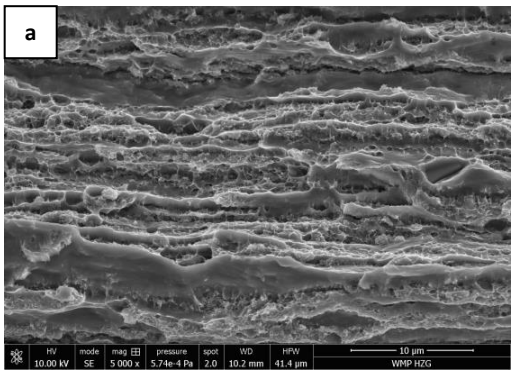
A análise das regiões da Figura 42 (b), (c) e (d) mostram que essa fratura exibiu uma morfologia de fratura dúctil, pois toda essa região é caracterizada pela presença de alvéolos, que são microcavidades tipicamente encontradas para este tipo de fratura.

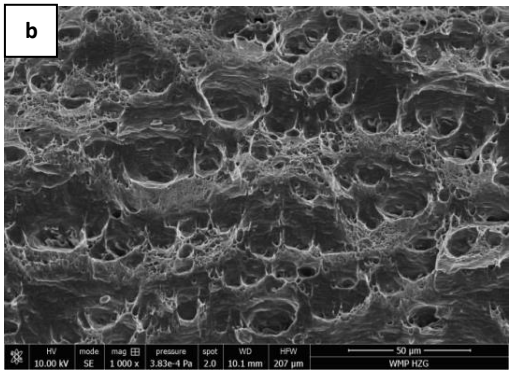
Tabela 11. Modo de falha para cada condição soldada.

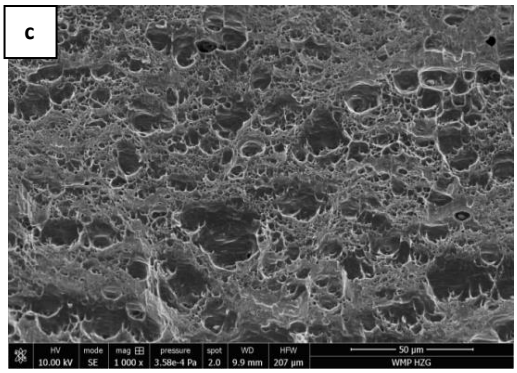
	Condições de soldagem	VR (rpm)	PP (mm)	VR (mm/s)	RC (N)	Modo de Falha
DoE	1	1800	1.2	4	4279,11	AC
	2	1800	1.4	3.5	4921,21	AC
	3	1800	1.2	3	5598,45	AC
	4	1300	1.4	3	5575,1	AC
	5	1800	1.6	4	5003,67	AC
	6	2300	1.2	3.5	5767,37	AC
	7	1300	1.2	3.5	5868,27	AC
	8	1300	1.4	4	6368,62	AT
	9	2300	1.4	3	4435,67	AC
	10	2300	1.4	4	4607,68	AC
	11	1800	1.4	3.5	4782,44	AC
	12	1300	1.6	3.5	5102,65	AC
	13	2300	1.6	3.5	3264,56	AC
	14	1800	1.4	3.5	5023,31	AC
	15	1800	1.6	3	4666,72	AC
Triplicada do melhor parâmetro	16	1300	1.4	4	5996,94	AC
	17				6275,4	AT
	18				6332,21	AT
One-Factorial	19	1300	4	1.3	6122,83	AT
	20				6019,76	AC
	21				6191,93	AC
	22	1300	4	1.5	5974,5	AC
	23				5452,2	AC
	24				6259,63	AC
	25	1300	3,5	1,4	5993,57	AC
	26				5589,31	AC
	27				6443.45	AT
	28				6196,14	AT
	29	1300	4.5	1.4	5702,12	AC
	30				6251,57	AC
	31	1500	4	1,4	6201,71	AC
	32				5456,92	AC
	33				6418,84	AT

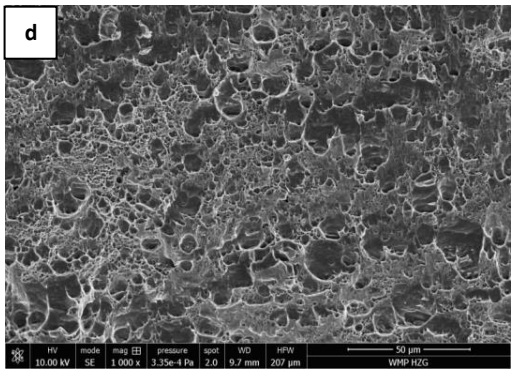
Figura 42. MEV da amostra do modo de falha arrancamento total.











FONTE: Autora.

4.8 Teste de descolamento

A resistência mecânica das juntas soldadas também foi realizada através do teste de descolamento. Foram ensaiados dois corpos de provas para cada condição, como mostra a Tabela 12. As condições avaliadas foram às mesmas condições da análise do *one-factorial* para o cisalhamento, para que pudesse fazer a relação entre os testes.

Esse ensaio não traz informações relevantes em termos de projeto, já que esses tipos de uniões são normalmente projetadas para suportar solicitações de cisalhamento. Contundo pode-se avaliar o seu desempenho sob uma condição mais severa. Devido à severidade deste tipo de carregamento, a resistência mecânica foi menor que quando comparada aos valores encontrados no teste de cisalhamento.

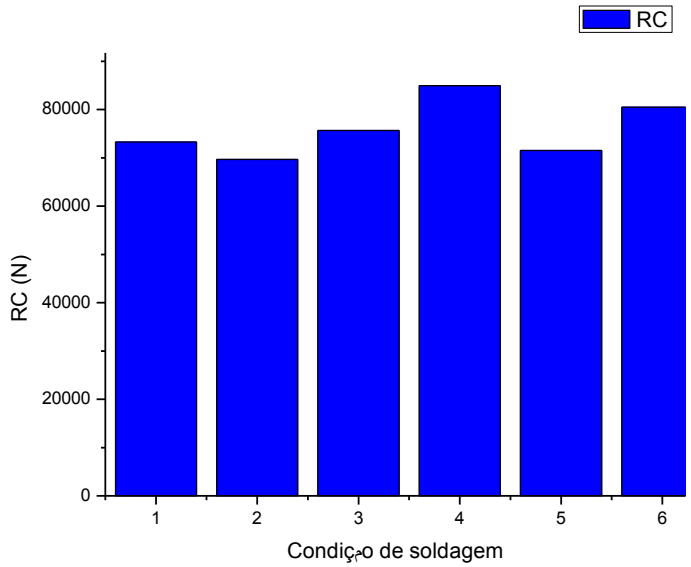
Tabela 12. Solicitação de descolamento.

Condição	VR (rpm)	VP (mm/s)	PP (mm)	Teste de descolamento (N)	Média do teste de descolamento (N)	STDV%
1	1300	4	1.4	714.44	732.42	3.47
	1300	4	1.4	750.4		
2	1300	4	1.3	688.31	696.68	1.70
	1300	4	1.3	705.06		
3	1300	4	1.5	659.99	756.44	18.03
	1300	4	1.5	852.89		
4	1300	3.5	1.4	879.05	849.32	4.95
	1300	3.5	1.4	819.59		
5	1300	4.5	1.4	621.24	715.01	18.54
	1300	4.5	1.4	808.77		
6	1500	4	1.4	833.77	804.64	5.12
	1500	4	1.4	775.51		

FONTE: Autora.

A fim de facilitar o entendimento da Tabela 12, a Figura 43 mostra os resultados da resistência mecânica sob os ensaios de descolamento nas diferentes condições de soldagem.

Figura 43. Avaliação do teste de descolamento.



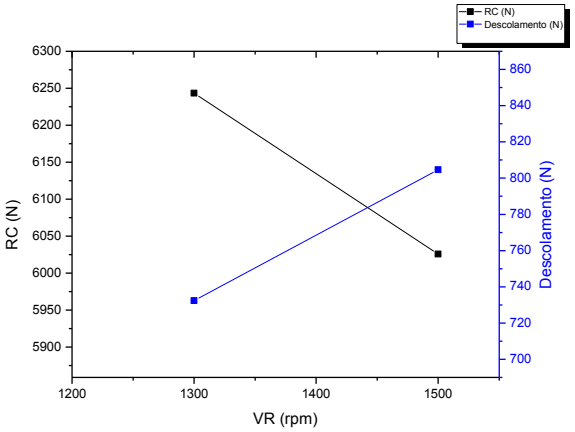
FONTE: Autora.

A partir desta análise observa-se que a melhor condição para esse teste foi a condição de soldagem 4 (1300 rpm, 1,4mm e 3,5 mm/s), pois obteve o maior valor médio de resistência, 849,32 N. Percebe-se que esta condição é diferente da condição ótima para o teste de cisalhamento.

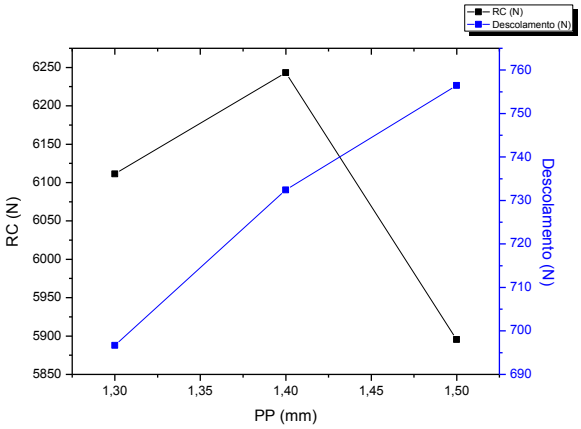
Visando buscar entender o comportamento dos parâmetros de soldagem para este teste, foi feita uma analise entre como cada variável individual do processo afeta a resistência ao cisalhamento e ao descolamento. A Figura 44 mostra os gráficos para cada uma dessa situação.

A partir destes gráficos verifica-se que o ensaio de teste de descolamento mostrou disparidade quando comparado ao de cisalhamento. Por esse ser um teste que ainda não possui resultados experimentais para soldas FSpW, não tem como se basear em outros estudos. Portanto, para o presente estudo esse teste se mostrou inconclusivo, uma vez se esperava resultados de variações semelhantes ao do cisalhamento.

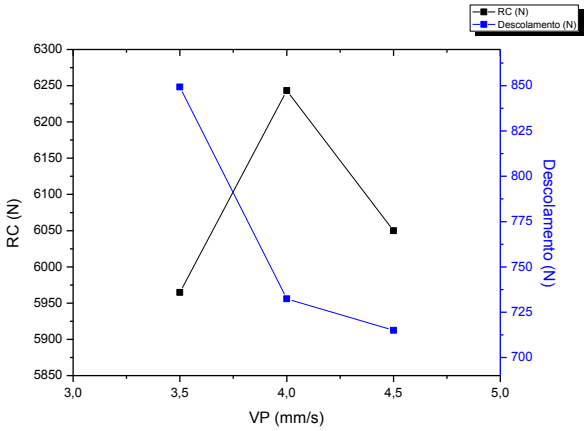
Figura 44. Efeito individual das variáveis do processo na resistência mecânica da junta sob solicitação cisalhante e de descolamento: a) efeito individual da VR, fixados valores de VP e PP, b) efeito individual de PP, fixados valores de VR e VP e c) efeito individual da VP, fixados valores de VR e PP.



(a)



(b)



(c)

FONTE: Autora.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram investigadas juntas sobrepostas de liga de alumínio, 6061-T6, produzidas através do processo FSpW. Diferentes combinações de parâmetros de processo (velocidade de rotação, velocidade de penetração e profundidade de penetração) foram analisadas e caracterizadas mecânica e metalurgicamente.

Os resultados obtidos revelam-se satisfatórios.

As principais conclusões são descritas a seguir:

- O maior valor médio de resistência ao cisalhamento encontrado foi de 6243,29 N, na condição de soldagem: velocidade de rotação de 1300 rpm, velocidade de penetração do pino de 4,0 mm/s e profundidade de penetração do pino de 1,4 mm. Esta condição mostrou possuir boa reprodutibilidade e qualidade, uma vez que sua variação foi de apenas 2,7 %.
- Este valor ótimo foi previsto de forma correta através método *Box-Benhken* e confirmado pela análise do *one-factorial*, isto é, tanto através de resultados teóricos como experimentais.
- A velocidade de rotação foi o parâmetro que mais influenciou o resultado da resistência ao cisalhamento, seguida da profundidade de penetração. A velocidade de penetração não teve uma influência significativa.
- A caracterização microestrutural da junta mostrou ausência de defeitos e um aspecto homogêneo. Quanto à zona de solda foram observadas as zonas: ZM e ZTMA e MB. A terceira zona, chamada de ZTA, só foi identificada no teste de microdureza.
- O perfil de microdureza apresentou um formato de *W*. A maior dureza encontrada foi no próprio MB, visto que pelo fato da liga AA6061-T6 ser uma liga tratada termicamente, há uma queda de dureza na região da solda, pois há uma desestabilização do tratamento térmico da liga nesta região.
- A junta da liga AA6061-T6 é constituída por três elementos geométricos que se mostraram inerentes ao processo: cunha, união principal e união secundária. Esse elementos possuem forte influência sobre o desempenho

mecânico e o desenvolvimento da fratura da junta e estão diretamente relacionados ao fluxo de material plastificado.

- Quanto mais pronunciada verticalmente a cunha, menor será a resistência da junta soldada, pois, a mesma atuará como um concentrador de tensões, que nucleará a trinca e levará a sua propagação quando cargas externas moderadas são aplicadas.
- Dois modos de falhas foram encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento: arrancamento total e arrancamento circunferencial. Sendo o arrancamento total o modo de falha que obteve maiores valores quando submetidos à solicitação cisalhante, este possuiu um mecanismo de falha dúctil.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme demonstrado neste trabalho, soldas de boa qualidade entre ligas de alumínio 6061-T6 podem ser produzidas através da técnica FSpW. Todavia, visando ampliar o presente estudo, faz-se necessário sugerir o desenvolvimento de trabalhos futuros, conforme sugestões a seguir:

- Aprofundamento sobre o estudo do aporte térmico;
- Medir temperaturas em diferentes posições do botão da solda;
- Estudar a evolução dos precipitados nas zonas da solda;
- Avaliação do efeito da geometria da ferramenta sobre o desempenho da solda;
- Avaliação mais detalhada sobre a propagação das trincas;
- Caracterização do desempenho mecânico sob solicitação de tração e fadiga;
- Realização de novos teste de descolamento com diferentes parâmetros de soldagem.

REFERÊNCIAS

ABAL. Anuário Estatístico 2005. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. 2006.

ALCAN, Manual de Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1a Edição, 1993.

ALCOA, disponível em: <www.alcoa.com>. Acessado em: 20.06.2016.

ALTSSHUMMER B**., "A Guide to GMA Welding of Aluminum"**, Welding Journal, volume 77, no 6, June, pp. 49-55, 1998.

AMANCIO, S.T. **Preliminary Ivestigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminum Alloy Friction Spot Welds**. Materials Transactions, v.52, p. 985-991, 2011.

ARAUL S. G., PAN T., SCHWARTZ W. **Effects of Surface Tratment (lubricants) on Spot Friction Welded joints made of 6111-T4 Aluminium Sheets.** SAE International, 2007.

ASTM D1876-08 "*Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives".*

ASTM E384-11 "*Standard test method for microindentation hardness of materials*".

BADARINARAYAN H, HUNT F., OKAMOTO K. **Study of plunge motion during Friction Stir Spot Welding – Temperature and Flow Pattern**. TMS Annual Meeting, v 9, 2007.

BROWN J., WIDENER C. BURFORD D., TWEEDY B. **Evaluation of swept Friction Stir Spot Welding through sealants and surface treatments.** Trends in Welding Research (ASM International) Pages: 211 - 219 (9), 2009

CAMPANELLI, L. **A Feasility Study on Friction Spot Welding of AZ31 Magnesium Alloy**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFSCar, 2012.

CAMPANELLI, L.C.; SUHUDDIN U.; dos SANTOS J.. **Metallurgy and mechanical performance of AZ31 magnesium alloy friction spot welds**. Journal of Materials Processing Technology. v. 213 . p 515-521, 2013.

DAWES C. J., **Weld. Met. Fabrication** 63 13–16, 1995.

DIN EN ISO 14273:2022, 2022 " Speciments Dimensions and Procesure for Shear Testing Resistence Spot, Seam and Embossed Projection Welds.

EFUNDA, disponível em: <http://www.efunda.com>. Acessado em: 02.03.2016.

EVERSOOL, disponível em: <http://www.evercool.com.tw/categories/global/pm_fsw.php>. Acessado em: 20.06.2016.

FARIA, C.S. **Friction Spot Welding of Dissimilar Al 6181-T4 alloy and Mg AZ31 alloy.** TCC Engenharia Mecânica, UFPE, 2015.

FERREIRA S., BRUNS R., MATOS G., DAVID J., **Box-Behnken Design: An Alternative For The Optimization Of Analytical Methods.** Analytica Chimica Acta 597 P. 179–186, 2007.

FIGUEIREDO, K. M. **Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFU. Uberlândia, MG. 2000.

FISHER, V.F.**Study on the feasibility of Dissimilar FSpW between AZ31 Mg alloy and 5754 Aluminum Alloy**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, 2015.

GERLICH A. et. al. **Friction Stir Spot Welding of Aluminium and Magnesium alloys.** Material Forum, vol. 29, 2005.

GERLICH A., et.al. **Mechanism of Stir Zone formation during Friction Stir Spot Welding**. Proceedings of the Friction Stir Welding Colloquium, Austria, 2006.

GERLICH A., G. AVRAMOVIC, CINGARA, T. NORTH. **Stir Zone Microstructure and Strain Rate During Al7075-T6 Friction Stir Spot Welding.** Metallurgical Transactions, v 37, 2006.

GERLICH A., P. SU, T. NORTH, **Peak Temperatures and Microstructures in Aluminum and Magnesium alloy Friction Stir Spot Welds.** Science and Technology of welding and joining, vol.10, 2005.

GERLICH, A., SU, P., NORTH, T. **Tool Penetration during Friction Stir Spot Welding of Al and MG alloys.** Journal of Materials Science, vol. 40, p.p. 6473-6481, 2005.

GREENWOOD, N.N.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the Elements**. 2nd edition. Ed. Oxford: Bultterworth-Heineman, V. p 217, 1997.

HANDBOOK OF ALUMINUM. **Alloy Production and Materials Manufacturing.** Vol. 2. George E. Totten; Scott Mackenzie, 2003.

ITAPU, S.K, MUCI-KUCHLER. K.H. **Visualization of material flow int the reffil friction stir spot welding processes.** SAE International, 2004.

KALANGARA S., K. MUCI. KUCHLER, W. ARBEGAST. **Preliminary Study of Material Flow in Friction Stir Spot Welding using copper as marker material.** Friction Stir Welding and Processing IV, TMS, 2007.

KOZMINSKI, EMÍLIA L.O. **Análise Microestrutural e Avalaiação Mecânica de Juntas Soldadas por Fricção Mecânica (FSW) do Aço Inoxidável Dpuplex UNS S31803**. Dissertação de Mestrado – UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KWANG-JIN LEE, EUI-PYO KWON. **Microstructure of stir zone in dissimilar friction stir welds of AA6061-T6 and AZ31 alloy sheets** Trans. Non ferrous Met. Soc. China 242374−2379, 2014.

LATHABAI S.; PAINTER M. J.; CANTIN G. **Friction Stir Spot Welding of Automotive Lightweight Alloys.** Proceedings of the 7th International Conference on trends in Welding Research. Pine Mountain, Georgia, USA, May 16-20, 2005.

MADZA, disponível em: http://www.mazda.com/. Acessado em: 20.06.2016.

MAZZAFERRO et. al. **Study on mechanical behavior of friction spot welds**, IIW International Congress, IIW 2008, São Paulo, SP,18-21 May 2008.

MINITAB RELEASE 12, User Guide: Data Analysis and Quality Tools, Minitab Inc.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y**. Friction stir welding and processing.** Materials Science and Engineering R, v. 50, n. 1-2, p. 1-78, 2005.

MITLING D., RADMILOVIC V., PAN T. CHEN J. **Structure-properties Relations in Spot Friction Welded(also known as Friction Stir Spot Welded) 6111 Aluminium**. Materials Science and Engineering V 441, p.p. 79- 96, 2006.

NAVARRO J., **Study dissimilar aluminum- steel welded by FSpW.**, Tese de doutorado, UFRS, Porto Alegre 2012.

NORMAN, A.F. et al. **Examination of the effect of Sc on 2000 and 7000 series aluminum alloy casting: for improvements in fusion welding.** Materials Science & Engineering A. v. A354 p. 188-198, 2003.

NORTH et. al. **Understanding Friction Welding**. Tsinghua University, Beijing, 2005.

NORTH, T., GERLICH A**. Stir Zone formation in Al 7075-T6 Spot Welds**. Metallurgical and Materials Transactions A , Volume 37, Issue 9, pp 2773-2786, 2006.

OLEA, C et. al**. A sub-structural analysis of FSW in an AA6056 Al-alloy in T4 and T6 temper conditions.** Materials Science and Engineering, A 454-455, pp 52-62, 2007.

OLEA, C.W. **Influence of energy input in FSW on structure evoliton and mechanical behabiour of precipitation-hardening in aluminum alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc).** Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Bochum, Alemanha, 2008.

ORDACHESCU M, RUIZ HERVÍAS J, IORDACHESCU D, SCUTELNICU E, PORRO J. **A. Residual stress analysis of friction stir processed AA6061. Welding in the World**, 52 (Speccial Issue). 753–757, 2012.

OWEN, R. A., PRESTON, R. V., WITHERS, P. J., SHERCLIFF, H. R., WEBSTER, P. J. **Neutron and Synchrotron Measurements of Residual Strain in TIG Welded Aluminium Alloy 2024.** Materials Science and Engineering. v. A346, p. 159-167, 2003.

PATNAIK A., Koch K., ARBEGAST W., ALLEN C. **Static Properties of "Refill" Friction Spot Welded Skin Stiffened Compression Panels,** SAE Tech. Paper 2006-01-0967, SAE World Congress, Detroit, Michegan, April 3-6, 2006.

PICCOLO, D.G. **Otimização do Processo de Soldagem por Fricção por Ponto (FSpW) de Soldas de Materiais Similares e Dissimilares de ligas leves.** Dissertação de Mestrado, PPGEM, São Carlos, SP, 2014.

PIETA G. D., **Application of the welding process FSpW in aeronautical structures: Optimization of process parameters and evaluation of the integrity of welds for the 2198-T8 Al-alloy**, HZG- Germany, 2013.

PORTAL DO CONHECIMENTO, Disponível em: <http://www.portaldeconhecimentos.org.br>. Acessado em: 10.10.2015.

PÓVOA, A.A., "Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas", 1988.

RAGONESE R. A, M. MACKA B, J. HUGHES C, P. PETOCZ. **The use of the Box–Behnken experimental design in the optimisation and robustness testing of a capillary electrophoresis method for the analysis of ethambutol hydrochloride**

in a pharmaceutical formulation. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis 27 995–1007, 2002.

REIS, R.A.,**"Determinação de Parâmetros de Soldagem TIG com Arame Frio e Onda Retangular"**, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia,1996.

RIOJA, R.J.; LIU, J., **The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications.** Metallurgical and Materials Transactions A, 43(9), 3325-3337, 2012.

ROSENDO T, PARRA B, TIER M, da SILVA AAM, dos SANTOS JF, STROHAECKER TR. **Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181- T4 aluminium alloy.** Materials Design, vol. 32, p;1094-1100, 2011.

ROSENDO, T.S. **Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (FSpW) da liga 6081-T4.** Tese de Doutorado, PPGEM, UFRGS, 2009.

ROSENDO, T.S. SILVA, A., dos SANTOS, **Preliminary Investigation On Friction Spot Welding Of Alclad 2024-T4 Aluminium Alloy.** Xxxiii Consolda – Congresso Nacional De Soldagem. Caxias Do Sul, Brazil, 2007.

SCHILLING C.; dos SANTOS J. F**. Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden von wenigstens zwei Aneinanderliegenden Werkstrucken nach der Methode des Reibschweissens.** Patent Application Amtl. Az. 199 55737.3, 2008.

SHILLING, C.; Dos SANTOS, J.F. **Method And Device For Linking At Least Two Adjoining Work Pieces By Friction Welding.** Us Patent No. 6,722,556 B2. April 2004.

SHEN Z, Yang X, ZHANG Z, CUI L, LI T. **Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints.** Materials Design V 44. P 476-486, 2013.

SHEN, Z; YANG, X**. Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy**. Materials and Design 54, p. 766-778, 2014.

SHUANG et al., **Importance of electrode hot-pressing conditions for the catalyst performance of proton exchange membrane fuel cells.** Applied Catalysis B: Environmental, 2015.

SILVA A., TIER M., BERGMAN L., RAMOS F., MAZZAFERRO J., Dos SANTOS J. **Friction Spot And Friction Stir Spot Welding Processes** – A Literature Review. Bulletin of National R&D Institute for Welding and Material Testing, ISSN 1453-0392, 2007.

SILVA, A., dos SANTOS, J., ROSENDO, T., RAMOS, F. et al., **"Performance Evaluation of 2-mm Thick Alclad AA2024 T3 Aluminium Alloy Friction Spot Welding,"** SAE Technical Paper 2007-01-3812doi:10.4271/2007-01-3812, 2007.

SMITH C.B., J.F. HINRICHS, P.C RUEHL. **Friction Stir and Friction Stir Spot Welding – lean, mean and green**. Sheet Metal Welding Conference XI, Paper 2-5, Sterling Heights, MI, May 11-14, 2004.

SU P., GERLICH A. NORTH T.H. **Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Weds.** Metallurgical and Materials Transactions A, V. 38, P. 584-595, 2006.

SU P., GERLICH A.; NORTH, T. H. **Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium alloy sheets.** SAE Technical paper, 2005-01-1255, 2005.

SU, P., GERLICH, A., NORTH, T., and BENDZSAK, G., **"Energy Generation and Stir Zone Dimensions in Friction Stir Spot Welds",** SAE Technical Paper 2006-01-0971, doi:10.4271/2006-01-0971, 2006.

SUHUDDIN, U.F.H.; FICHER, V.; DOS SANTOS, J.F. **The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy**. Scripta Materialia. 68 (1): p. 87-90., 2013.

SURICH S. **Fatigue of Metals**. 2a Ed. Cambridge University Press, 1998.

TJANTELÉ, M. **Parameters design using the taguch methodology.** Microeletronic Engineering, Geel, Belgium 277-286, V 10, 1991.

TOTTEN, G.E.; MACKENZIE D.S. **Handbook of Aluminum**, Vol.2 , Alloy Production and Materials Manufacturing, 2003.

TOZAKI, Y.; UEMATSU, Y.; TOKAJI, K. **A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance.** Journal of Materials Processing Technology, v. 210, p. 844-851, 2010.

TRAN V; LIN P; PAN J. **Failure loads of spot friction welds in aluminium 6111-T4 sheets under quasi-static and dynamic loading conditions.** SAE Internatioal, 2007-01-0983, 2007.

VARIS J., **Economics of cliched joint compared to riveted joint and example of apllying calculations to volume product.** Journal of Materials Science and Technology 172, pp 130-138, 2006.

WANG, D.A; LEE, S.C. **Microstructures and failure mechanisms of friction sitr spot welds of alumin 6061-T6 sheets**. Journal of Materials Processing Technology, p. 291-297, 2007.

WESTON, J. et al. Laser welding of aluminum alloys using different laser sources. p. 1-16, 2003.

WOODWARD, R. **Aluminum and Aluminium Alloys – Applications**. Materials e Design. v 10. p 248-254, 1989.

YANG Y., LEE S. **A Study on the Joining Strenght of Laser Spot Welding for Autmotive Apllications**. Journal of Materials Science and Technology n 94 p 151-156, 1999.

YANG, J.-G; OU, B.-L. **Hot ductility behavior and HAZ hot cracking susceptibility of 7475- T7351 aluminum alloy.** Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 30, p.146-157, 2001.