

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Departamento de Metalurgia

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DO APORTE TÉRMICO  
EM SOLDAS A PONTO POR FRICÇÃO  
(FSpW) DA LIGA AA2198-T8**

Juliana Neves Steinbach

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar ao meu pai, João Luiz Stein Steinbach que sempre me incentivou e me apoiou de todas as formas possíveis sem medir esforços, tornando tudo possível e ao meu irmão Rodrigo Neves Steinbach, pois mesmo estando longe sempre esteve presente.

Ao meu amado Gustavo Cordenonsi da Fonseca pela sua paciência e apoio durante a conclusão do meu curso.

Aos meus amigos Laura de Miranda Pinheiro, Guilherme Segatt Ractz e Jéssica Fendt Kosciuk que estiveram ao meu lado desde o início desta jornada.

Aos professores Telmo Roberto Strohaecker e Thomas Gabriel Rosauero Clarke por todas as oportunidades concedidas durante meu período no LAMEF.

Ao LAMEF e à UFRGS, seus professores e funcionários pela oportunidade de realizar o curso de Engenharia Metalúrgica e a Iniciação Científica, adquirindo diversos conhecimentos teóricos e práticos de Engenharia e outras áreas.

Aos colegas do Centro de Pesquisas Helmholtz-Zentrum Geesthacht Centre for Materials and Coastal Research, principalmente ao Dr. Jorge Fernandez dos Santos pela oportunidade de realização deste trabalho neste centro de pesquisas e ao Dr. Hua Wang pela orientação neste trabalho no período de estagio na Alemanha.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS .....                         | II   |
| SUMÁRIO.....                                 | III  |
| LISTA DE TABELAS .....                       | VIII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....        | IX   |
| RESUMO .....                                 | X    |
| ABSTRACT .....                               | XI   |
| 1 INTRODUÇÃO.....                            | 1    |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA.....                 | 2    |
| 2.1 Material .....                           | 2    |
| 2.2 Soldagem por Fricção: .....              | 4    |
| 2.2.1 Processo FSW .....                     | 5    |
| 2.2.1 Processo FSpW .....                    | 7    |
| 2.3 Modelagem numérica.....                  | 13   |
| 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....            | 14   |
| 3.1 Materiais:.....                          | 14   |
| 3.2 Parâmetros de soldagem .....             | 14   |
| 3.3 Procedimento de Soldagem.....            | 15   |
| 3.5 Aquisição de corrente: .....             | 16   |
| 3.6 Perfil de temperatura:.....              | 18   |
| 3.7 Simulação .....                          | 18   |
| 3.7.1 Transferência de calor - extração..... | 19   |
| 3.7.2 Dados de entrada.....                  | 20   |
| 3.7.3 Fonte de calor: .....                  | 23   |
| 3.8 Ensaio de Cisalhamento .....             | 24   |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....               | 26   |
| 5 CONCLUSÕES.....                            | 33   |
| 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....       | 34   |
| 7 REFERÊNCIAS .....                          | 35   |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Ferramenta para soldagem FSW composta por pino e camisa indicando a direção de soldagem (NANDAN 2008). .....                                  | 5  |
| Figura 2.2 Ferramenta para soldagem Plunge FSSW indicando direção de rotação, pressão, movimentação vertical e área soldada resultante. ....             | 7  |
| Figura 2.3 Ferramenta para soldagem Plunge FSSW indicando direção de rotação, movimentação vertical, lateral e área soldada resultante. ....             | 7  |
| Figura 2.4 Ferramenta para soldagem FSpW composta por três partes concêntricas: Anel de Fixação, Camisa e Pino.....                                      | 8  |
| Figura 2.5 Variações da soldagem FSpW (Penetração pelo Pino e Penetração pela Camisa) e suas etapas (MAZZAFERRO 2008).....                               | 9  |
| Figura 2.6 Perfil de dureza de uma solda FSpW em AA6181- T4 utilizada para determinar as zonas da seção transversal das chapas (ROSENDO 2011). ....      | 10 |
| Figura 2.7 Macrografia de liga AA6181-t4 soldada por FSpW indicando três padrões geométricos frequentes: União Principal, união secundária e Cunha. .... | 11 |
| Figura 2.8 Macrografia de liga AA2024 soldada por FSpW indicando direção de cunha invertida resultado da otimização de parâmetros. ....                  | 11 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.9 Gráfico (a) Relação entre o aporte energético e a carga de ruptura para soldas Plunge FSSW. Gráfico (b) Relação entre área soldada e Carga de ruptura para soldas Plunge FSSW.....  | 12 |
| Figura 3.1 Máquina comercial RPS 100 desenvolvida em parceria com a empresa RIFTEC GmbH para realizar soldas FSpW e detalhes das ferramentas utilizadas na máquina para execução da solda. ....  | 16 |
| Figura 3.2 Osciloscópio mScope responsável pela aquisição de dados referentes à máquina RPS 100. ....  | 17 |
| Figura 3.3 Gráfico gerado pelo mScope fornecendo dados de Corrente consumida na rotação, Corrente consumida na movimentação do Pino, Corrente consumida na movimentação da Camisa, Posição do Pino, Posição da Camisa, e Velocidade de Rotação ..... | 17 |
| Figura 3.4 Termopar tipo K utilizado para as medições de temperatura.....  | 18 |
| Figura 3.5 Amostras preparadas para inserção dos termopares: a) Chapa inferior com dois orifícios usinados (centro e 7,5mm) e b) Chapa superior com um orifício usinado (10mm). ....   | 18 |
| Figura 3.6 Desenho das chapas e base da máquina no software de simulação COMSOL 4.3 .....  | 19 |
| Figura 3.7 Desenho das chapas e base da máquina no software de simulação COMSOL mostrando os modos de transferência de calor utilizados na simulação. ....   | 20 |
| Figura 3.8 Análise do perfil térmico para coleta de dados para simulação e sua relação com dados adquiridos pelo mScope. ....  | 21 |
| Figura 3.9 Gráfico indicando a variação do aporte térmico durante a execução da solda. .   | 22 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.10 Desenho esquemático da geração de calor na interface ferramenta/peça durante a execução da solda. ....  | 23 |
| Figura 3.11 Desenho das chapas indicando as regiões responsável pela geração de calor durante a execução da solda. ....   | 24 |
| Figura 3.12 Amostras para execução de ensaio de cisalhamento conforme norma ISO 14273:2000. ....  | 25 |
| Figura 3.13 Máquina universal de ensaios mecânicos Zwick/Roell com capacidade de carga 200 kN e detalhe do posicionamento das chapas durante a execução do ensaio. .... | 25 |
| Figura 4.1 Macrografia da amostra C2 utilizada para validação da posição dos termopares.....  | 26 |
| Figura 4.2 Pontos localizados na posição ocupada pelos termopares, utilizados para coletar dados para produzir o perfil térmico no software COMSOL 4.3.....             | 26 |
| Figura 4.3 Comparação do perfil térmico real da amostra C1 com o perfil obtido por simulação.   | 27 |
| Figura 4.4 Comparação do perfil térmico real da amostra C2 com o perfil obtido por simulação.   | 28 |
| Figura 4.5 Comparação do perfil térmico real da amostra C3 com o perfil obtido por simulação.   | 28 |
| Figura 4.6 Comparação do perfil térmico real da amostra C4 com o perfil obtido por simulação.   | 29 |
| Figura 4.7 Distribuição de temperatura na superfície da chapa e isotermas de temperatura ao longo da chapa. ....  | 29 |
| Figura 4.8 Setas indicando a direção e intensidade do fluxo de calor.....   | 30 |

Figura 4.9 Gráfico da relação entre o aporte térmico e a velocidade de rotação utilizada mostrando a tendência a se estabelecer um platô de aporte térmico. .... 30

Figura 4.10 Gráfico mostrando a relação entre Resistência ao Cisalhamento e o inverso da Temperatura de pico das soldas. Pelo gráfico podemos concluir que a solda que atingiu menor pico de temperatura foi aquela que apresentou maior resistência ao cisalhamento. 32

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 Composição química das ligas AA2098 e AA2198. Ambas possuem Li como elemento diferencial. ....   | 3  |
| Tabela 2.2 Dados de resistência mecânica das ligas AA2098 e AA2198. (MA 2013).....  | 3  |
| Tabela 2.3 Dados de resistência à fadiga da liga AA2198 para diferentes tratamentos térmicos e uma comparação com os dados para a liga AA2024. .... | 4  |
| Tabela 2.4 Relação das vantagens apresentadas pelo processo de solda por fricção. ....  | 6  |
| Tabela 3.1 Composição química nominal da liga AA2198.....   | 14 |
| Tabela 3.2 Combinação de parâmetros utilizados. ....  | 15 |
| Tabela 3.3 Propriedades térmicas dos elementos utilizados na simulação.....   | 23 |
| Tabela 3.4 Combinação dos perfis de calor utilizados .....  | 24 |
| Tabela 4.1 Aporte térmico utilizado para cada velocidade de rotação .....   | 27 |
| Tabela 4.2 Relação entre parâmetros de soldagem e Força de Cisalhamento. ....   | 40 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                 |  |
|-----------------|--|
| Al              | Alumínio   |
| C               | Carbono  |
| Cu              | Cobre  |
| Cr              | Cromo  |
| DIN             | <i>Deutsches Institut fur Normung</i>                                  |
| ISO             | <i>International Organization for Standardization</i>                  |
| FSpW            | <i>Friction Spot Welding</i>   |
| FSSW            | <i>Friction Stir Spot Welding</i>                                      |
| FSW             | <i>Friction Stir Welding</i>   |
| GKSS            | <i>Gesellschaft für Kernergiewertung in Schiffbau und Schifffahrt;</i> |
| HZG             | <i>Helmholtz-Zentrum Geesthacht;</i>                                   |
| Li              | Lítio  |
| MB              | Material Base  |
| n               | Incremento de amostragem   |
| $\Delta t$      | Tempo de amostragem  |
| Q               | Aporte Térmico   |
| t               | Tempo inicial  |
| t <sub>f</sub>  | Tempo final  |
| t <sub>f2</sub> | Tempo final 2  |
| t <sub>f3</sub> | Tempo final 3  |
| TWI             | <i>The Welding Institute</i>   |
| X <sub>n</sub>  | Profundidade de penetração da ferramenta                               |
| ZM              | Zona de Mistura  |
| ZTA             | Zona Termicamente Afetada  |
| ZTMA            | Zona Termo-mecanicamente Afetada                                       |
| $\omega$        | Velocidade angular da ferramenta                                       |

## RESUMO

O objetivo principal do presente trabalho foi determinar o aporte térmico utilizado na execução de soldas FSpW através de modelagem numérica simplificada no qual a ferramenta é considerada uma fonte móvel de calor. Para desenvolver este modelo termopares foram inseridos em chapas de alumínio da liga AA2198-T8 para traçar um perfil térmico durante o processo de soldagem, este perfil foi comparado ao perfil gerado por diferentes aportes térmicos no modelo, os quais foram aplicados durante diferentes períodos e intensidades, conforme análise do perfil térmico e deslocamento da ferramenta em cada amostra.

Os valores do aporte térmico, 690, 740 e 760W, foram retirados do perfil de modelo que melhor representa o perfil real e se mostrou como uma função da velocidade de rotação crescendo com o aumento da velocidade de rotação, 1100, 1300, 1500rpm respectivamente. A intensidade do aporte térmico variou em função da velocidade de rotação nos instantes inicial e final de cada solda, quando a velocidade de rotação também varia. Os resultados mostraram que o valor do aporte térmico para as velocidades de rotação tendem a um platô conforme o material amolecia e a geração de calor diminuía.

Como objetivo secundário foi analisada a relação entre o aporte térmico, temperatura máxima atingida durante a solda e resistência ao cisalhamento. Foi verificada uma relação entre o pico de temperatura atingida durante o processo 790, 840, 808 e 820°C e a resistência ao cisalhamento, 10,52; 5,1; 8,73 e 7,11kN respectivamente, indicando que quanto maior for a temperatura atingida durante a soldagem menor será a resistência da junta.

## **ABSTRACT**

The main objective of this study was to determine the heat input used in the execution of FSpW welds through simplified numerical modeling in which the tool is considered a moving heat source. To develop this model thermocouples were inserted into aluminum plates of the AA2198-T8 alloy to chart a thermal profile during the welding process, this profile was compared to the profile generated by different heat inputs in the model, which were applied during different periods and intensities as analysis of the thermal profile and tool offset in each sample.

The values of heat input, 690, 740 and 760W were removed from the model profile that best represents the real profile and shown as a function of engine speed, increasing with the increase of rotation speed, 1100, 1300, 1500rpm, respectively. The intensity of the heat input varied as a function of rotational speed for the initial and end of each weld, when the rotating speed also varies. The results showed that the amount of heat input to the rotation speeds tends to a plateau as the material gets softer and the heat generation decreases.

As a secondary objective we analyzed the relation between the heat input, maximum temperature reached during welding and shear strength. It was verified a relationship between the peak temperature reached during the process 790, 840, 808 and 820 ° C and shear resistance, 10,52; 5,1; 8,73 and 7,11kN, respectively, indicating that the higher the temperature is reached during welding, lower the joint strength is.

## 1 INTRODUÇÃO

Solda ponto por fricção (FSpW – Friction Spot Weld) é um tipo de soldagem no estado sólido desenvolvida e patenteada pelo centro Helmholtz-Zentrum-Geesthach (SCHILLING 2005). Este tipo de solda é uma variação do processo FSW (Friction Stir Welding) adaptado para soldas ponto. O processo de soldagem por fricção é um método capaz de soldar as ligas 2XXX e 7XXX consideradas “não soldáveis” pelos processos convencionais (DAWES 1996).

Uma nova geração de ligas Al-Cu-Li passou a ser produzida recentemente, apresentando uma série de propriedades desejáveis como excelente resistência à corrosão, bom desempenho no quesito crescimento de trincas por fadiga e uma combinação de alta resistência e tenacidade (GIUMMARRA 2007). Mais estudos devem ser conduzidos para desenvolver todo o potencial desta liga até sua efetiva implementação na indústria aeronáutica.

A compreensão dos fenômenos físico dos processos de solda por fricção depende do sucesso das tentativas de modelagem que visam prever os diferentes aspectos do processo (KHANDKAR 2003). O melhor entendimento transferência de calor na peça de trabalho pode ser útil na previsão dos ciclos térmicos na peça de soldagem, na dureza na zona soldada e subsequentemente pode ser útil na avaliação da qualidade da solda. A distribuição de temperatura conhecida também é importante para o cálculo da viscosidade em função da temperatura durante a modelagem de fluxo de material (SONG 2003).

Da parceria entre o Laboratório de Metalurgia Física (Lamef) e o Centro de Pesquisas Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) soldas FSpW foram produzidas e analisadas no Instituto HZG, centro de referência mundial em soldagem robotizada no estado sólido.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Material

As ligas de alumínio são a escolha preponderante para a fuselagem, asas, e estruturas de apoio de aviões comerciais e aeronaves de carga/transporte e militares. A porcentagem de alumínio em peso da fuselagem de uma aeronave moderna de transporte comercial típica é de 80 por cento (The Aluminum Association 2014). Historicamente, avanços no desempenho de aeronaves estão baseados em avanços no desempenho dos materiais metálicos que compõem estas aeronaves (RIOJA 2012).

A necessidade crescente de economia nas operações de aeronaves resultou em uma grande competição entre as ligas convencionais de alumínio de alta resistência (série 7XXX) e os materiais mais leves, porém rígidos, como o caso de compósitos de fibra de carbono a base de epóxi. Chegou a ser projetado que o uso de alumínio na estrutura das aeronaves fosse diminuir progressivamente devido ao emprego destes compósitos e ligas de titânio, porém um avanço significativo no desenvolvimento de ligas de Alumínio-Lítio fez com a escolha tendesse a favor do alumínio. A substituição das ligas [7XXX] e [2XXX] por aquelas contendo Lítio pode trazer uma redução de 10% no peso da aeronave o que gera uma redução de 4% dos custos operacionais. (QUIST 1984).

No final da década de 1950 deu-se início ao desenvolvimento de ligas de Alumínio-Lítio para a indústria aeroespacial. Com o intuito de tornar o alumínio ainda mais leve, as primeiras ligas desenvolvidas não foram bem aceitas devido à anisotropia de suas propriedades, baixa tenacidade e baixa resistência à corrosão. Uma nova geração de ligas Al-Li passou a ser produzida recentemente, apresentando uma série de propriedades desejáveis como excelente resistência à corrosão, bom desempenho do em termos de crescimento de trincas por fadiga, uma combinação de alta resistência e tenacidade, superando as primeiras gerações e viabilizando sua aplicação (GIUMMARRA 2007).

A liga Alumínio-Lítio 2198 é uma derivação da liga 2098 que havia sido desenvolvida pela McCook Metals para resistir às altas cargas as quais parte da fuselagem da aeronave de combate F-16 estavam expostas (KNÜWER 2006). Desenvolvida com uma

porcentagem levemente menor de cobre, se comparada à 2098, a liga 2198 também apresenta outras adaptações com o objetivo de otimizar sua tenacidade. A tabela 2.1 nos dá os limites de composição para estas ligas (CHEN 2011), (CAVALIERE 2009).

Tabela 2.1 Composição química das ligas AA2098 e AA2198. Ambas possuem Li como elemento diferencial (MA 2013).

| Wt%  | Cu      | Li      | Zn <sub>(max)</sub> | Mn <sub>(max)</sub> | Mg       | Zr        | Si <sub>(max)</sub> | Ag       | Fe <sub>(max)</sub> |
|------|---------|---------|---------------------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|---------------------|
| 2098 | 3.2-3.8 | 0.8-1.3 | 0.35                | 0.35                | 0.8      | 0.04-0.18 | 0.12                | 0.25-0.6 | 0.15                |
| 2198 | 2.9-3.5 | 0.8-1.1 | 0.35                | 0.5                 | 0.25-0.8 | 0.04-0.18 | 0.08                | 0.1-0.5  | 0.01                |

Tabela 2.2 Dados de resistência mecânica das ligas AA2098 e AA2198 (MA 2013).

| Material | Limite de Elasticidade (MPa) | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Alongamento (%) |
|----------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|
| 2098     | 530                          | 547                        | 75                           | 12              |
| 2198     | 436                          | 491                        | 77                           | 14              |

Outra consideração a ser feita na escolha da liga para a construção da aeronave é o seu comportamento em fadiga, ponto crítico para estas estruturas já que 40% dos danos reparados em manutenções se originaram na fadiga de seus componentes (VOGELESANG 2000). A eficiência de soldagem da liga AA2198 é uma das vantagens quando comparada à convencional AA2024, utilizada atualmente em estruturas de aeronaves. Para que se possa concretizar a substituição desta liga convencional pela Alumínio-Lítio deve-se comprovar que seu comportamento mecânico e capacidade de tolerância a danos são pelo menos iguais ou superiores a sua antecessora. Todavia há poucos estudos reportados na literatura, os principais referem-se a estudos de comportamento em fadiga para soldagem por fricção FSW (Friction Stir Welding). (ALEXOPOULOS 2013). Abaixo uma tabela com os dados retirados da literatura:

Tabela 2.3 Dados de resistência à fadiga da liga AA2198 para diferentes tratamentos térmicos e uma comparação com os dados para a liga AA2024.(a) (ALEXOPOULOS 2013); (b) (BITONDO 2010); (c) (ASTARITA 2012); (d) (CHEN 2011); (e) (STEGLICH 2010); (f) (CAVALIERE 2009).

| Liga      | Referência | Módulo de Elasticidade (GPa) | Limite de Escoamento (MPa) | Carga de Resistência (MPa) | Alongamento (%) | Energia de Deformação (MJ/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|--|
| 2024-T3   | (a)        | 70.291                       | 391                        | 500                        | 18.88           | 86.28                                      |
| 2198-T3   | (b)        | -                            | 275                        | 370                        | 15              | -  |
| 2198-T3   | (c)        | -                            | 315                        | 375                        | 15              | -  |
| 2198-T351 | (a)        | 75.461                       | 265                        | 384                        | 14.9            | 52.77                                      |
| 2198-T351 | (d)        | -                            | 324                        | 442                        | 13              | -  |
| 2198-T8   | (e)        | 73                           | 469                        | 510                        | 14              | -  |
| 2198-T851 | (a)        | 72.803                       | 432                        | 484                        | 11.55           | 56.49                                      |
| 2198-T851 | (d)        | -                            | 490                        | 530                        | 14              | -  |
| 2198-T851 | (f)        | 76.7                         | 436                        | 490                        | 13.7            | -  |

## 2.2 Soldagem por Fricção:

Ao se optar por ligas da série 2XXX ou 7XXX devem-se levar em conta as possibilidades de união deste material para a construção da estrutura das aeronaves para as quais eles foram designados. No campo aeronáutico os processo de união por solda ponto por laser, rebiteagem convencional e rebiteagem por auto aprisionamento são os mais utilizados. Apesar do bom desempenho mecânico das juntas rebiteadas elas representam um acréscimo significativo de peso à estrutura (VARIS 2006).

O processo de soldagem por fricção é um método capaz de soldar as ligas 2XXX e 7XXX consideradas “não soldáveis” pelos processos convencionais de solda devido à distribuição não favorável de produtos de solidificação frágeis e à grande porosidade na zona fundida proporcionando grande perda de propriedades mecânicas nesta área se

comparada ao material base (DAWES 1996). A sensibilidade das ligas da série 2XXX, durante soldagem à arco, quanto à ocorrência de trincas à quente ao se utilizar certas quantidades de cobre (3%) é outra das razões pelas quais estas ligas são consideradas não soldáveis (ESAB 2014). No processo de soldagem à arco as temperaturas na zona afetada pelo calor (ZAC) são mais baixos do que na solda, mas são suficientemente elevadas para causar a precipitação e crescimento de grão nesta região. Isto resulta em um superenvelhecimento na zona afetada pelo calor e um decréscimo na resistência à corrosão e nas propriedades mecânicas da estrutura (GHEORGHE 2004).

### 2.2.1 Processo FSW

Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem que se diferencia dos demais por ocorrer no estado sólido sem fusão dos materiais a serem unidos, desenvolvido e patenteado pelo TWI em 1991 (THOMAS 1995). A ferramenta utilizada em FSW consiste de uma sonda rotativa não consumível que, uma vez inserida entre duas chapas e movida na direção transversal ao longo da linha de união das chapas, gera calor através do atrito peça-ferramenta promovendo a união.

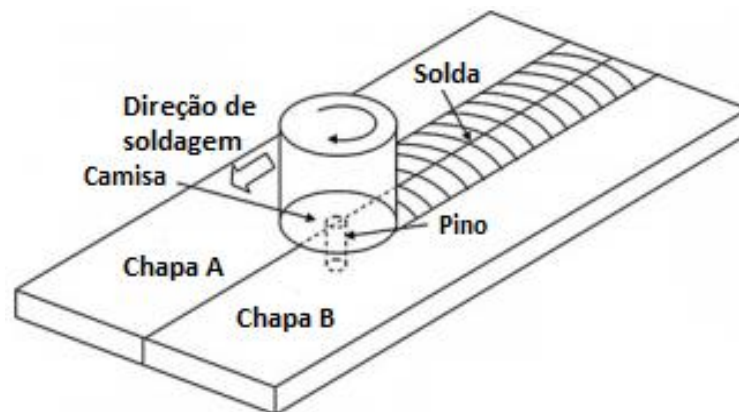


Figura 2.1 Ferramenta para soldagem FSW composta por pino e camisa indicando a direção de soldagem (NANDAN 2008).

Estudos em FSW nos apontam uma série de vantagens para sua utilização, no caso específico das ligas Al-Li a soldagem por fricção evita a perda de Li, porosidades e trincas de solidificação (MISHRA 2005). A tabela abaixo classifica os benefícios da soldagem por fricção:



Tabela 2.4 Relação das vantagens apresentadas pelo processo de solda por fricção (MISHRA 2005).

| <b>Benefícios Metalúrgicos</b>                       | <b>Benefícios Ambientais</b>                   | <b>Benefícios Energéticos</b>  |
|--|--|--|
| Processo no estado sólido                            | Não necessita gás de proteção                  | Permite melhor utilização do material possibilitando redução em peso |
| Baixa distorção das peças                            | Não necessita preparação da superfície         | Consome apenas 2,5% da energia necessária para a solda a laser       |
| Boa estabilidade dimensional e reprodutibilidade     | Não gera resíduo                               | Reduz o consumo de combustível nos veículos onde estão presentes     |
| Sem perdas de elementos de liga                      | Não necessita uso de solventes para desengraxe | Não necessita tratamento térmico posterior                           |
| Propriedades metalúrgicas excelentes na área soldada | Não necessita de consumível                    |  |
| Microestrutura refinada                              |  |  |
| Ausência de trincas                                  |  |  |

Há três variações de solda por fricção FSW para uniões pontuais, cada uma delas possui suas características particulares com vantagens e desvantagens apresentadas a seguir:

**Plunge FSSW:** Desenvolvida pela Mazda Motor Corporation e Kawasaki Heavy Industries em 2003, esta solda ponto por fricção é capaz de unir materiais de grande espessura ou composto por diversas camadas gerando pouca distorção. Trata-se de uma solda FSW sem a velocidade transversal e, assim como o final da FSW, deixa um orifício na região soldada devido ao pino (IWASHITA 2003).

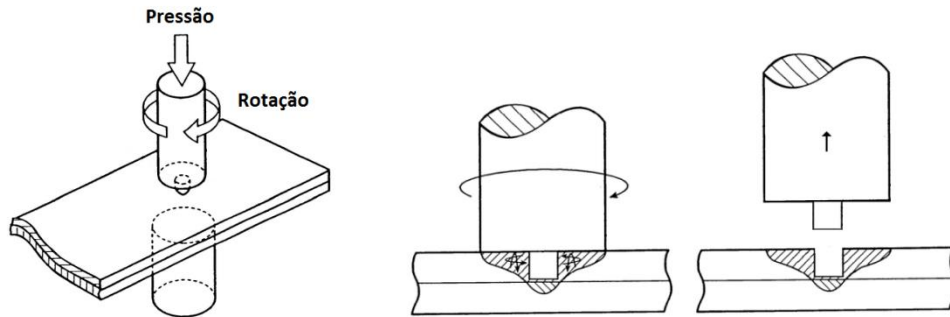


Figura 2.2 Ferramenta para soldagem Plunge FSSW indicando direção de rotação, pressão, movimentação vertical e área soldada resultante (IWASHITA 2003).

**Swing FSSW:** Esta variação da solda Plunge FSSW se diferencia por produzir um ponto elíptico ao invés do círculo perfeito de sua antecessora. Devido a uma área soldada maior, a resistência desta solda também será maior, porém ainda apresenta o mesmo orifício deixado pela penetração do pino (OKAMOTO 2005).

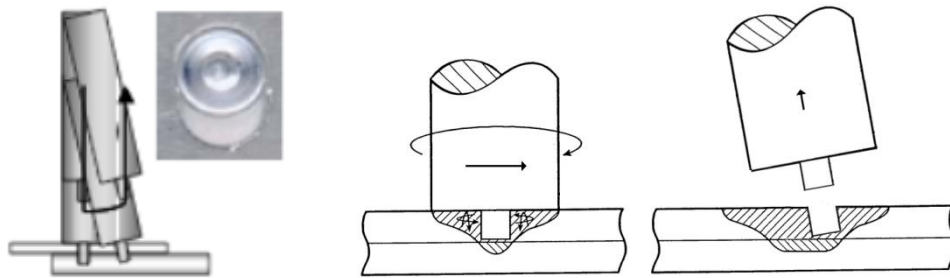


Figura 2.3 Ferramenta para soldagem Plunge FSSW indicando direção de rotação, movimentação vertical, lateral e área soldada resultante (OKAMOTO 2005).

**Refill FSSW (FSpW):** O processo de soldagem por fricção Friction Spot welding foi desenvolvido e patenteado pelo Centro Helmholtz-Zentrum-Geesthach (antiga GKSS) e se diferencia dos demais métodos por realizar um preenchimento completo da região soldada sem deixar nenhum orifício na peça (SCHILLING 2005).

### 2.2.1 Processo FSpW

O processo de soldagem por FSpW necessita de uma ferramenta composta por 3 partes: Pino, Camisa e Anel de fixação conforme figura abaixo. A camisa é constituída de uma rosca invertida e tem por finalidade intensificar o fluxo de material, o pino apresenta sulcos radiais com a finalidade de facilitar o deslizamento entre o pino e a camisa (ROSENDO 2009). Dois atuadores trabalham de forma independente sendo responsáveis por movimentos do pino e camisa para cima e para baixo. Um motor é responsável pelo movimento de rotação do pino e camisa, que rotacionam na mesma direção. Um terceiro

atuador está destinado ao anel de fixação com a função de manter unidas as chapas a serem soldadas e impedir que o material plastificado pelo pino ou camisa seja perdido.



Figura 2.4 Ferramenta para soldagem FSpW composta por três partes concêntricas: Anel de Fixação, Camisa e Pino.

O sistema desenvolvida pela HZG pode ser utilizado de duas formas, com penetração pelo pino ou penetração pela camisa, ambos necessitam de quatro passos para serem executados (ROSENDO 2011):

1) O anel de fixação pressiona as chapas a serem soldadas contra um dispositivo da máquina enquanto pino e camisa rotacionam na mesma direção. Como a ferramenta está em contato com a chapa superior a ser soldada esta rotação inicial gera calor e facilita a penetração do pino ou camisa.

2) Penetração pelo pino: Inicia-se a penetração da ferramenta na peça através da introdução do pino nas chapas, o atrito pino/material gera o calor necessário para plastificar o material sem atingir seu ponto de fusão. O material plastificado que ocupava o espaço agora ocupado pelo pino é deslocado e passa a ocupar o volume antes ocupado pela camisa que moveu-se na direção contrária ao pino.

Penetração pela camisa: Inicia-se a penetração da ferramenta na peça através da introdução da camisa nas chapas, o atrito camisa/material gera o calor necessário para plastificar o material sem atingir seu ponto de fusão. O material plastificado que ocupava o espaço agora ocupado pela camisa é deslocado e passa a ocupar o volume antes ocupado pelo pino que moveu-se na direção contrária à camisa. Este tipo de penetração gera uma área soldada maior se comparada à penetração pelo pino, pois a quantidade de material deslocado pela camisa é maior devido ao seu maior volume.

3) Pino e camisa voltam à sua posição inicial inserindo o material plastificado de volta à chapa e continuam a rotacionar na mesma direção, agora em contato com a superfície das chapas, para dar o acabamento superficial à área soldada.

4) O processo de soldagem termina com a ferramenta sendo retirada do contato com a chapa deixando uma superfície plana com o mínimo de perda de material.

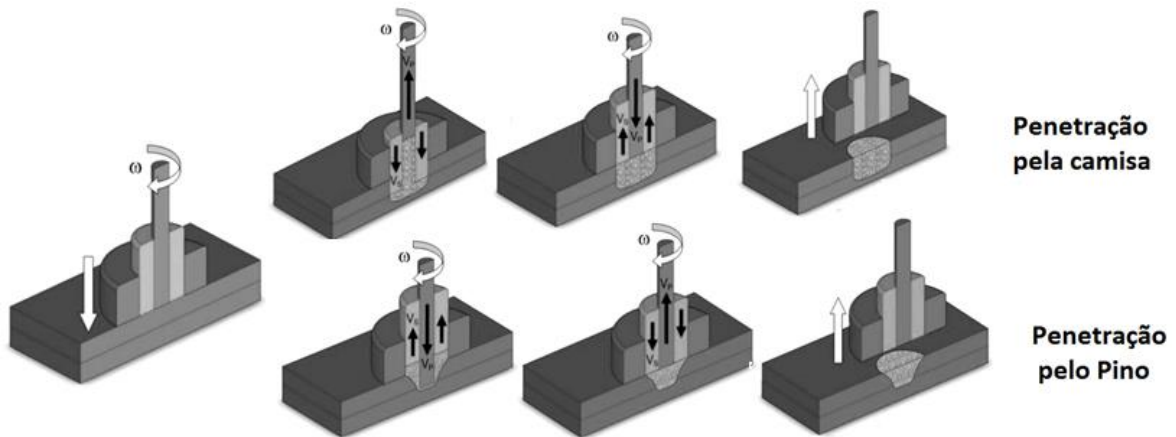


Figura 2.5 Variações da soldagem FSpW (Penetração pelo Pino e Penetração pela Camisa) e suas etapas (MAZZAFERRO 2009).

Estudos mostram outra grande vantagem no preenchimento completo da região soldada oferecido pela FSpW com relação ao processo de corrosão que tende a iniciar no fundo do orifício deixado pela solda FSSW no qual muitas vezes a tinta utilizada para proteção da superfície pode não penetrar completamente comprometendo a estrutura (UEMATSU 2008), Por este motivo a FSpW pode ser utilizada para preencher o orifício deixado pela solda FSW evitando assim perda de material com a retirada da região final da solda (ARBEGAST 2004). Os parâmetros mais relevantes para a soldagem FSpW são: Velocidade de Rotação, duração, profundidade de penetração, taxa de penetração e tempo de soldagem (ZHAO 2014).

A microestrutura de soldagem produzida pode ser dividida em quatro regiões: Zona de Mistura (ZM), Zona Termo-mecanicamente Afetada (ZTMA), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Material Base (MB) (ROSENDO 2011).

ZM: é caracterizada por uma zona de intensa deformação plástica acompanhada de alta temperatura, apesar de não atingir a temperatura de fusão é nesta zona que ocorre a mistura mecânica das chapas a serem unidas com recristalização dinâmica do material. A mistura é tal que não permite diferenciar a chapa superior da inferior quando se analisa a região soldada.

ZTMA: Esta zona sofre um menor grau de deformação plástica e um nível moderado de temperatura, podendo afetar o material de diferentes formas dependendo de suas propriedades iniciais, em geral ocorrendo recuperação do material e alterações nas propriedades resultantes de tratamentos térmicos.

ZTA: Apesar de não se observar deformação plástica nesta região a temperatura atingida pode ocasionar recuperação da microestrutura laminada das chapas e alterações nas propriedades resultantes de tratamentos térmicos (GERLICH 2006).

A diferenciação destas zonas se dá através de Microscópio Óptico, porém pode ser necessário que se faça um perfil de dureza em paralelo à análise ótica para diferenciar a ZTA.

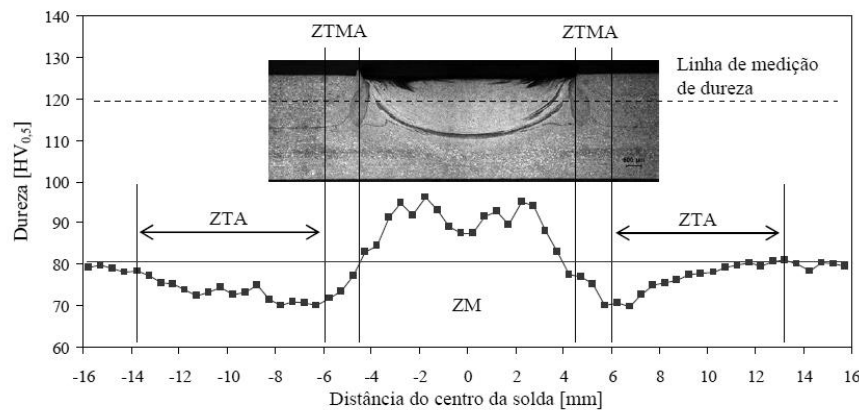


Figura 2.6 Perfil de dureza de uma solda FSpW em AA6181- T4 utilizada para determinar as zonas da seção transversal das chapas (ROSENDO 2011).

Além das diferentes zonas afetadas, ao examinar a seção transversal de uma junta soldada por FSpW é comum encontrar padrões geométricos que são comuns a todas elas, como mostrado na Figura 2.7 podemos notar três padrões conhecidos como: cunha, gerada pela deformação plástica da chapa inferior, se apresenta com a aparência de um V invertido, sua dimensão final será controlada pela energia utilizada na solda. União secundária, uma região de transição aonde o ligamento das chapas inferior e superior não é muito forte, caracterizado por uma linha curta e irregular. União principal, esta é a região onde ocorreu efetivamente adesão entre as chapas inferior e superior apresentando elevada resistência, sua característica irregular nas extremidades é resultado do fluxo de material principalmente no terceiro estágio do processo quando o pino empurra o material plastificado de volta ao seu local de origem. Em seu trabalho Parra et al afirmam que a cunha age como um sítio de nucleação para trincas, conforme nos aproximamos de sua

extremidade ela se torna mais afiado provocando a nucleação e o crescimento de trincas mesmo sob pequena carga aplicada (PARRA 2011).

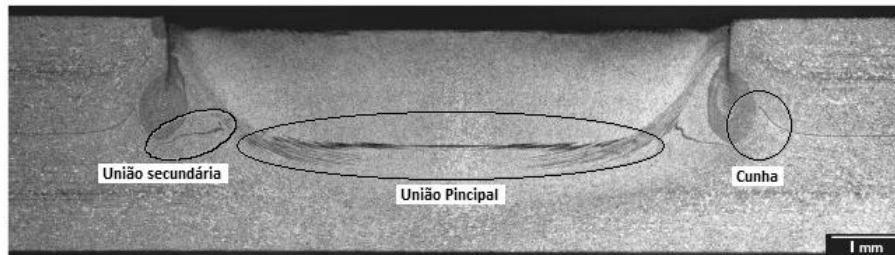


Figura 2.7 Macrografia de liga AA6181-t4 soldada por FSpW indicando três padrões geométricos frequentes: União Principal, união secundária e Cunha.

A otimização de processo é capaz de alterar a forma e tamanho destes padrões a fim de minimizar sua influência sobre a resistência das juntas soldadas. Em seu trabalho Sergio et al utilizaram ferramentas com um perfil otimizado e revelando a formação de uma cunha com a extremidade voltada para a chapa inferior, direção contrária daquela detalhada na literatura (PARRA 2011), (BADARINARAYAN 2009), (YIN 2010).

Este fato associado à presença de grãos muito pequenos produzidos por recristalização dinâmica confirma que a mistura de material para este caso foi melhorada o que resulta em melhores propriedades mecânicas (AMANCIO 2011).

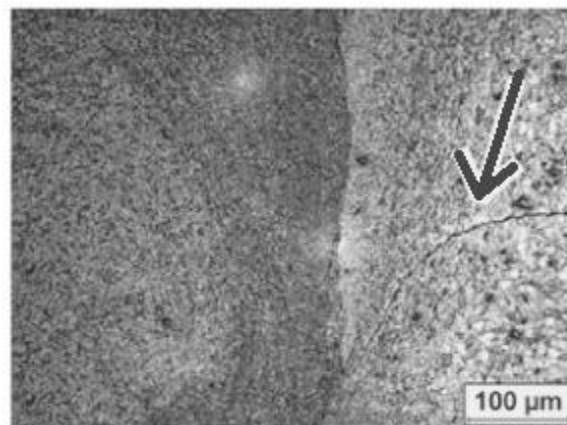


Figura 2.8 Macrografia de liga AA2024 soldada por FSpW indicando direção de cunha invertida resultado da otimização de parâmetros.

Diferentemente das técnicas de soldagem por fusão, nas soldas por fricção as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada não dependem somente do aporte de energia, tendo a mistura mecânica uma importante contribuição atuando conjuntamente durante o processo de soldagem, o que torna difícil sua diferenciação na hora de se analisar

estas propriedades. As propriedades mecânicas extensamente analisadas e discutidas são definidas por parâmetros como tamanho de botão de solda, tamanho e distribuição das zonas da solda, presença de defeitos, microestrutura, dureza, geometria da interface entre as chapas, falta de adesão entre outros.

O comportamento das soldas Plunge FSSW foi estudado (GERLICH 2006) sob o ponto de vista energético e mecânico, segundo seu trabalho a resistência mecânica deste tipo de solda tende a se elevar com o aumento do aporte térmico, assim como com o aumento da área soldada.

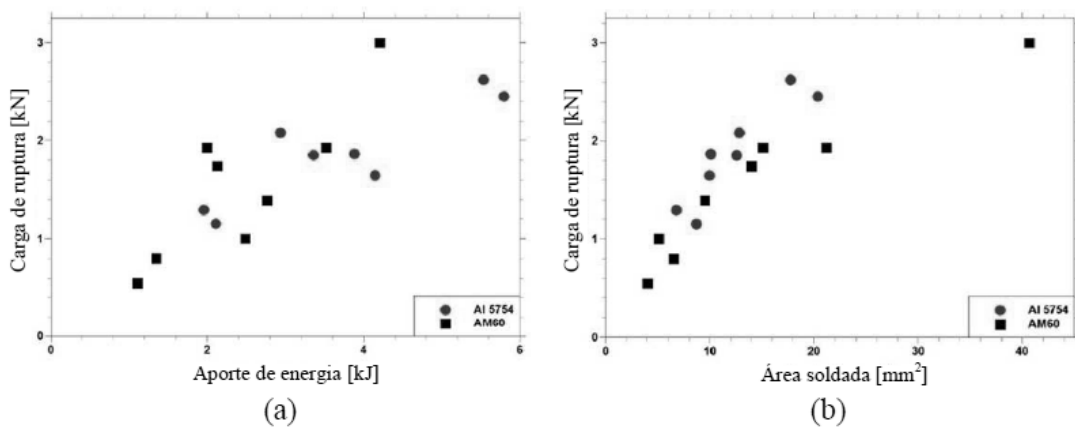


Figura 2.9 Gráfico (a) Relação entre o aporte energético e a carga de ruptura para soldas Plunge FSSW. Gráfico (b) Relação entre área soldada e Carga de ruptura para soldas Plunge FSSW. (GERLICH 2006).

Este aporte energético apresentado na figura 2.9a foi determinado de forma analítica baseado na equação x, os dados da figura 2.9b foram determinados empiricamente.

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Força (n)} (x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque (n)} \omega(n) \Delta t \quad (2.1)$$

Onde  $x_n$  é a profundidade de penetração da ferramenta num dado incremento de amostragem (n),  $\omega$  é a velocidade angular da ferramenta (rad/s), n é o incremento de amostragem, N é o incremento final de amostragem e  $\Delta t$  é o tempo de amostragem (tempo total). Este mesmo estudo considera desprezível o primeiro termo da equação 2.1 se comparado ao aporte total de energia, desta forma a equação se resume a:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Torque (n)} \omega(n) \Delta t \quad (2.2)$$

Esta equação (2.2) nos mostra que os três parâmetros, torque, velocidade de soldagem e tempo de soldagem são variáveis importantes na determinação da energia de soldagem utilizada, tendemos a pensar que quanto maior for o torque, velocidade de rotação e tempo de soldagem, maior será a energia utilizada, porém como o torque depende da adesão entre a superfície da ferramenta e o material, conforme o último plastifica inicia-se um processo de escorregamento diminuindo a geração de calor. Estabelece-se assim um platô de energia por velocidade de rotação e torque (GERLICH 2006).

### 2.3 Modelagem numérica

A compreensão dos fenômenos físicos dos processos de solda por fricção depende do sucesso das tentativas de modelagem que visam prever os diferentes aspectos do processo. O calor gerado no processo de solda por fricção é geralmente assumido como sendo uma combinação de dois mecanismos diferentes, a saber, (i) o atrito na interface ferramenta-peça e (ii) a deformação plástica de cisalhamento do metal de solda na vizinhança do pino. O calor produzido durante a solda é dissipado por condução para a peça de trabalho, ferramenta e placa de apoio (KHANDKAR 2003).

Uma boa compreensão do processo de transferência de calor na peça de trabalho pode ser útil na previsão dos ciclos térmicos na peça de soldagem, na dureza na zona soldada e, subsequentemente, pode ser útil na avaliação da qualidade da solda. A distribuição de temperatura conhecida também é importante para o cálculo da viscosidade em função da temperatura durante a modelagem de fluxo de material (SONG 2003).

Uma distribuição de temperatura satisfatória é favorável para alcançar uma solda de alta qualidade. Por conseguinte, é necessário desenvolver um novo método para a estimativa de uma entrada de calor adequada para reduzir os defeitos induzidos por calor (YANG 2014).



### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais:

Foram realizadas soldas FSpW através do processo de penetração por Camisa em chapas de 1,6 mm de espessura cortadas em amostras de 80 mm de comprimento e 45 mm de largura, as chapas de alumínio AA2198-T8 pertencem a uma nova geração de ligas Al-Li que passou a ser produzida recentemente, apresentando uma série de propriedades desejáveis como excelente resistência à corrosão, bom desempenho do espectro de crescimento de trincas por fadiga, uma combinação de alta resistência e tenacidade. A Tabela 3.1 apresenta a composição química da liga utilizada.

Tabela 3.1 Composição química nominal da liga AA2198.

|                | <b>Cu</b> | <b>Li</b> | <b>Zn<sub>(max)</sub></b> | <b>Mn<sub>(max)</sub></b> | <b>Mg</b> | <b>Zr</b> | <b>Si<sub>(max)</sub></b> | <b>Ag</b> | <b>Fe<sub>(max)</sub></b> |
|----------------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| <b>AA 2198</b> | 2.9-3.5   | 0.8-1.1   | 0.35                      | 0.5                       | 0.25-0.8  | 0.04-0.18 | 0.08                      | 0.1-0.5   | 0.01                      |

#### 3.2 Parâmetros de soldagem

A escolha de parâmetros de soldagem foi determinada com base na literatura, estudos anteriores realizados com os mesmos materiais em FSpW e por meio de estudos previamente realizados. Este processo de soldagem é condicionado por cinco parâmetros: ordem de disposição das chapas, velocidade de rotação, profundidade de penetração, tempo de permanência e pressão do anel. A combinação de parâmetros investigadas neste estudo está na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Combinação de parâmetros utilizados.

| Condição de soldagem | Velocidade de rotação [rpm] | Tempo de permanência [s] | Profundidade de Penetração [mm] | Pressão do anel [bar] |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| C1                   | 1100                        | 3                        | 2.1                             | 4.2                   |
| C2                   | 1100                        | 5                        | 2.8                             |                       |
| C3                   | 1300                        | 3                        | 2.6                             |                       |
| C4                   | 1500                        | 3                        | 2.8                             |                       |

### 3.3 Procedimento de Soldagem

As soldas foram realizadas no instituto de pesquisa HZG (cessionário da patente) em uma máquina comercial RPS 100 desenvolvida em parceria com a empresa RIFTEC GmbH, na Alemanha, utilizando o método de penetração por camisa, com ferramenta cilíndrica composta por três componentes distintos: anel de fixação de 15 mm, camisa com diâmetro externo de 9 mm e um pino com 6 mm, sendo os dois últimos com rosca para intensificar o fluxo de material (ferramenta ilustrada na Figura 3.4). À máquina de soldagem é acoplada a um sistema integrado de monitoramento que registra a profundidade de penetração, velocidade de rotação, força axial e tempo de soldagem, bem como as posições da camisa e do pino. A máxima força de penetração é de 7,8 kN (eixo vertical) e a máxima velocidade de rotação é de 3000 rpm. O sistema de fixação é pneumático. A Figura 3.1 apresenta a máquina RPS 100 e um detalhe da ferramenta utilizada.

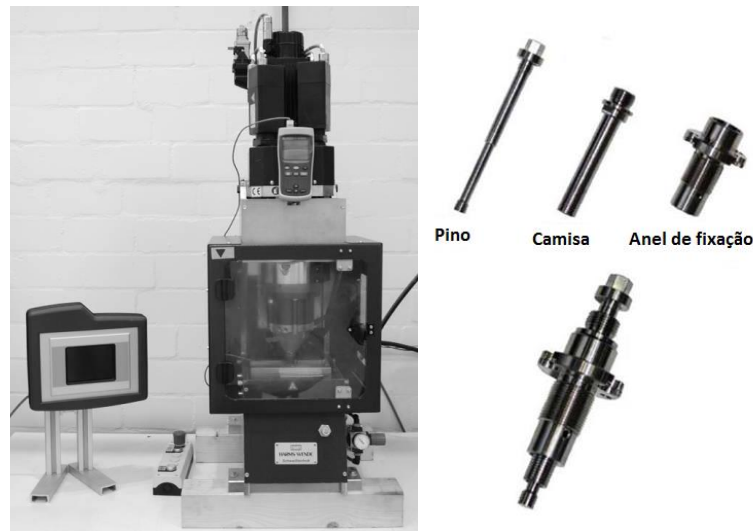


Figura 10 Máquina comercial RPS 100 desenvolvida em parceria com a empresa RIFTEC GmbH para realizar soldas FSpW e detalhes das ferramentas utilizadas na máquina para execução da solda.

### 3.4 Investigação numérica

O método para medição de energia de soldagem utilizado por SU et al. relacionando torque, velocidade de rotação e tempo de soldagem foi possível devido ao uso de uma célula de carga de seis eixos que, acoplada a um sistema de aquisição de dados, fornecia dados de força axial, torque, velocidade de rotação, deslocamento do pino e temperatura do pino (SU 2006). Para este experimento foi utilizada a máquina de soldagem comercial RPS 100 na qual os dados de tempo e velocidade de rotação são dados de entrada da máquina, que não possui nenhuma célula de carga acoplada para medição de força e torque. Sob estas condições não se torna possível o cálculo da energia de soldagem de forma analítica, para tal cálculo foi feito uso de um software de simulação e aquisição de dados de temperatura através de termopares para a validação dos resultados obtidos com a simulação, além dos dados fornecidos pela máquina outros dados como corrente consumida durante o processo também foram obtidos para uso na simulação.

### 3.5 Aquisição de corrente:

O software mSope, Figura 3.2, é um Sistema especialmente designado e testado para ser aplicado na indústria automobilística, consistindo de um programa combinado com um hardware apropriado.



Figura 11 Sistema de aquisição de dados mScope responsável pela aquisição de dados referentes à máquina RPS 100.

Para utilizar o mScope seleciona-se o sensor ou circuito de ignição a ser testado e o software irá automaticamente gravar os dados solicitados e prover detalhes completos sobre como conectar o mScope e como os dados e informações técnicas gerais do componente ou sistema a ser testado serão apresentados.

Através do mScope é possível obter os seguintes dados: Corrente consumida na rotação, Corrente consumida na movimentação do Pino, Corrente consumida na movimentação da Camisa, Posição do Pino, Posição da Camisa, e Velocidade de Rotação:

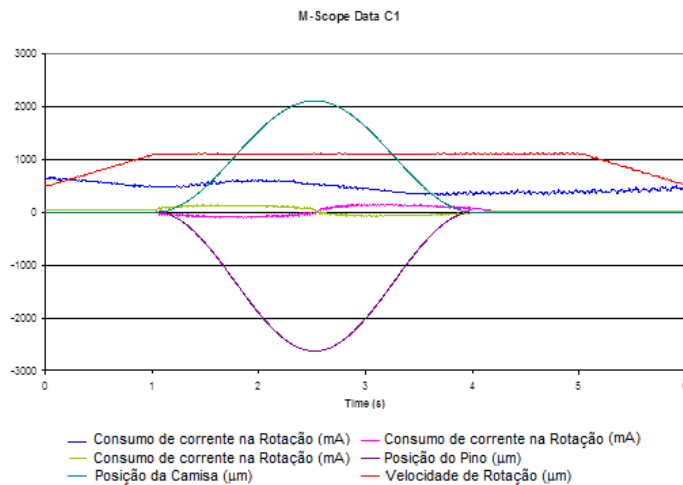


Figura 12 Gráfico gerado pelo mScope fornecendo dados de Corrente consumida na rotação, Corrente consumida na movimentação do Pino, Corrente consumida na movimentação da Camisa, Posição do Pino, Posição da Camisa, e Velocidade de Rotação

Os dados obtidos nos mostram que as velocidades de rotação no primeiro e último segundo variam linearmente, desde aproximadamente 500rpm no início do processo até a velocidade escolhida para o processo e desta velocidade até 500rpm novamente no final do processo conforme a Figura 3.3.

### 3.6 Perfil de temperatura:

O perfil de temperatura real foi obtido através de três termopares tipo K (níquel-cromo/níquel-alumínio) conforme Figura 3.4 inseridos em diferentes posições a 1 mm de profundidade. Dois orifícios foram usinados na chapa inferior, o primeiro ao centro da chapa e o segundo a 7.5 mm do centro. Na chapa superior foi usinado um orifício a 10 mm do centro como mostrado na Figura 3.5. Foi utilizada pasta de condução térmica Artic Silver para preenchimento dos orifícios após a inserção dos termopares para garantir a transferência de calor. Segundo estudos a presença destes orifícios não afeta o campo de temperatura durante a soldagem (MCCLURE 1998).

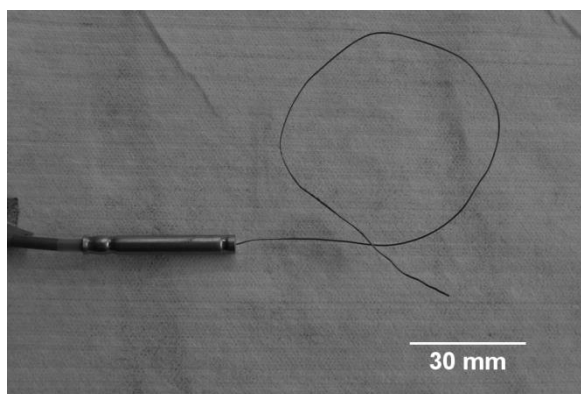


Figura 13 Termopar tipo K utilizado para as medições de temperatura.

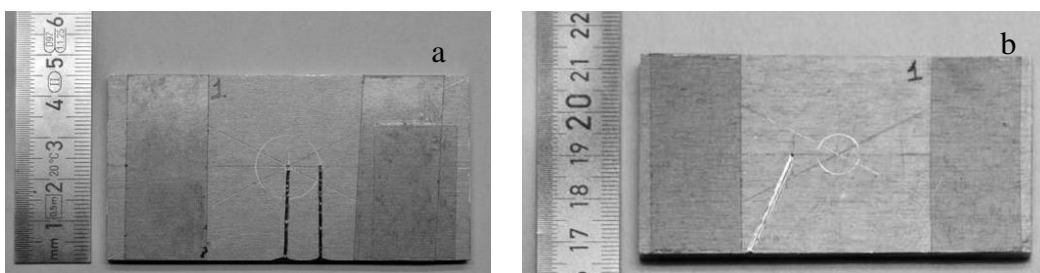


Figura 14 Amostras preparadas para inserção dos termopares: a) Chapa inferior com dois orifícios usinados (centro e 7,5mm) e b) Chapa superior com um orifício usinado (10mm).

### 3.7 Simulação

O modelo térmico apresentado está focado na determinação do aporte térmico utilizado durante a soldagem, validado através de um perfil de temperaturas, levando-se em consideração apenas o calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e a peça e assumindo que efeitos na temperatura devido ao fluxo de material plastificado possam ser negligenciados.

De forma resumida este modelo admite que o calor aplicado é basicamente uma fonte de calor móvel gerado no contato Camisa/Pino-chapa. O método desenvolvido relaciona o modelo numérico ao modelo experimental através do ajuste de calor fornecido pela ferramenta e o calor retirado pelo contato da chapa com o suporte da máquina. A quantidade de calor utilizada no modelo é estimada através de comparação do perfil de temperatura fornecido pelo software COMSOL versão 4.3 com o adquirido com termopares.

Para iniciar a simulação foram desenhadas as duas chapas com 1,6 mm de espessura cada e o suporte da máquina como mostrado na Figura 3.6:

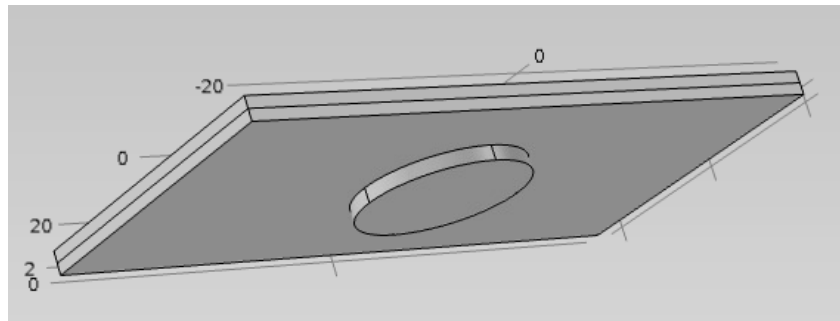
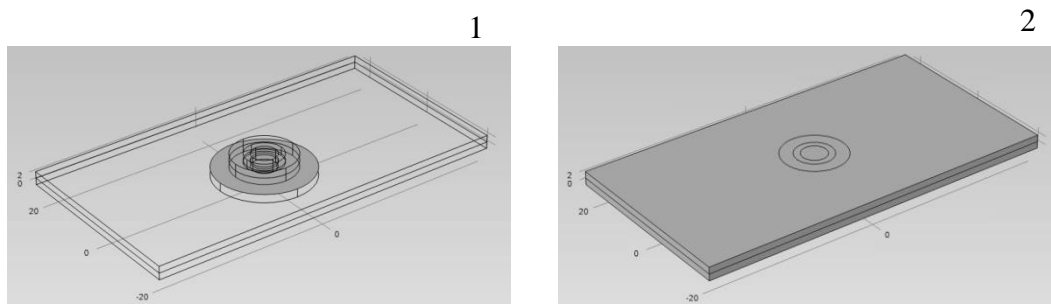


Figura 15 Desenho das chapas e base da máquina no software de simulação COMSOL 4.3

O material utilizado na parte experimental é AA2198 T8, para a simulação foram utilizados os dados de uma liga similar, AA2024, pois a liga Al-Li-Cu é uma tecnologia nova e suas propriedades térmicas não foram disponibilizadas pelo fabricante.

### 3.7.1 Transferência de calor - extração

A transferência de calor no modelo é composta de quatro diferentes formas conforme mostra a Figura 3.7:



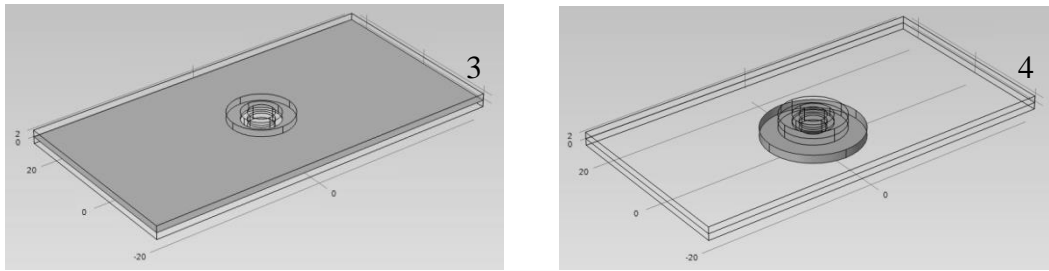


Figura 16 Desenho das chapas e base da máquina no software de simulação COMSOL mostrando os modos de transferência de calor utilizados na simulação.

- 1) Fina camada termicamente resistiva 1 (Thin Thermally Resistive Layer): Entre a chapa de alumínio inferior e o backing plate.
- 2) Resfriamento por convecção 1 (Convective Cooling): Entre a área externa das chapas em contato com o ar.
- 3) Fina camada termicamente resistiva 2 (Thin Thermally Resistive Layer) : Entre as chapas de alumínio inferior e superior.
- 4) Resfriamento por convecção 2 (Convective Cooling): Entre o backing plate e o ar.

### 3.7.2 Dados de entrada

Para fornecer os dados de entrada para a simulação foi necessária uma análise do perfil de temperatura adquirido através dos termopares, isto foi necessário, pois a forma de operação da máquina de soldagem envolve dois acionamentos, entre o início do processo de rotação das ferramentas e o início da soldagem efetivamente, que dependem exclusivamente do operador. Para assegurar que as chapas estavam posicionadas de forma centralizada à máquina alguns segundos extras foram necessários, esta precaução visava evitar a perda de termopares em soldas realizadas de forma descentralizada, já que o termopar central é destruído durante sua remoção como comentado anteriormente.

O valor inicial de temperatura foi de 300K referente à temperatura ambiente. O perfil de temperatura foi dividido em 7 pontos principais conforme Figura 3.8 abaixo:

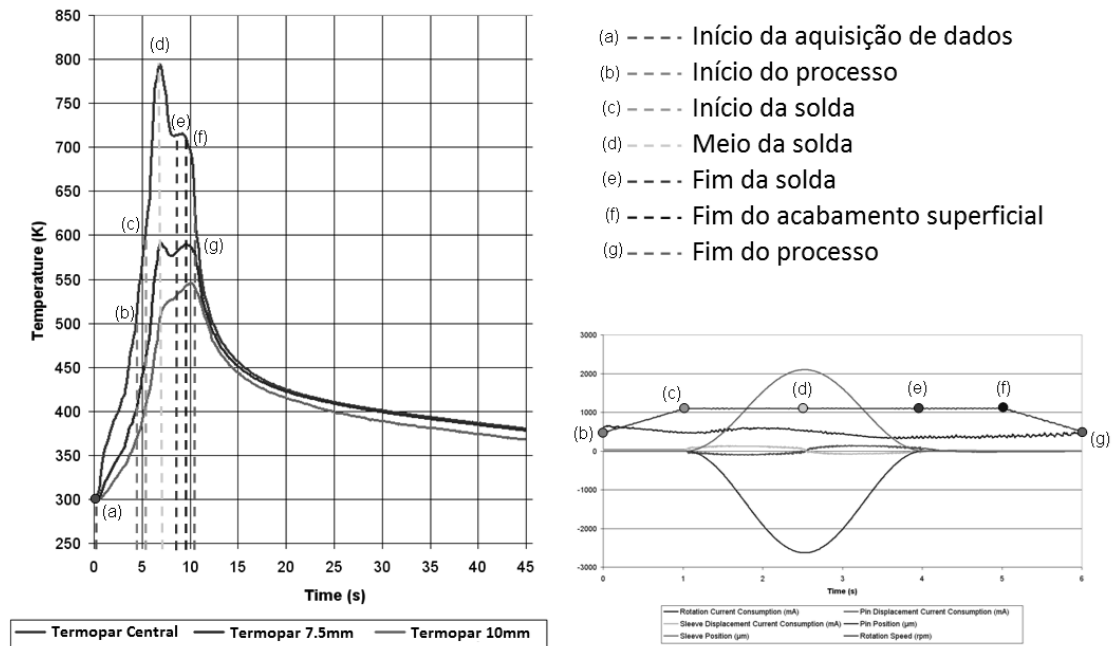


Figura 17 Análise do perfil térmico para coleta de dados para simulação e sua relação com dados adquiridos pelo mScope.

(a-b): Início da aquisição de dados

(b-c): Calor gerado por atrito na interface ferramenta/chapa devido à rotação da ferramenta que aumenta de forma linear até se alcançar a rotação final.

(c-d): Calor gerado pelo atrito na interface ferramenta/chapa devido à rotação da ferramenta e seu deslocamento até atingir a penetração desejada, foi considerado o ponto (d) como ponto de inflexão do movimento da ferramenta por apresentar o maior valor de temperatura, já que este é o momento onde a ferramenta se encontra mais próxima do termopar central.

(d-e): Calor gerado pelo atrito na interface ferramenta/chapa devido à rotação da ferramenta e seu deslocamento até atingir a superfície novamente.

(e-f): Para garantir um bom acabamento superficial à solda a máquina é programada para continuar na mesma velocidade de rotação em que se encontrava durante 1 segundo, período no qual a extremidade da ferramenta ainda está em contato com a chapa.

(f-g): O fim do processo consiste na redução da velocidade de rotação e alívio da pressão do clamping ring que mantém a ferramenta presa à máquina.



Esta análise foi feita considerando que a temperatura mais alta ocorrerá quando a camisa estiver em sua posição mais próxima ao termopar localizado no centro da chapa inferior, a partir deste ponto todos os outros foram estipulados de acordo com os dados de entrada utilizados.

As equações que descrevem o calor aplicado pela ferramenta durante o processo estão descritos a seguir:

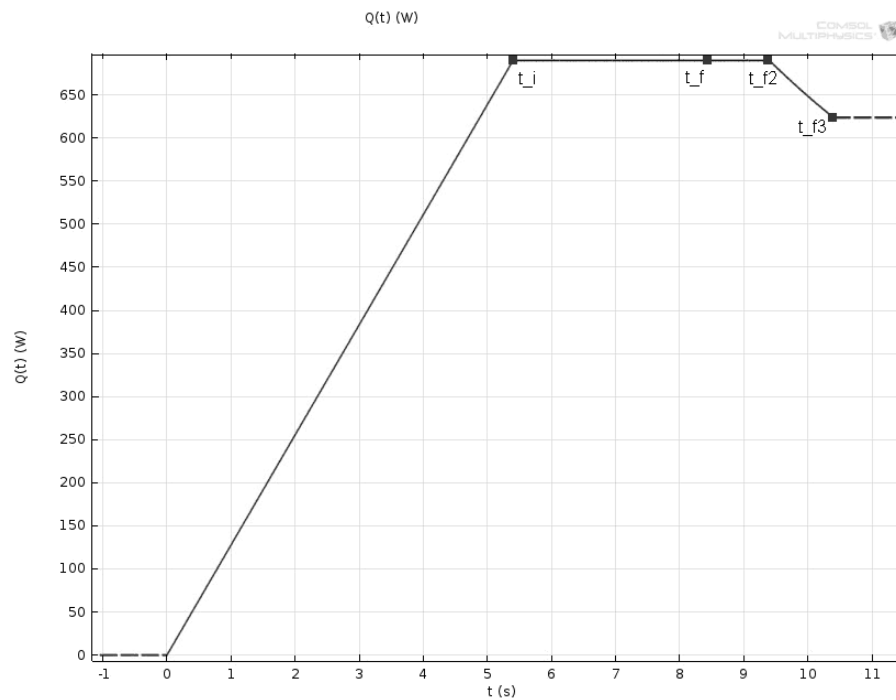


Figura 18 Gráfico indicando a variação do aporte térmico durante a execução da solda.

$$(a) - (c): \quad Q \cdot t / t_i \quad (0 - t_i)$$

$$(c) - (f): \quad Q \quad (t_i - t_{f2})$$

$$(f) - (g): \quad Q \cdot t_{f2} / t \quad (t_{f2} - t_{f3})$$

Como não se tem registro da variação da velocidade de rotação no início do processo a-b foi utilizada uma aproximação levando-se em consideração o aumento linear da velocidade de rotação entre b-c, desta forma o aumento da velocidade de rotação desde o início do processo até o início da solda será considerado linear para simplificação conforme mostra a Figura 3.9.

A propriedades térmicas utilizadas na simulação estão descritas na Tabela 3.3

Tabela 3.3 Propriedades térmicas dos elementos utilizados na simulação.

| Material                                    | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico<br>(J/KgK) | Condutividade<br>Térmica (W/mK) |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Chapa de Alumínio<br>AA2024                 | 2780                              | 875                         | 151                             |
| Aço para base da máquina<br>(0,5%C) a 150°C | 7833                              | 465                         | 40                              |
| Aço ferramenta H13 (5%<br>Cr) a 300°C       | 7833                              | 460                         | 36                              |

### 3.7.3 Fonte de calor:

As regiões responsáveis pela geração de calor geram dois tipos diferentes de fontes de calor que atuam de forma isolada ou simultânea dependendo da posição da ferramenta durante o procedimento conforme mostram as Figuras 3.10 e 3.11.

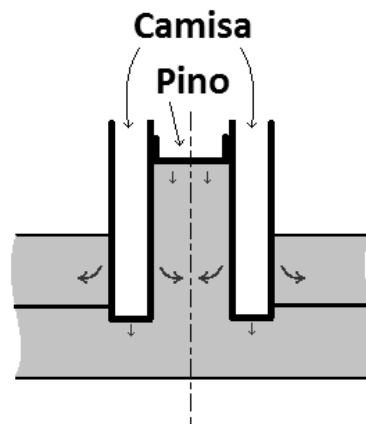


Figura 19 Desenho esquemático da geração de calor na interface ferramenta/peça durante a execução da solda.

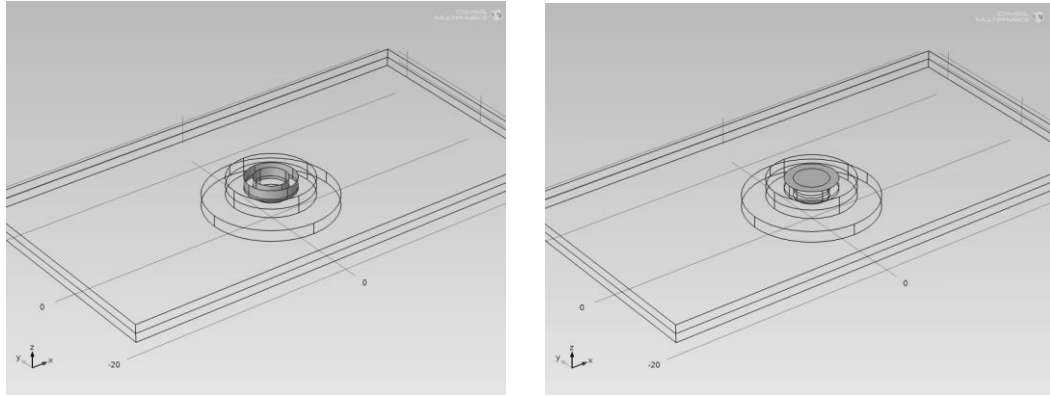


Figura 20 Desenho das chapas indicando as regiões responsável pela geração de calor durante a execução da solda.

O período de duração em que cada fonte de calor atua está descrito na Tabela 3.4

Tabela 3.4 Combinação dos perfis de calor utilizados

| <b>Período</b>                    | <b>Perfil de calor</b>     | <b>Equação</b>     |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 0 - t <sub>i</sub>                | Fluxo de calor             | $Q \cdot t_i$      |
| t <sub>i</sub> - t <sub>f</sub>   | Fonte de calor superficial | Q                  |
|                                   | Fluxo de calor             | Q                  |
| t <sub>f</sub> - t <sub>f2</sub>  | Fluxo de calor             | Q                  |
| t <sub>f2</sub> - t <sub>f3</sub> | Fluxo de calor             | $Q \cdot t_{f2}/t$ |

### 3.8 Ensaio de Cisalhamento

Para executar ensaios de cisalhamento chapas de 1,6 mm de espessura foram cortadas em amostras de 100 mm de comprimento e 24,5 mm de largura, segundo as dimensões definidas pela norma ISO 14273:2000, para a obtenção dos corpos-de-prova para o ensaio de cisalhamento por tração na forma de juntas com 25,4 mm de sobreposição. Os parâmetros de soldagem utilizados foram os mesmos para produzir as primeiras soldas utilizadas para medição de perfil térmico. A Figura 3.12 mostra um desenho esquemático do corpo-de-prova indicando as dimensões citadas.

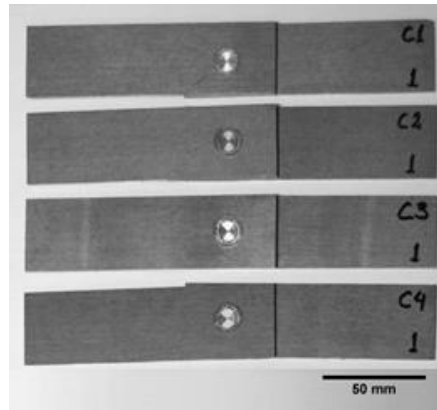


Figura 21 Amostras para execução de ensaio de cisalhamento conforme norma ISO 14273:2000.

Ensaio de cisalhamento por tração foi realizado para a caracterização da resistência mecânica das juntas soldada. Os procedimentos de ensaio foram realizados seguindo a norma DIN EM ISO 14273 utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos Zwick/Roell com capacidade de carga 200 kN, integrada à plataforma operacional TestXpert para obtenção de dados. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente e com uma velocidade constante do travessão (afastamento das garras) de 2 mm/min, com no mínimo três réplicas de cada condição de solda. A máquina de ensaio, assim como, o detalhe da fixação do corpo-de-prova são mostrados na Figura 3.13.



Figura 22 Máquina universal de ensaios mecânicos Zwick/Roell com capacidade de carga 200 kN e detalhe do posicionamento das chapas durante a execução do ensaio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A posição dos termopares foi validada através de macrografia conforme Figura 4.1

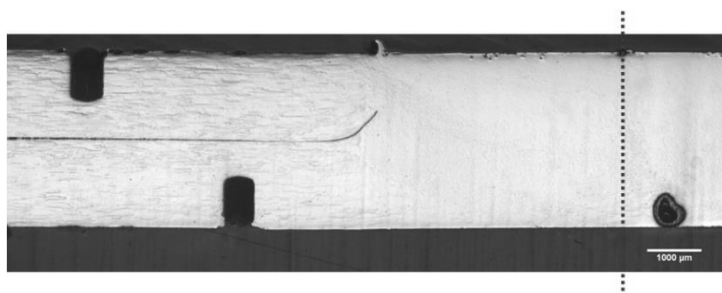


Figura 23 Macrografia da amostra C2 utilizada para validação da posição dos termopares.

Pode-se notar que a posição do termopar central foi alterada, isto ocorre devido ao fluxo de material durante a solda, processo semelhante ao relatado por Tang et al durante ensaios em FSW (TANG 1998). Apesar deste movimento o termopar não foi destruído durante o processo, porém em alguns casos não foi possível a remoção dos mesmos pois houve plastificação da região aonde o termopar se encontrava, fazendo com que sua extremidade aderisse à chapa destruindo o termopar durante a remoção. Outra observação a ser feita é a presença da cunha formada na penetração da camisa.

Os dados de temperatura foram coletados dos seguintes pontos na simulação conforme Figura 4.2:



Figura 24 Pontos localizados na posição ocupada pelos termopares, utilizados para coletar dados para produzir o perfil térmico no software COMSOL 4.3.

O aporte térmico capaz de gerar um perfil térmico da mesma ordem do perfil real para cada uma das soldas está relacionado na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 Aporte térmico utilizado para cada velocidade de rotação

| Amostra | Velocidade de rotação (rpm) | Aporte Térmico (W) |
|---------|-----------------------------|--------------------|
| C1      | 1100                        | 690                |
| C2      | 1100                        | 690                |
| C3      | 1300                        | 740                |
| C4      | 1500                        | 760                |

O perfil térmico obtido para cada uma das amostras pode ser verificado nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. O critério utilizado para a determinação do aporte térmico está baseado no pico de temperatura obtido pelo termopar central, o aporte térmico mais adequado é aquele que gera um pico de temperatura semelhante ao real.

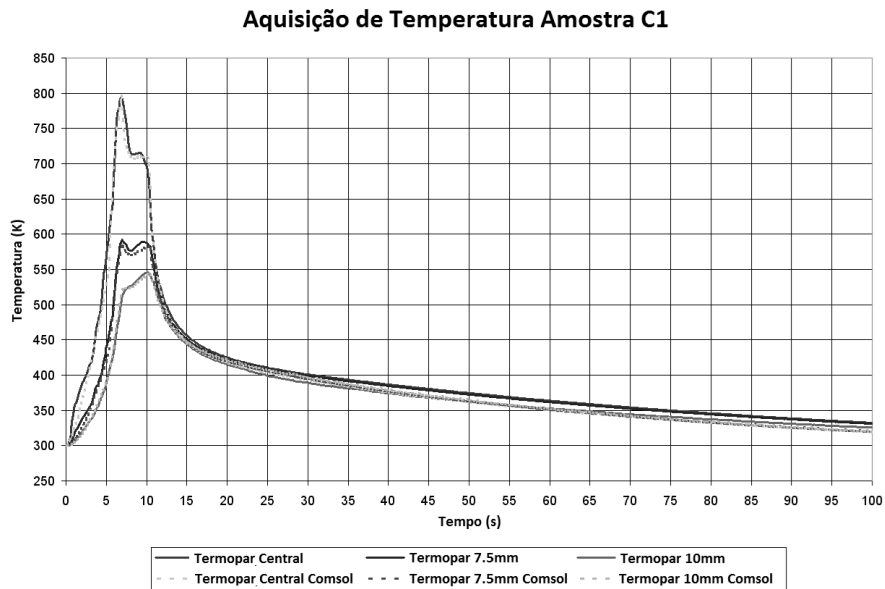


Figura 25 Comparação do perfil térmico real da amostra C1 com o perfil obtido por simulação.

### Aquisição de Temperatura Amostra C2

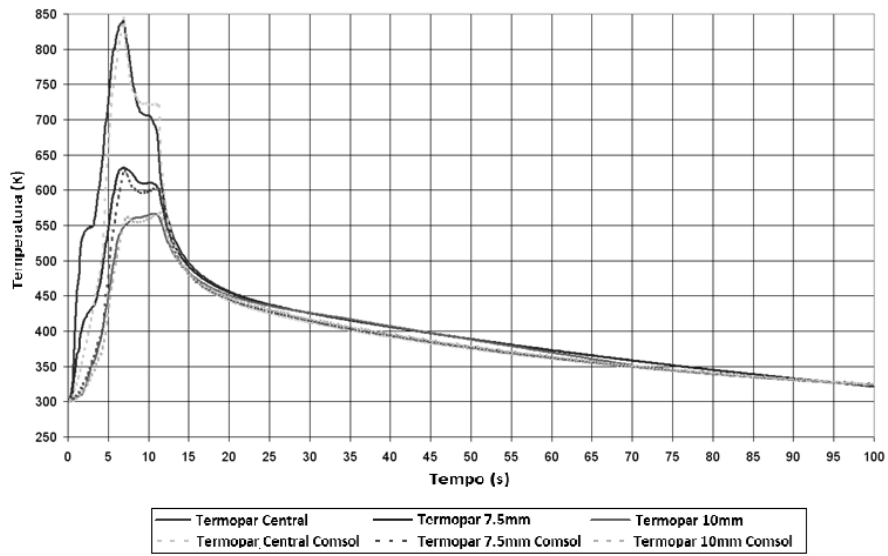


Figura 26 Comparação do perfil térmico real da amostra C2 com o perfil obtido por simulação.

### Aquisição de Temperatura Amostra C3

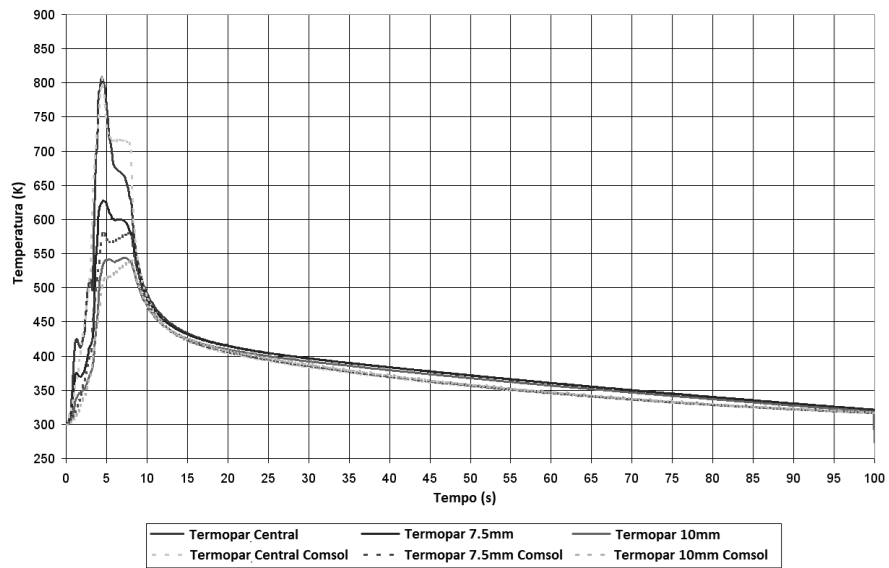


Figura 27 Comparação do perfil térmico real da amostra C3 com o perfil obtido por simulação.

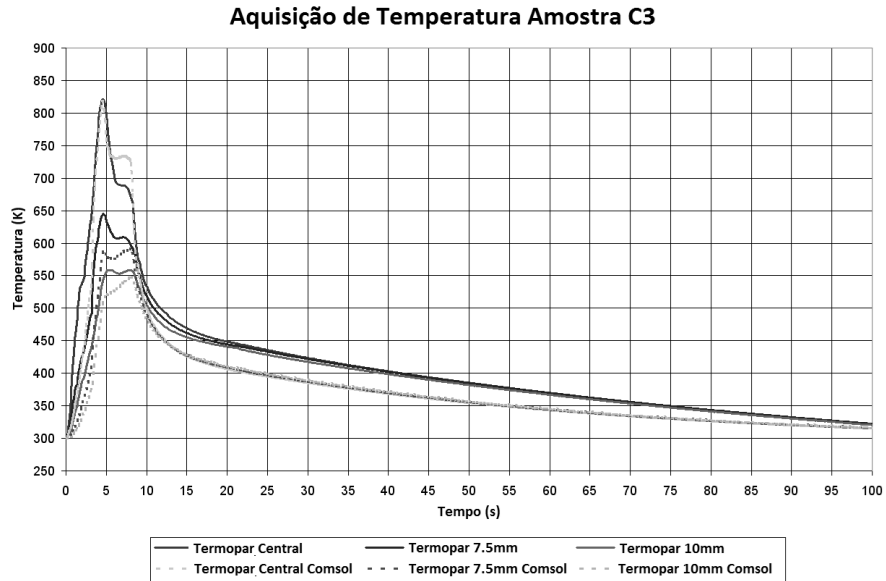


Figura 28 Comparação do perfil térmico real da amostra C4 com o perfil obtido por simulação.

Os dados obtidos pelo software também podem ser plotados na forma de imagens que nos mostram a distribuição de temperatura na superfície da amostra (Figura 4.6), o gradiente de temperatura (Figura 4.7) e o fluxo de calor (Figura 4.8)

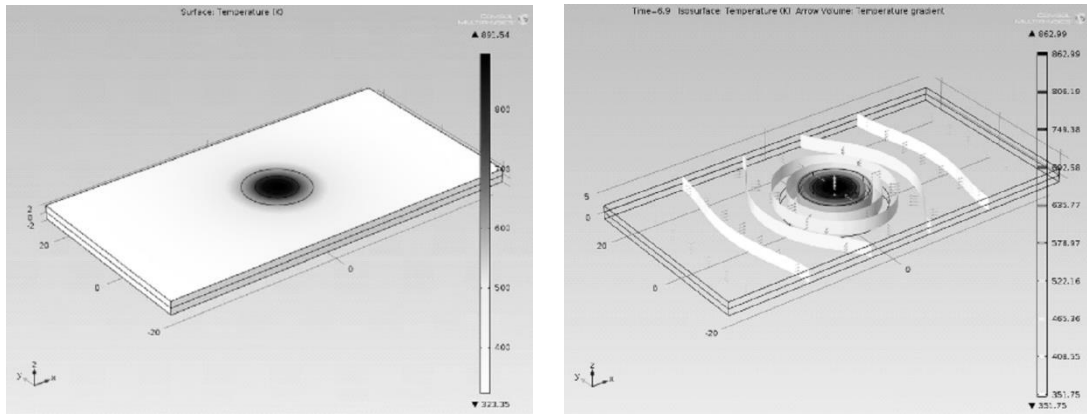


Figura 29 Distribuição de temperatura na superfície da chapa e isotermas de temperatura ao longo da chapa.



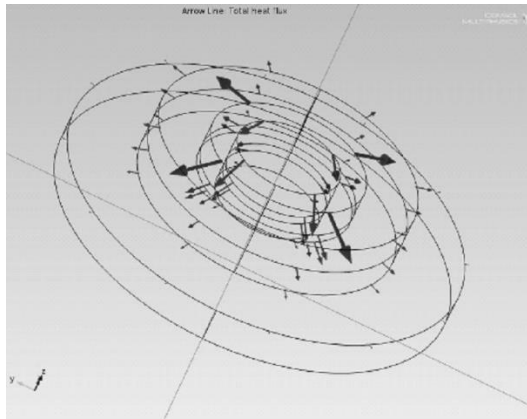


Figura 30 Setas indicando a direção e intensidade do fluxo de calor.

Quando um regime de fricção é aplicado, a geração de calor atinge um patamar em velocidades de rotação elevadas, o que é semelhante ao efeito observado com soldas FSW (LIECHTY 2008). Este patamar pode ser observado na Figura 4.9, que mostra uma redução do aumento do aporte térmico conforme se aumenta a velocidade de rotação. A razão para o este patamar é devido à limitação imposta pela temperatura sólidos, onde este amolecimento está incluído no comportamento constitutivo do material, ou seja, aumentando a velocidade de rotação aumenta a quantidade de amolecimento do material e não causa qualquer geração calor adicional (WANG 2013)

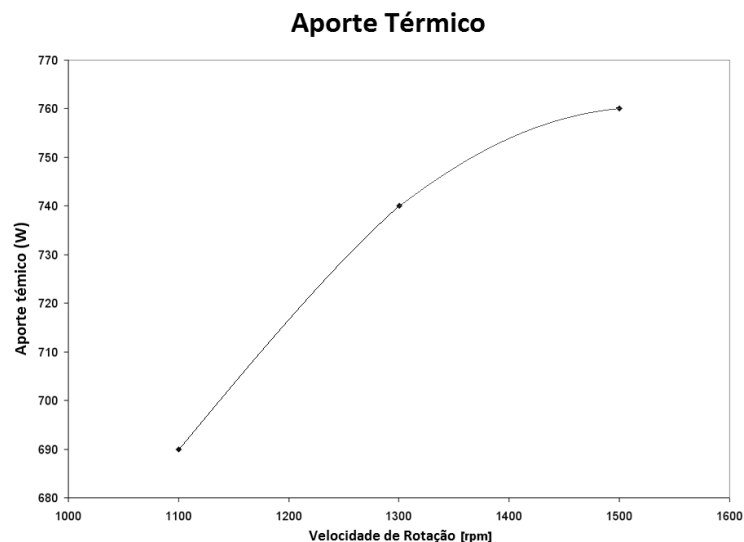


Figura 31 Gráfico da relação entre o aporte térmico e a velocidade de rotação utilizada mostrando a tendência a se estabelecer um platô de aporte térmico.

Os dados de resistência ao cisalhamento nos mostram que para estas soldas em FSpW uma área soldada maior não corresponde a uma resistência maior ao contrário do

que estudos em FSSW sugerem (GERLICH 2006). Este fato pode ser explicado pela formação de uma cunha cujo comprimento está relacionado com a energia de soldagem utilizada (PARRA 2011). Esta cunha age como uma trinca pré-existente e quanto maior e mais afiada menor será a resistência da junta.

Tabela 4.2 Relação entre parâmetros de soldagem e Força de Cisalhamento.

| Condição de soldagem | Velocidade de rotação [rpm] | Tempo de permanência [s] | Profundidade de Penetração [mm] | Força de Cisalhamento [kN] |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| C1                   | 1100                        | 3                        | 2.1                             | 10,52                      |
| C2                   | 1100                        | 5                        | 2.8                             | 5,10                       |
| C3                   | 1300                        | 3                        | 2.6                             | 8,73                       |
| C4                   | 1500                        | 3                        | 2.8                             | 7,11                       |

A temperatura também se apresenta como fator de grande influência sobre a resistência à tração das juntas, pois fases formadas, presença de precipitados e tamanho de grão são influenciadas pela temperatura. Para este estudo a resistência ao cisalhamento se mostrou proporcional ao inverso da temperatura, ou seja, a solda que atingiu menor pico de temperatura foi aquela que apresentou maior resistência ao cisalhamento, este comportamento pode ser verificado na Figura 4.10.

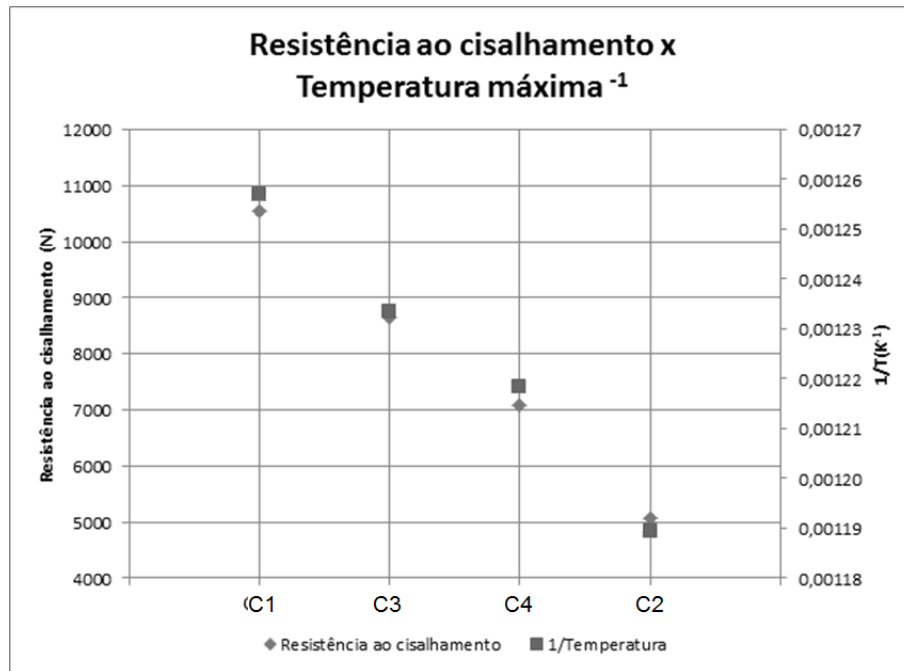


Figura 32 Gráfico mostrando a relação entre resistência ao cisalhamento e o inverso da temperatura de pico das soldas. Pelo gráfico podemos concluir que a solda que atingiu menor pico de temperatura foi aquela que apresentou maior resistência ao cisalhamento.

## 5 CONCLUSÕES

- Um modelo numérico simplificado foi desenvolvido e se mostrou capaz de reproduzir o perfil térmico real fornecendo valores de aporte térmico para cada velocidade de rotação.
- A intensidade do aporte térmico varia em função da rotação nos instantes inicial e final de cada solda, quando a velocidade de rotação também varia.
- O aporte térmico cresce com o aumento da velocidade de rotação e tende a um platô conforme o material amolece e a geração de calor diminui.
- Foi verificada uma relação entre o pico de temperatura atingida durante o processo e a resistência ao cisalhamento, indicando que quanto maior for a temperatura menor será a resistência da junta.
- As juntas com maior área soldada apresentaram a menor resistência ao cisalhamento indicando que outros mecanismos atuam de forma mais influente na resistência mecânica destas soldas.

## **6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Análises metalográficas das juntas revelando fases formadas e possíveis defeitos.
- Realizar ensaios de fadiga para verificar o comportamento das juntas sob esta condição.

## 7 REFERÊNCIAS

<http://www.aluminum.org/product-markets/aircraft-aerospace> Acesso em 11 Nov. 2014.

RIOJA, Roberto J.; LIU, John. **The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications**. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 43, Issue 9, pp 3325-3337, September 2012.

QUIST, W.E. et al. **Aluminum-Lithium Alloys II**, TMS-AIME, p. 313, 1984.

GIUMMARRA, Cindie. et al. **New aluminum lithium alloys for aerospace applications**. Proceedings of the Light Metals Technology Conference, 2007.

KNÜWER, M. et al. **2198-Advanced aluminum–lithium alloy for A350 skin sheet application**. In: Presentation for the 17th AeroMat Conference & Exposition, Seattle, USA; p. 1–27, 2006.

CHEN, Jianqiang. et al. **Plastic flow and ductile rupture of a 2198 Al–Cu–Li aluminum alloy**. Computational Materials Science Volume 50, Issue 4, Pg 1365–1371, Fevereiro 2011.

CAVALIERE, P. et al. **Effect of anisotropy on fatigue properties of 2198 Al–Li plates joined by friction stir welding**. Eng. Fail. Anal., pp. 1856–1865, 2009.

MA, Yu. et al. **Mechanical properties and fatigue crack growth rates in friction stir welded nugget of 2198-T8 Al–Li alloy joints**. Materials Science and Engineering: A Volume 569, 1, Pg 41–47, Maio 2013.

VOGELESANG, L.B.; VLOT, A. **Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures.** J Mater Proc Tech, 103, pp. 1–5, 2000.

ALEXOPOULOS, Nikolaos D. et al. **Fatigue behavior of the aeronautical Al–Li (2198) aluminum alloy under constant amplitude loading** International Journal of Fatigue Volume 56, Pages 95–105, Novembro 2013.

BITONDO, C. et al. **Friction stir welding of AA2198-T3 butt joints for aeronautical applications** Int J Mater Form, 3, pp. 1079–1082, 2010.

ASTARITA, A. et al. **On the critical technological issues of friction stir welding T-joints of dissimilar aluminum alloys** J Mater Eng Perf, 21, pp. 1763–1771, 2012.

CHEN, J. et al. **Plastic flow and ductile rupture of a 2198 Al–Cu–Li aluminum alloy** Comp Mater Sci, 50, pp. 1365–1371, 2011.

STEGLICH, D. et al. **Anisotropic deformation and damage in aluminium 2198 T8 sheets** Int J Damage Mech, 19, pp. 131–152, 2010.

VARIS, J. **Economics of clinched joint compared ro riveted joint and exemple of applying calculations to volume product.** Journal of Materials Science and Technology 172, pp 130-138, 2006.

DAWES, C.J.; THOMAS, W.M. **Friction stir process welds aluminum alloys.** Weld J, 75, pp. 41–45, 1996.

<http://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-are-unweldable-aluminum-alloys.cfm>  
Acesso 030 Nov. 2014.

GHEORGHE, J. **Welded aluminum alloy structure.** WO 2004041468 A2, 2004

THOMAS, W.M.; NICHOLAS, E.D.; NEEDHAM, J.D.; MURCH, M.G.;  
TEMPLESMITH, P.; DAWES, C.J. **GB. Patente Application 9125978.8 Dec 1991;** US  
Patent Application 5460317, Outubro 1995.

NANDAN, R. et al. **Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties.** Prog Mater Sci 53(6):980–1023, 2008.

MISHRA, R.S.; MA, Z.Y. **Friction stir welding and processing.** Mater Sci Engng R, 50, pp. 1–78, 2005.

IWASHITA T. **Method and Apparatus for Joining.** US Patent 6601751 B2, Aug 2003.

OKAMOTO, K. et al. **Development of Friction Stir Welding Technique and Machine for Sheet Metal Assembly.** SAE Paper No. 2005–01-1254, 2005.

SCHILLING, C.; DOS SANTOS, J. F. **Method and Device for Linking at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding.** US Patent Application 2002/0179682.WO/2001/036144,25<sup>th</sup>, Maio 2005.

ROSENDO, Tonilson; **Estudo do desempenho mecânico de soldas ponto por fricção (FSpW) da liga AA6181-T4.**Tese. PPGEM:UFRGS, 2009.

ROSENDO, T. et al. **Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181- T4 aluminium alloy.** Mater Des; 32:1094–100, 2011.

MAZZAFERRO, J.A. et al. **Preliminary Study on the Mechanical Behavior of Friction Spot Welds.** Soldag. insp. vol.14 no.3 São Paulo July/Sept. 2009.

UEMATSU, Y. et al. **Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy.** Int J Fract; 30:1956–66, 2008.

ARBEGAST, WJ. et al. **An investigation of friction spot welding of thin aluminium sheets.** Proceedings of the 15th Aeromat, Seattle, USA; June 7–10, 2004.

ZHAO, Y.Q. et al. **Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy.** Materials & Design Volume 62, Pages 40–46; October 2014.



WANG, H. et al. **Numerical investigation of the tool contact condition during friction stir welding of aerospace aluminium alloy.** Computational Materials Science 71, 101–108, 2013.

GERLICH, A. et al. **Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding.** Metallurgical Transactions, May 18, 2006.

KHANDKAR, M.Z.H. et al. **Predictions of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model** Science and Technology of Welding and Joining, 8 (3), pp. 165–174, 2003

SONG, M.; KOVACEVIC, R. **Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation,** Int. J. Mach. Tools Manuf. 43 (6) 605–615, 2003

YANG, Ching-Yu. **Inverse determination of heat input during the friction stir welding process.** International Journal of Heat and Mass Transfer 76 411–418, 2014.

PARRA, B. et al. **An investigation on friction spot welding in aa6181-t4 alloy.** Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 3, p. 184-190, jul.-set. 2011.

BADARINARAYAN, H. et al. **Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets.** International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 49, Issue 11, Pages 814–823, September 2009.

YIN, Y.H. et al. **Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds.** Journal of Materials Processing Technology Volume 210, Issue 14, 1, Pages 2062–2070, November 2010.

AMANCIO, S.T. et al. **Preliminary Investigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminium Alloy Friction Spot Welds.** Materials Transactions. Vol. 52, No. 5, pp. 985 to 991, 2011.

SU, P. et al. **Energy Utilization and Generation during Friction Stir Spot Welding**, *Sci. and Tech. of Welding and Joining*, Vol. 11(2), pp. 163-166; 2006.

MCCLURE, J.C. et al. **A Thermal Model of Friction Stir Welding**. Proceedings 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, Georgia, June 1998.

TANG, W. et al. **Heat input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding**. *J Mater Process Manuf Sci*, 7(2):163-172, 1998.

LIECHTY, B.C.; WEBB, B.W.. **Modeling the Frictional Boundary Condition in Friction Stir Welding**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 1474–1485, 2008.