



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Eduardo Junqueira Gabaldo

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DO PROCESSO EM  
SOLDADURA POR FSW DE CHAPAS DE  
ALUMÍNIO COM ELEVADA ESPESSURA**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de  
Produção e Projeto orientada pelo Doutor David Gomes Andrade e pelo Professor  
Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão e apresentada ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra

Julho de 2023



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Análise das condições do processo em soldadura FSW de chapas de alumínio com elevada espessura**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Produção e Projeto

## **Analyses of process conditions in FSW welding of thick aluminum plates**

**Autor**

**Eduardo Junqueira Gabaldo**

**Orientadores**

**David Gomes Andrade**

**Carlos Miguel Almeida Leitão**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Nataliya Sakharova</b> Investigadora na Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Doutor David Gomes Andrade</b> Investigador na Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues</b> Professora Associada com Agregação da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho, 2023**

Ao meu pai, Silvio José Gabaldo

## Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de agradecer.

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Doutor David Gomes Andrade e Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão, pelos ensinamentos e apoio durante todo o decorrer deste projeto. Agradeço ao conhecimento passado acerca do tema desta dissertação e, principalmente, à metodologia de pesquisa e cuidados ao redigir um trabalho desta magnitude.

Agradeço aos meus novos amigos de gabinete pelo apoio e conselhos durante os dias longos de trabalho no laboratório.

Agradeço às amizades criadas na cidade de Coimbra, principalmente à equipe e amigos do Izakaya Oni: Otávio, Júlia, Matheus, Edivaldo, Carol, Mari e Pedro, todos cruciais na minha primeira jornada fora de casa. E também aos meus velhos amigos Diego, Paulo e Lucas.

Agradeço às minhas famílias de Portugal e do Brasil. Minha maravilhosa mãe Silvia, sem você nada disso seria possível, e minha irmã Letícia, pelo apoio e aulas de inglês nos momentos importantes. Assim como todas as tias, tios e primos que me apoiaram de tão longe. Agradeço especialmente à minha companheira Yasmin por esses primeiros anos vivendo juntos e pelo incentivo inicial, para que eu realizasse esse curso, e ao nosso gato Maji. E também à nova família que ganhei aqui: Priscila, Felipe, Beni, Raimundo, Helena, Luiz, Sr. Adelino e dona Alice.

Por último, agradeço ao meu pai, Silvio, por todos os ensinamentos durante minha vida.



## Resumo

Na presente dissertação foi estudada a influência dos principais parâmetros no processo de soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW) de chapas de alumínio de elevada espessura. Para isso, foram realizadas simulações de soldadura topo a topo em chapas de 10mm de espessura das ligas de alumínio AA2017-T451, AA5083-H111, AA6082-T651 e AA7075-T651. Foram utilizadas duas ferramentas diferentes, alterando-se a velocidade de rotação entre 660rpm e 1140rpm e velocidade de avanço entre 300mm/min, 600mm/min e 900mm/min para cada amostra.

Foram coletados dados de binário e força axial na ferramenta durante a etapa de penetração no material base e durante a movimentação linear da ferramenta, utilizando o próprio equipamento que realizou a soldadura. A temperatura foi coletada utilizando uma câmara termográfica. A partir destas informações, foi possível relacionar os 3 *outputs* com os parâmetros utilizados em cada amostra, determinando a influência de cada um no processo. Por fim, foram realizadas análises da macroestrutura da soldadura em seções transversais de algumas amostras selecionadas.

Foi possível observar a diminuição da temperatura do processo com aumento da velocidade de avanço, assim como a diminuição do binário com o aumento da velocidade de rotação e a diminuição da velocidade de avanço e, por fim, aumento da força axial com o aumento da velocidade de avanço.

Analisando a seção transversal algumas amostras selecionadas, observaram-se maiores zonas de mistura em amostras que obtiveram temperaturas mais elevadas durante a movimentação linear da ferramenta. A utilização de uma ferramenta com pino apresentou diminuição do binário e força axial e pouca influência nos valores de temperatura.

**Palavras-chave:** FSW, alumínio, temperatura, binário, força axial, macroestrutura

## Abstract

In the present dissertation the influence of the main processes parameters of Friction Stir Welding (FSW) of thick aluminum plates was studied. Welds in butt configuration were simulated (Bead on plate) in 10mm thick plates of AA2017-T451, AA5082-H111, AA6083-T651 and AA7075-T651 aluminum alloys. Two different tools were used, changing de rotation speed between 660rpm and 1140rpm and travel speed between 300mm/min, 600mm/min and 900mm/min for each sample.

Torque and axial force data were collected during the penetration phase into the base material and during the linear movement of the tool by the same equipment responsible for performing the welds. The temperature was collected using a thermographic camera. From this data it was possible to relate the three outputs analyzed with the process parameters used in each sample, and determine its influence. At last, macrostructure analyses on the cross section of selected samples were conducted.

It was possible to observe a decrease in the process temperature with an increase in the travel speed, as well as a decrease in torque with increasing rotational speed and decreasing the travel speed and, finally, increase of the axial force with the increase of the travel speed, and no significant influence of the rotation speed.

Analyzing the cross section of these selected samples, larger stirring zones were observed in samples that had higher temperatures during the linear movement of the tool. The use of a tool with a pin also showed no significant influence in temperature values and a decrease in torque and axial force.

**Keywords:** FSW, aluminium, temperature, torque, axial force, macrostructure.



## Índice

Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e Siglas .....	x
Simbologia.....	x
Siglas x	
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1. <i>Friction Stir Welding</i> (FSW) .....	3
2.2. Evolução da temperatura e do binário .....	7
2.3. Macroestrutura .....	9
2.4. Material base.....	10
3. Materiais e métodos.....	12
3.1. Ferramentas.....	12
3.2. Materiais Base.....	12
3.3. Parâmetros de soldadura .....	13
3.4. Aquisição de dados .....	14
3.5. Preparação das amostras .....	15
4. Resultados.....	17
4.1. <i>Outputs</i> de temperatura, binário e força axial.....	17
4.2. Evolução da temperatura .....	20
4.3. Evolução do binário .....	22
4.4. Evolução da força axial.....	25
4.5. Influência da geometria da ferramenta .....	27
4.6. Macroestrutura .....	30
4.6.1. AA2017 .....	31
4.6.2. AA5083 .....	33
4.6.3. AA6082 .....	35
4.6.4. AA7075 .....	36
5. Conclusões e trabalhos futuros .....	38
5.1. Conclusões .....	38
5.2. Trabalhos futuros .....	39
Referencias Bibliográficas.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Ilustração das etapas de (a) penetração da ferramenta, (b) dwell stage, (c) realização da soldadura, (d) retirada da ferramenta (adaptada de [7]).	4
Figura 2-2 - Ilustração (a) geral do processo FSW e (b) detalhes da penetração da ferramenta e seus parâmetros (adaptado de [12]).	5
Figura 2-3 - Configurações de juntas possíveis: (a) topo-a-topo, (b) angulo em L, (c) angulo em T, (d) sobreposta, (e) sobreposta múltipla, (f) sobreposta em T, (g) de filete (adaptado de [10]).	5
Figura 2-4 – Distribuição de temperatura na condição de (a) escorregamento total, (b) escorregamento-aderência e (c) aderência total (adaptado de [19]).	8
Figura 2-5 - Seção transversal de soldadura FSW em AA7050 indicando as zonas de microestrutura (adaptada de [28]).	10
Figura 2-6 - Defeitos de a) superfície b) excesso de rebarba e c) internos (adaptado de [30]).	11
Figura 3-1 - Ferramenta a) PL12 e b) CL6.	12
Figura 3-2 - Representação do esquema para aquisição de temperatura.	15
Figura 4-1 – Evolução da temperatura, binário e força axial para amostras de AA2017 a a)660rpm-300mm/min, b)660rpm-900mm/min, c)1140rpm-300mm/min, d)1140rpm-900mm/min.	18
Figura 4-2 - Evolução da temperatura, binário e força axial para amostras utilizando a ferramenta CL6 das ligas a) AA2017, b)AA5083, c)AA6082 e d)AA7075.	19
Figura 4-3 - Evolução da temperatura de manutenção em função das velocidades de rotação e avanço para as ligas a)AA2017, b)AA5083, c)AA6082 e d)AA7075.	21
Figura 4-4 - Comparação da <b>Tml</b> em função da velocidade de avanço das ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.	22
Figura 4-5 - Evolução do <b>Mml</b> e <b>Mpen</b> para as velocidades de rotação 660rpm e 1140 rpm em função da velocidade de avanço para as quatro ligas.	23
Figura 4-6 - Comparação do <b>Mml</b> e <b>Mpen</b> em função da velocidade de avanço das ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.	24
Figura 4-7 - Evolução do <b>Fml</b> e <b>Fpen</b> para as velocidades de rotação 660rpm e 1140 rpm em função da velocidade de avanço para as quatro ligas.	26
Figura 4-8 - Comparação da <b>Fml</b> e <b>Fpen</b> em função da velocidade de avanço entre ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.	27
Figura 4-9 - Comparação das <b>Tml</b> utilizando as ferramentas CL6 e PL12 para as ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075.	28

Figura 4-10 - Comparação de binário e força axial utilizando as ferramentas CL6 e PL12 para as ligas a)AA2017, b)AA5083, c)AA6082 e d)AA7075. ....	29
Figura 4-11 - Seção transversal da amostra P2_600_900 com medições da espessura total da chapa e distância entre a ZM e face inferior da amostra. ....	31
Figura 4-12 - Seção transversal com ataque químico das amostras a) P2_660_300, b) P2_660_900, c) P2_1140_300 e d) P2_1140_900. ....	32
Figura 4-13 - Profundidades da ZM em AA2017 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de <b><i>Tml</i></b> , <b><i>Mml</i></b> , e <b><i>Fml</i></b> . ....	33
Figura 4-14 - Seção transversal com ataque químico das amostras a) P5_660_300, b) P5_660_900, c) P5_1140_300 e d) P5_1140_900. ....	34
Figura 4-15 - Profundidades da ZM em AA5083 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura. ....	34
Figura 4-16 - Seção transversal com ataque químico das amostras a) P6_660_300, b) P6_660_900, c) P6_1140_300 e d) P6_1140_900. ....	35
Figura 4-17 - Profundidades da ZM em AA6082 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura. ....	36
Figura 4-18 - Seção transversal com ataque químico das amostras a) P7_660_300, b) P7_660_900, c) P7_1140_300 e d) P7_1140_900. ....	37
Figura 4-19 - Profundidades da ZM em AA7075 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura. ....	37

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 – Constituição química dos materiais base (% ponderal). .....	13
Tabela 3-2 - Propriedades mecânicas dos materiais base.....	13
Tabela 3-3 - Parâmetros dos testes realizados e nomenclatura das amostras.....	14
Tabela 3-4. Amostras selecionadas para análise. ....	16
Tabela 3-5 - Tempo de ataque para cada amostra. ....	16

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

- $F_{ml}$  – Força durante a fase de movimentação linear  
 $F_{pen}$  – Força durante a fase de penetração  
 $M_{ml}$  – Binário durante a fase de movimentação linear  
 $M_{pen}$  – Binário durante a fase de penetração  
 $T_{ml}$  – Temperatura durante a fase de movimentação linear  
 $T_{pen}$  – Temperatura durante a fase de penetração  
 $dz$  – Profundidade de penetração  
 $v$  – Velocidade de avanço  
 $\alpha$  – Ângulo de ataque  
 $\omega$  – Velocidade de rotação

### Siglas

- DEM – Departamento de Engenharia Mecânica  
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
FSW – *Friction Stir Welding*  
MB – Material base  
TAFW - *Tool Assisted Friction Welding*  
TWI – *The Welding Institute*  
ZM – Zona de mistura  
ZTA – Zona termicamente afetada  
ZTMA – Zona termo mecanicamente afetada

## 1. INTRODUÇÃO

*Friction Stir Welding* (FSW) é uma tecnologia de soldadura no estado sólido desenvolvida por Wayne Thomas, em 1991 no *The Welding Institute* (TWI). O processo baseia-se na união mecânica dos componentes através da mistura do material base, sem atingir o seu ponto de fusão, resultando em temperaturas inferiores às dos processos mais convencionais. Utilizando FSW é possível realizar soldaduras lineares em diversos tipos de geometria e espessuras.

A ferramenta convencional para este processo, composta por base e pino, pode ser substituída por outra com extremidade plana sem pino. Esta mudança apresenta diversas vantagens em comparação à ferramenta tradicional, visto que diminui o fluxo de material e elimina o orifício deixado pelo pino aquando do final do processo, o que origina uma região de grande concentração de tensões.

Para melhor controle do processo, é fundamental um bom entendimento da influência que seus parâmetros iniciais têm na qualidade da soldadura. Visando este objetivo, foram realizadas soldaduras lineares, em controlo de posição, utilizando duas ferramentas diferentes (PL12 sem pino e CL6 com pino) em três ligas de alumínio tratável termicamente (AA2017, AA6083, AA7075) e uma não tratável termicamente (AA5082).

Foram coletados dados referentes ao binário e força axial na ferramenta, pelo próprio equipamento que realizou a soldadura, e os ciclos térmicos utilizando uma câmara termográfica. A coleta e análise destes dados possibilita melhor controlo e monitoramento do processo de soldadura.

Permaneceram constantes a espessura das chapas, o ângulo de ataque da ferramenta, o comprimento da soldadura e a profundidade de penetração, variando apenas para os testes com a ferramenta CL6. Os parâmetros alterados para cada amostra foram a velocidade de rotação entre 660rpm e 1140rpm e de avanço da ferramenta, entre 300mm/min, 600mm/min e 900mm/min. Estes parâmetros, referentes às movimentações da ferramenta possuem grande influência na geração de calor durante o processo, sendo a velocidade de rotação diretamente ligada à quantidade de calor gerado e a velocidade de avanço ao tempo de dissipação desse calor pelo material base.

A utilização de mais de uma liga de alumínio para os mesmos parâmetros de soldadura possibilita maior entendimento da influência de suas propriedades mecânicas no processo de FSW. Por se tratar de um processo termomecânico, o comportamento em deformação plástica de cada material é de extrema importância para a formação da soldadura.

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, sendo o capítulo 1 a presente introdução, seguido de uma revisão bibliográfica acerca da tecnologia FSW no capítulo 2. No capítulo 3 é apresentado o experimento realizado. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados e, por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como finalidade apresentar o atual estado da arte referente ao processo de soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW) utilizado nos experimentos deste trabalho.

### 2.1. *Friction Stir Welding* (FSW)

O FSW trata-se de um processo de soldadura no estado sólido, originalmente desenvolvido para ligação de componentes de alumínio [1]. Como o material permanece sólido, esta tecnologia pode ser aplicada às principais ligas de alumínio no mercado, evitando problemas de fissuração, porosidades e outros defeitos relacionados à fusão deste material [2].

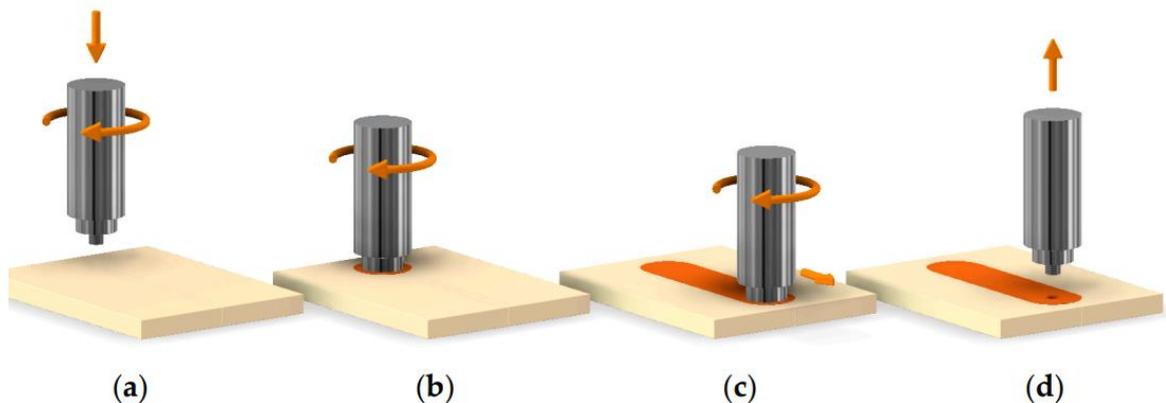
Tornou-se uma tecnologia de grande importância para a indústria devido à capacidade de realizar soldaduras em materiais similares ou dissimilares não soldáveis por fusão. Comumente utilizada nas indústrias de transporte, seja aeroespacial, naval ou automotiva, sendo a última responsável pelo maior número de estudos científicos no assunto [3]. É considerada uma tecnologia “verde” por não utilizar material de adição ou gases de proteção, além de não gerar fumos ou subprodutos nocivos ao operador e ao meio ambiente [4].

Para a realização da soldadura, uma ferramenta rotacional não consumível, composta por base e pino, penetra o material na interface dos componentes que se deseja soldar. O contato da base da ferramenta com a superfície dos materiais gera calor por atrito enquanto que o pino promove a maioria da mistura [5]. A geometria da ferramenta afeta a taxa de geração de calor, esforços na ferramenta, e o fluxo de material [6]. As configurações mais comuns para a base da ferramenta são planas, com ou sem estrias, concava e convexa. O pino, por sua vez, é comumente classificado como cilíndrico, cônico, triangular ou facetado, podendo apresentar roscas ou estrias.

Usualmente as soldaduras são realizadas com controle de força, mantendo a força axial na ferramenta constante, ou em controle de posição, mantendo constante a profundidade de penetração da ferramenta no material base.

O processo de realização da soldadura pode ser dividido em quatro etapas. Após a penetração da ferramenta, a primeira etapa, segue uma etapa transiente, chamada de *dwell stage*, para atingir o aquecimento e condições favoráveis para realização da soldadura. Em

seguida se inicia o movimento linear da ferramenta até completar a processo, sendo retirada verticalmente na última etapa. A Figura 2-1 ilustra as quatro etapas do processo: (a) penetração da ferramenta, (b) *dwell stage*, (c) realização da soldadura linear e por fim (d) retirada da ferramenta.



**Figura 2-1** - Ilustração das etapas de (a) penetração da ferramenta, (b) *dwell stage*, (c) realização da soldadura, (d) retirada da ferramenta (adaptada de [7]).

Durante o deslocamento, o lado do material base em que o movimento de rotação e translação possuem o mesmo sentido é chamado de lado em avanço, enquanto o que apresenta sentido contrário é chamado de lado em recuo. A Figura 2-2 apresenta uma ilustração representando os principais parâmetros do processo. Esta diferença de sollicitação do material base resulta em diferentes distribuições de calor nessas regiões [8]. Foram observadas temperaturas levemente superiores no lado em avanço comparadas com o lado em recuo, para soldaduras em AA7075-T651[9].

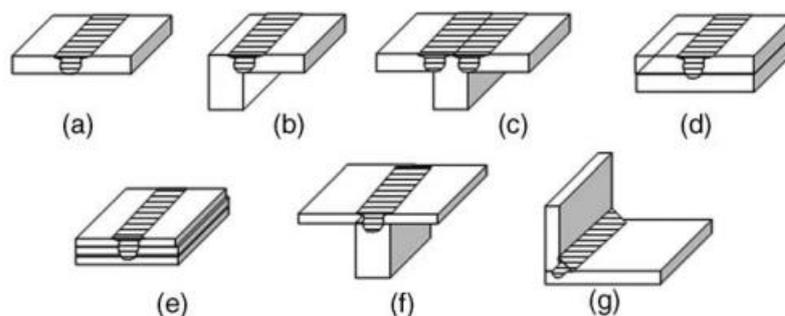
Os parâmetros mais influentes do processo podem ser divididos em parâmetros estáticos e dinâmicos. Os parâmetros estáticos relacionam-se diretamente com a geometria da ferramenta e espessura do componente a ser soldado. Por sua vez, os parâmetros dinâmicos são divididos novamente entre parâmetros de posição e de movimento. Os parâmetros de movimento englobam o ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e profundidade de penetração ( $dz$ ), quando em controle de posição. Mesmo em processos sob controle de força, a profundidade de penetração deve ser controlada para evitar a criação de uma soldadura côncava, utilizando profundidades elevadas, ou pouca área de contato entre ferramenta e material base, quando utilizadas profundidades muito pequenas [10]. Acerca do ângulo de ataque, foram observadas soldaduras em AA2014-T6 sem defeitos para ângulos de ataque entre  $1^\circ$  e  $3^\circ$ , apresentando melhores resultados para  $2^\circ$  de angulação [11].

Por fim, os parâmetros de movimento são a velocidade de rotação ( $\omega$ ), a velocidade de avanço ( $v$ ) e a força axial ( $F_z$ ). É possível considerar  $F_z$  como um parâmetro apenas para processos realizados sob controle de força, tornando-se um *output* em processos sob controle de posição, como no caso deste trabalho. Estes parâmetros possuem maior influência na geração de calor e fluxo de material durante o processo. A taxa de geração de calor, ciclos térmicos, velocidade de arrefecimento, força aplicada na ferramenta e binário necessário para realizar a soldadura, dependem inteiramente destes grupos de parâmetros [5].



**Figura 2-2** - Ilustração (a) geral do processo FSW e (b) detalhes da penetração da ferramenta e seus parâmetros (adaptado de [12]).

Mesmo sendo possível utilizar esta tecnologia em diversas configurações de juntas, tal como as representadas na Figura 2-3, as mais comuns são a topo-a-topo e sobrepostas. Neste trabalho será utilizada a configuração *bead-on-plate*, uma simulação de soldaduras topo-a-topo utilizando uma única chapa.



**Figura 2-3** - Configurações de juntas possíveis: (a) topo-a-topo, (b) angulo em L, (c) angulo em T, (d) sobreposta, (e) sobreposta múltipla, (f) sobreposta em T, (g) de filete (adaptado de [10]).

Após a finalização do processo, a retirada vertical da ferramenta resulta em um orifício, denominado de *keyhole*, devido à presença do pino. Este pequeno orifício pode causar diversos problemas à estrutura soldada, sendo uma zona de concentração de tensões. Buscando contornar essa situação, Uematsu et al. (2008) [13], apresenta uma ferramenta de dupla ação, com pino interior móvel, capaz de preencher o buraco deixado ao final do processo. Apesar de funcional, este processo apresenta demasiada complexidade, tendo sido realizados mais estudos de soldaduras FSW utilizando ferramentas sem pino como alternativa à ferramenta convencional.

Soldaduras realizadas em alumínio AA6061-T4, utilizando uma ferramenta sem pino, apresentaram desempenho semelhante às realizadas com ferramentas convencionais com pino [14]. A utilização de ferramentas sem pino com parte central de sua estrutura composta pelo mesmo material base do componente apresentou maior geração de calor durante o processo [15]. Outros autores observaram aumento da resistência à tração e ductilidade das soldaduras em AA5754 utilizando uma ferramenta sem pino [16]. A utilização deste tipo de ferramenta levou à criação de uma nova técnica, derivada do FSW, chamada *Tool Assisted Friction Welding* (TAFW). Este processo utiliza uma ferramenta sem pino em soldaduras de chapas finas em juntas sobrepostas [17].

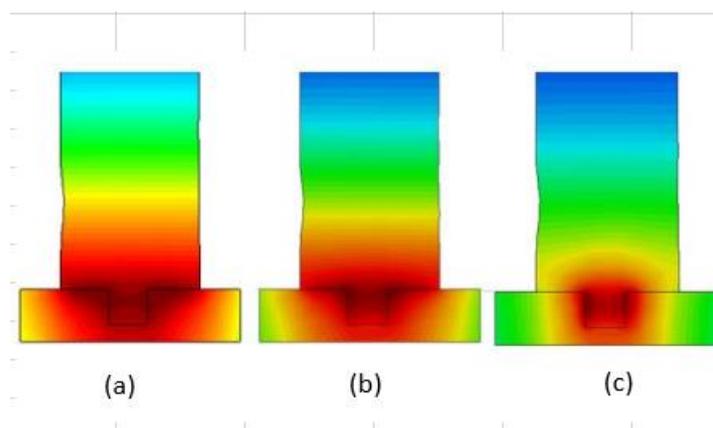
O presente estudo teve como objetivo a análise da evolução das condições termomecânicas com os parâmetros operatórios em chapas de alumínio com elevada espessura (*bead-on-plate*), utilizando o mesmo tipo de ferramenta, comumente utilizada para soldaduras em chapas finas. A soldadura por FSW de chapas de elevada espessura, utilizando uma ferramenta convencional, apresenta problemas acerca da difusão de calor gerado pela base da ferramenta e pelo pino. O calor gerado pela base não atinge a mesma profundidade do calor gerado pelo pino, resultando em uma área afetada pelo processo não uniforme.

## 2.2. Evolução da temperatura e do binário

O ciclo térmico resultante do processo FSW é uma informação crucial para garantir a qualidade da soldadura, indicando as condições de aquecimento e arrefecimento do material base. A distribuição de temperatura na região de mistura influencia diretamente a microestrutura dessa região, como tamanho e geometria do grão, assim como as propriedades mecânicas do material [10].

As duas principais fontes de calor do processo estão associadas ao atrito entre a base da ferramenta e a superfície de contato, e à deformação plástica do material durante a mistura, promovida principalmente pelo pino. A influência de cada uma destas fontes de calor pode ser relacionada pela razão entre a velocidade do material junto a interface com a velocidade da superfície de contato da ferramenta ( $\delta$ ). Analisando esta variável, determina-se se o processo apresenta condições de escorregamento, aderência ou escorregamento-aderência parcial.

Quando a tensão limite de elasticidade de corte do contato ferramenta-material base é menor que a tensão limite de elasticidade de corte do material, obtém-se a condição de escorregamento total ( $\delta=0$ ), prevalecendo o atrito como fonte geradora de calor do processo. No caso de a tensão limite de elasticidade de corte do contato ultrapassar a tensão limite de elasticidade de corte do material, obtém-se a condição de aderência total ( $\delta=1$ ), prevalecendo a deformação plástica como fonte geradora de calor. Por fim, a condição de escorregamento-aderência considera uma situação intermédia ( $0<\delta<1$ ), onde os dois fenômenos são considerados fontes de calor simultaneamente. Alguns estudos apontam que se podem produzir soldaduras sem defeitos quando a taxa de aderência é superior a 50% ( $\delta>0,5$ ) [18]. A Figura 2-4 apresenta a distribuição de temperatura para cada uma das condições.



**Figura 2-4** – Distribuição de temperatura na condição de (a) escorregamento total, (b) escorregamento-aderência e (c) aderência total (adaptado de [19]).

Comparando a geração de calor utilizando ferramentas sem pino, sem base e com a estrutura completa, nota-se predominância da geração de calor devido ao atrito da base com o componente [20], sendo essa geração de calor responsável por cerca de 96% do calor total do processo em chapas de alumínio [21].

Também foi estudada a relação dos parâmetros de soldadura na geração de calor e binário. A velocidade de rotação e dimensões da ferramenta apresentaram ser as mais influentes, seguidas da velocidade de avanço e espessura do material base [22].

A diferenciação da influência no ciclo térmico entre esses quatro parâmetros deve-se ao fato da velocidade de avanço e espessura do material base não afetarem a geração de calor do processo, apenas sua dissipação [23]. O mesmo autor também observou, em soldaduras lineares em chapas de alumínio, que a influência da velocidade de avanço é maior em placas de elevada espessura, da mesma forma que a influência da espessura da chapa aumentou para velocidades de avanço maiores. Também foi possível identificar um limite na geração de calor para todas as amostras, independentemente do material base ou parâmetros utilizados, garantindo o estado sólido do processo.

Análises da influência dos parâmetros de soldadura em ligas de alumínio indicam o aumento da geração de calor por atrito devido ao aumento da velocidade de rotação da ferramenta e diminuição da velocidade de avanço [24]. Outros autores indicaram que, para velocidades de rotação superiores a 600rpm, o ciclo térmico pode ser controlado a partir da seleção apropriada do diâmetro da ferramenta, uma vez que, para cada diâmetro, tem-se um limite máximo de temperatura, independentemente dos outros parâmetros do processo [25].

Analisando a evolução do binário em soldaduras em alumínio, nota-se uma influência direta com velocidade de rotação e área de contato entre ferramenta e componente. Com o aumento da velocidade de rotação, há a diminuição do binário, ocorrendo o inverso com a área de contato [22].

### **2.3. Macroestrutura**

A deformação plástica e altas temperaturas em que o componente é submetido durante o processo resultam em mudanças microestruturais do material base. A região afetada pela soldadura pode ser dividida em 4 zonas distintas, sendo elas a zona de mistura (ZM), a zona termo mecanicamente afetada (ZTMA), a zona termicamente afetada (ZTA) e o material base (MB) [26], cada uma dessas zonas apresentando diferentes propriedades metalúrgicas. Na Figura 2-5 é possível observar as diferentes zonas de microestrutura em uma soldadura FSW em AA7050.

A ZM representa a região de maior deformação plástica e aquecimento da soldadura, possuindo uma microestrutura caracterizada pela ocorrência de recristalização dinâmica e grãos muito pequenos. As condições na ZTMA, que inclui a ZM são naturalmente similares, mas também podem apresentar uma menor intensidade. De facto, nas zonas consideradas de transição, não ocorre a recristalização associada à intensa deformação plástica, gerando apenas o alongamento dos grãos de acordo com o fluxo de material nesta região. Seguindo para a ZTA, onde se notam apenas efeitos microestruturais devido ao ciclo térmico, sem fluxo de material. Por fim, o MB corresponde à porção de material não afetada pelo processo de soldadura.

As zonas apresentadas representam diretamente o relacionamento entre os dois componentes sendo ligados. Na ZM obtém-se completa ligação mecânica entre os componentes. Visando uma melhor soldadura dos componentes, é preferível selecionar parâmetros que resultem em maiores áreas de ZM. Um dos meios de atingir este objetivo é priorizar a geração de calor e fluxo do material, principalmente em soldaduras com ferramentas sem pino. Analisando soldadura em ligas de alumínio, foi observado que é possível obter soldaduras sem defeitos internos à velocidade de avanço elevadas, dependendo fortemente das características do material base e espessura do componente [27].



**Figura 2-5** - Seção transversal de soldadura FSW em AA7050 indicando as zonas de microestrutura (adaptada de [28]).

## 2.4. Material base

O alumínio é um material que apresenta boas propriedades plásticas e baixa densidade, mas com baixa resistência quando comparados a outros metais utilizados na indústria como o aço. Visando modificar suas propriedades a fim de proporcionar maior variabilidade na sua utilização, podem ser incorporados ao alumínio elementos de liga, modificando sua estrutura.

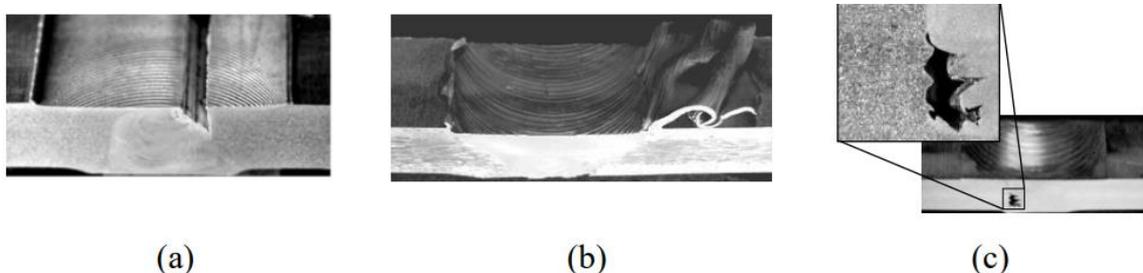
As ligas de alumínio são divididas em séries baseadas no componente principal adicionado ao alumínio, e diferenciadas pelo primeiro número seguido das letras “AA” (*Aluminum Alloy*) de sua nomenclatura. As utilizadas no procedimento deste trabalho são: a série AA2xxx (Al-Cu), caracterizada por altas resistências a temperatura ambiente e mais elevadas, comumente utilizada em componentes altamente solicitados, como na indústria aeroespacial; a série AA5xxx (Al-Mg), caracterizada pela boa resistência a corrosão e soldabilidade, muito utilizado em componentes arquitetônicos e em automóveis; a série AA6xxx (Al-Mg-Si), caracterizada também pela alta resistência a corrosão e resistências moderadas; e a série AA7xxx (Al-Zn), caracterizada pela excelente resistência mecânica [29].

As ligas de alumínio podem passar por mais processos a fim de melhorar suas propriedades. Os processos mais utilizados são o tratamento térmico e o trabalho mecânico a frio, denominados, de acordo com a norma ANSI H35.1(M)-1997, por T e H, respectivamente. O método de tratamento térmico utiliza o processo de endurecimento por precipitação, possível apenas para ligas com elementos em que ocorra a diminuição de sua solubilidade no alumínio junto com a diminuição da temperatura. Já o método de trabalho

mecânico a frio baseia-se no endurecimento do material a frio, resultante da deformação plástica do material.

A partir destas diferenciações entre as ligas de alumínio, é possível relacionar os diferentes comportamentos em deformação plástica com a soldabilidade de cada liga. Leitão (2013) [30], analisou a influência do comportamento plástico das ligas AA5083 e AA6082 em soldaduras por FSW e observou maior soldabilidade da liga AA6082, apresentando soldaduras sem defeitos utilizando os mesmos parâmetros onde soldaduras em AA5083 apresentavam defeitos. Esses resultados relacionaram-se com o maior volume de material misturado na liga AA6082 em comparação com a liga AA5083.

O autor identificou os principais defeitos apresentados nas soldaduras, como: excesso de rebarba, defeitos na superfície e defeitos internos, apresentados na Figura 2-6. Os defeitos de superfície e internos são comumente associados com baixa geração de calor durante o processo, e tiveram maior presença nas amostras de AA5083. Já o defeito de excesso de rebarba é associado com alta geração de calor, e tiveram maior presença nas soldaduras em AA6082. Este comportamento indica a influência das propriedades do material base não só nos *outputs* do processo, mas também no tipo de defeito mais provável de ocorrer.



**Figura 2-6** - Defeitos de a) superfície b) excesso de rebarba e c) internos (adaptado de[30]).

É possível notar também a influência do material base na morfologia da soldadura. Quando comparadas soldaduras realizadas em ligas de alumínio distintas, foram observadas zonas de soldadura, na seção transversal, maiores para a liga AA6082 do que para a liga AA5082, ambas sob os mesmos parâmetros iniciais [31].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, foram realizadas 28 soldaduras por FSW. Como material base foram utilizadas chapas de 10mm de espessura de quatro ligas de alumínio. As soldaduras foram realizadas em controlo de posição, tendo-se variado a geometria da ferramenta e a velocidade de rotação e avanço para cada amostra, mantendo-se constante a espessura das chapas, o comprimento da soldadura, o ângulo de ataque e a profundidade de penetração.

#### 3.1. Ferramentas

Foram utilizadas duas ferramentas com diâmetro de base de 12mm, sendo uma delas de base plana, sem pino, e a segunda com pino central de 6mm de diâmetro, denominadas de PL12 e CL6, respetivamente. As ferramentas, apresentadas na Figura 3-1, foram feitas em Carboneto de Tungstênio, capazes de resistir às altas temperaturas do processo.

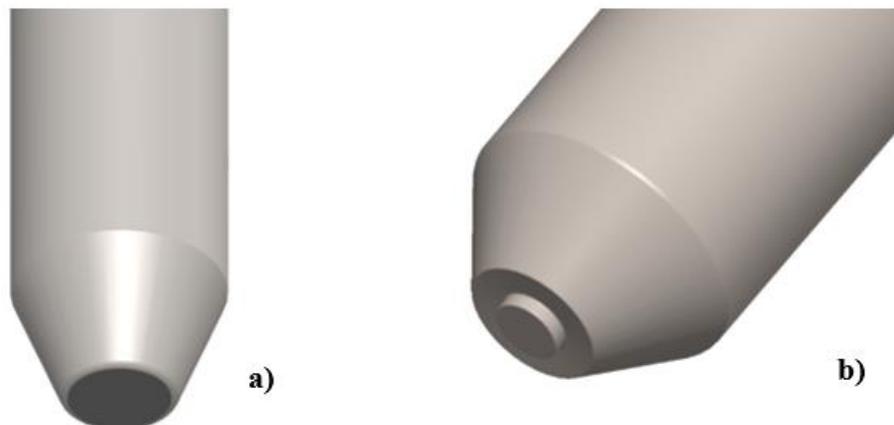


Figura 3-1 - Ferramenta a) PL12 e b) CL6.

#### 3.2. Materiais Base

Foram utilizadas como material base três ligas de alumínio tratáveis termicamente (AA2017, AA6082 e AA7075) e uma não tratável termicamente (AA5083).

A composição química de cada liga de alumínio utilizada é apresentada na Tabela 3-1, assim como as propriedades mecânicas na Tabela 3-2. Para este trabalho, a liga AA2017 recebeu a tempera T451, com envelhecimento natural até uma condição estável, e as ligas AA6082 e AA7075, a tempera T651, com envelhecimento artificial.

**Tabela 3-1** – Constituição química dos materiais base (% ponderal).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr
AA2017	0.2-0.8	0.7	3.5-4.5	0.4-1	0.4-1	0.1	0.25	0.25
AA5083	0.4	0.4	0.1	0.4-0.1	4-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15
AA6082	0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1
AA7075	0.4	0.5	1.2-2	0.3	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2

**Tabela 3-2** - Propriedades mecânicas dos materiais base.

Material	Densidade [g/m <sup>3</sup> ]	Resistencia a tração [Mpa]	Dureza [HV]	Tempratura de fusão [°C]	Condutividade térmica [W/m.K]
AA2017	2.78	427	105	513-640	135
AA5083	2.66	275	75	590-638	117
AA6082	2.7	340	98	555	170
AA7075	2.81	540	150	477-635	130

### 3.3. Parâmetros de soldadura

Para compreender a influência dos principais parâmetros do processo em FSW na qualidade das soldaduras, os experimentos foram realizados de acordo com a Tabela 3-3. A nomenclatura indicada na tabela tem como finalidade facilitar o reconhecimento das condições de processo de cada amostra. A letra inicial indica a ferramenta utilizada, sendo “P” para a PL12 e “C” para a CL6. O número seguinte indica o material base, sendo a liga AA2017 representada pelo número 2, a liga AA5083 pelo número 5, a liga AA6082 pelo número 6, e a liga AA7075 pelo número 7. Por fim, os últimos dois valores indicam as velocidades de rotação e avanço, respetivamente.

Foram realizadas soldaduras *bead-on-plate*, utilizando chapas de 10mm de espessura e dimensões 250mm por 100mm para cada amostra. O processo foi realizado em controle de posição, com uma profundidade de penetração de 0,5mm quando utilizada a ferramenta PL12 e 1,2mm para a ferramenta CL6, isto é, cerca de 5% e 12% da espessura total, respetivamente. Para todas as amostras foram mantidos constantes o ângulo de ataque de 2° e o comprimento da soldadura de 200mm. As ferramentas levam aproximadamente 5s (PL12) e 10s (CL6) para atingir a profundidade desejada, seguida de 2s para estabilização

das condições de soldadura e aquecimento do material, para em seguida prosseguir com o movimento de translação.

**Tabela 3-3** - Parâmetros dos testes realizados e nomenclatura das amostras.

Ferramenta	Material	Rotação [RPM]	Velocidade de Avanço [mm/min]	Nomenclatura
PL12	AA2017	660	300	P2_660_300
			600	P2_660_600
			900	P2_660_900
		1140	300	P2_1140_300
			600	P2_1140_600
			900	P2_1140_900
	AA5083	660	300	P5_660_300
			600	P5_660_600
			900	P5_660_900
		1140	300	P5_1140_300
			600	P5_1140_600
			900	P5_1140_900
	AA6082	660	300	P6_660_300
			600	P6_660_600
			900	P6_660_900
		1140	300	P6_1140_300
			600	P6_1140_600
			900	P6_1140_900
AA7075	660	300	P7_660_300	
		600	P7_660_600	
		900	P7_660_900	
	1140	300	P7_1140_300	
		600	P7_1140_600	
		900	P7_1140_900	
CL6	AA2017	660	600	C2_660_600
	AA5083			C5_660_600
	AA6082			C6_660_600
	AA7075			C7_660_600

### 3.4. Aquisição de dados

Durante o processo de soldadura, a aquisição da temperatura foi realizada utilizando os procedimentos experimentais indicados em [32]. Uma câmara termográfica foi posicionada a 0.3m do processo no mesmo plano de movimentação transversal da ferramenta, com foco na interface entre material e a ferramenta, como representado na Figura

3-2. Os dados foram coletados a uma frequência de 12,5Hz e emissividade de 0.7, obtida a partir do procedimento indicado em [25].

Por sua vez, a aquisição do binário e da força axial foi realizada pelo próprio equipamento de soldadura, a uma taxa de aquisição de 20Hz.

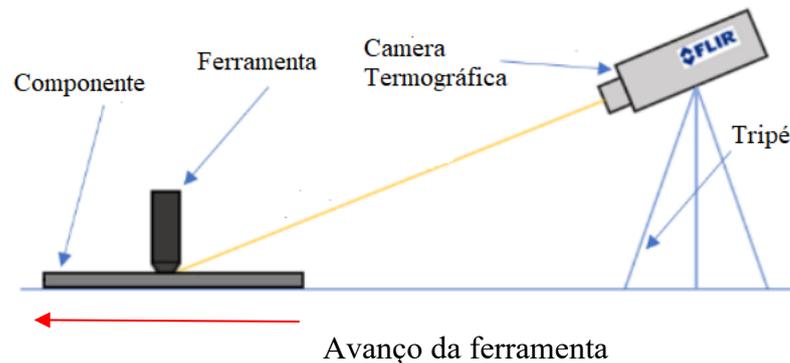


Figura 3-2 - Representação do esquema para aquisição de temperatura.

### 3.5. Preparação das amostras

Após a realização das soldaduras e tratamentos dos dados do processo, foram escolhidas as amostras apresentadas na Tabela 3-4 para realização de análise macroestrutural. Esta seleção foi feita considerando as soldaduras realizadas com as velocidades de rotação e avanço máximas (1140 rpm e 900 mm/min) e mínimas (660 rpm e 300 mm/min).

Utilizando uma serra de fita, as chapas escolhidas foram então cortadas em amostras menores na região central, a 100mm do início da soldadura. A escolha deste posicionamento do corte é devido a nenhum dos testes apresentarem grande variação de temperatura, binário ou força durante o avanço da ferramenta. Após o corte, as amostras foram colocadas em moldes de resina fria baseada em *methyl methacrylat*, para melhor manuseio, e polidas. Posteriormente, cada amostra foi atacada quimicamente para que a microestrutura fosse evidenciada e observada num microscópio ótico Leica DM4000M LED. O tempo de ataque para cada amostra é apresentado na Tabela 3-5.

**Tabela 3-4.** Amostras selecionadas para análise.

Ferramenta	Material	Rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/min]	Nomenclatura
PL12	AA2017	660	300	P2_660_300
			900	P2_660_900
		1140	300	P2_1140_300
			900	P2_1140_900
	AA5083	660	300	P5_660_300
			900	P5_660_900
		1140	300	P5_1140_300
			900	P5_1140_900
	AA6082	660	300	P6_660_300
			900	P6_660_900
		1140	300	P6_1140_300
			900	P6_1140_900
	AA7075	660	300	P7_660_300
			900	P7_660_900
1140		300	P7_1140_300	
		900	P7_1140_900	

**Tabela 3-5** - Tempo de ataque para cada amostra.

Amostra	Tempo de ataque [s]
P2_660_300	75
P2_660_900	100
P2_1140_300	110
P2_1140_900	170
P5_660_300	40
P5_660_900	75
P5_1140_300	90
P5_1140_900	120
P6_660_300	90
P6_660_900	150
P6_1140_300	150
P6_1140_900	60
P7_660_300	30
P7_660_900	195
P7_1140_300	35
P7_1140_900	40

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das experiências descritas no capítulo anterior.

### 4.1. *Outputs* de temperatura, binário e força axial

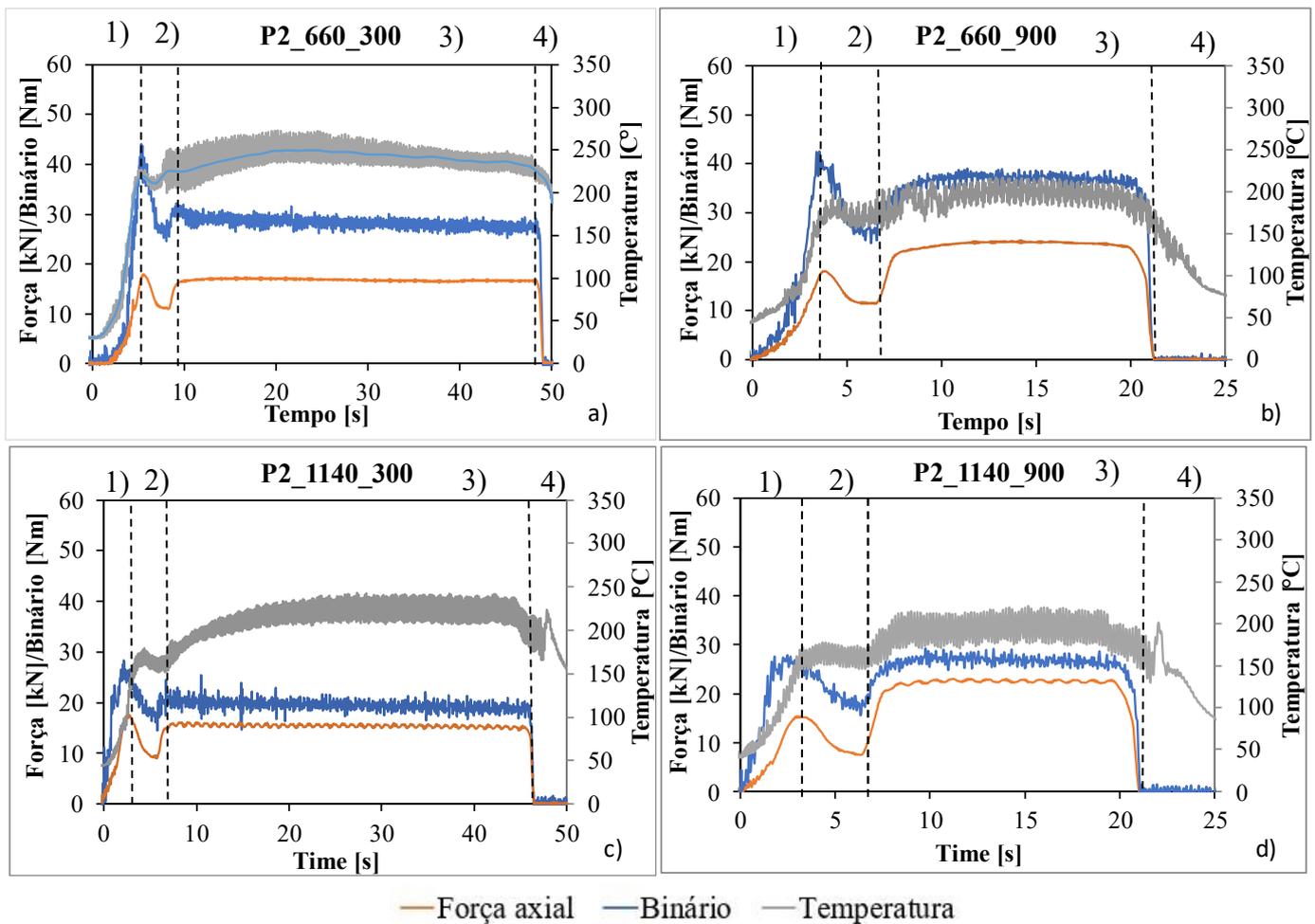
Na Figura 4-1 estão representadas as evoluções da temperatura, binário e força axial ao longo do tempo para as amostras de AA2017 para a menor e maior velocidades de rotação (660rpm e 1140rpm) e menor e maior velocidades de avanço (300mm/min e 900mm/min), respetivamente.

Analisando os quatro gráficos presentes na Figura 4-1 é possível identificar as diferentes etapas do processo. Assim sendo, é possível identificar as quatro etapas do processo, divididas por linhas tracejadas nos gráficos. A primeira etapa 1) é o momento de penetração da ferramenta no material base, seguida pelo *dwell stage* em 2). A terceira etapa 3) representa a translação da ferramenta até o comprimento desejado da soldadura, e, pôr fim, a última etapa 4) sendo a finalização do processo com a retirada da ferramenta.

Analisando as três curvas presentes nos gráficos, é possível observar um comportamento semelhante entre elas. No início, quando a ferramenta entra em contato com o componente, tem-se um rápido aumento das grandezas devido ao início da geração de calor por atrito e pela deformação plástica, seguida de uma queda durante o *dwell stage* para as curvas de binário e força axial. Com o movimento transversal da ferramenta, há um novo aumento até um estágio de estabilidade, para uma última queda no fim do processo de soldadura devido à remoção da ferramenta.

A partir do tratamento destes dados foi possível calcular a temperatura de movimento linear ( $T_{ml}$ ), utilizando a média dos valores presentes na terceira etapa do gráfico, para cada uma das soldaduras realizadas. Foi também possível calcular o binário de penetração ( $M_{pen}$ ), sendo este o valor máximo que ocorre durante a primeira etapa do processo e o binário de movimento linear ( $M_{ml}$ ), calculado a partir da média dos valores presentes na terceira etapa do gráfico. De igual modo, para cada uma das curvas da força axial obtidas, foi determinado

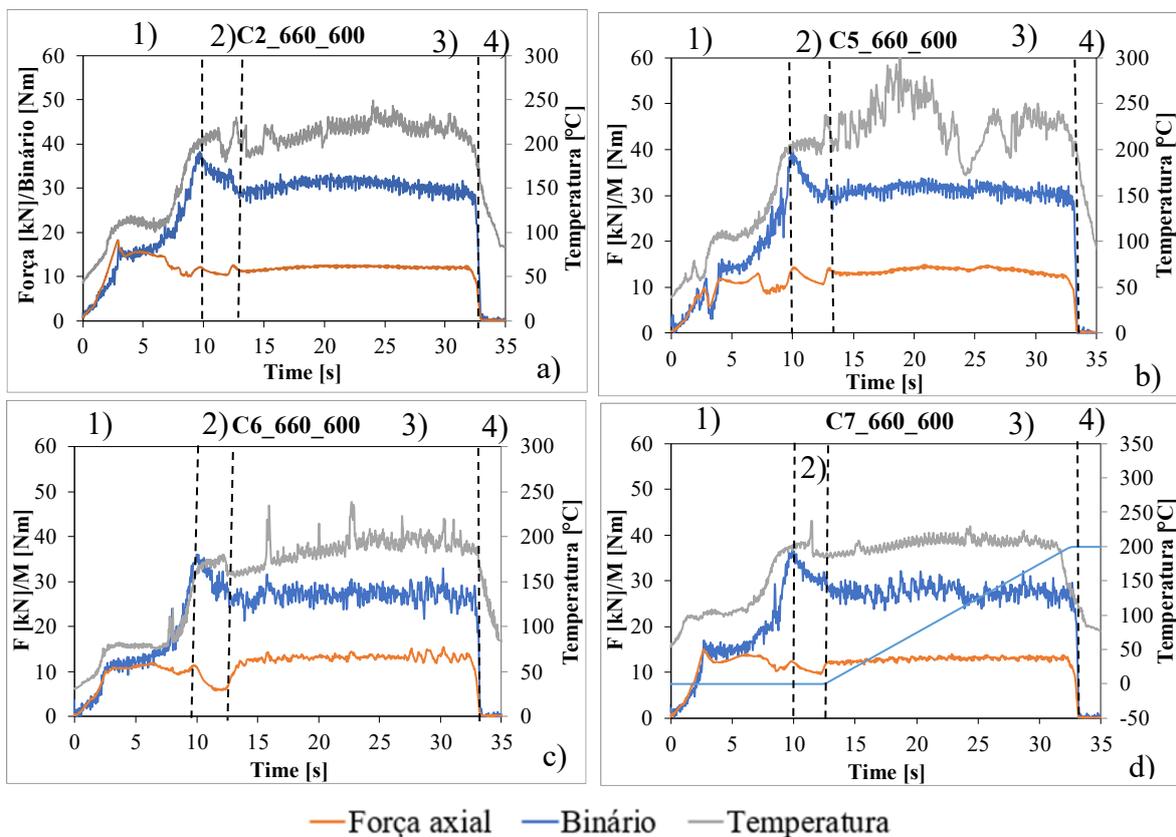
o valor da força de penetração ( $F_{pen}$ ) e de movimento linear ( $F_{ml}$ ). Não foram analisadas as temperaturas da fase de penetração, uma vez que, contrariamente ao observado para as curvas de binário e força axial, não se regista um valor máximo após o término da fase de penetração. Foi observada evolução semelhante dos três *outputs* entre todas as ligas. Por esse motivo, apenas os dados para a liga AA2017 são apresentados na Figura 4-1.



**Figura 4-1** – Evolução da temperatura, binário e força axial para amostras de AA2017 a a)660rpm-300mm/min, b)660rpm-900mm/min, c)1140rpm-300mm/min, d)1140rpm-900mm/min.

Na Figura 4-2 é apresentada a evolução de temperatura, binário e força axial para as amostras utilizando a ferramenta CL6. As curvas são referentes a soldaduras produzidas com velocidade de rotação e avanço constantes, de 660 rpm e 600 mm/min, respetivamente, para todos os materiais analisados. É possível notar um maior ruído nestes dados quando comparados com os da ferramenta PL12, principalmente para a curva de temperatura da

amostra b) C5\_660\_600. Outra diferença está no comportamento da curva de força axial. Para estas amostras, a  $F_{ml}$  é muito semelhante à força axial de penetração, atingindo um patamar de equilíbrio logo após alguns segundos do início da etapa de penetração da ferramenta. O comportamento inicial das três curvas difere daquelas apresentadas na Figura 4-1, principalmente devido ao diferente tempo de penetração, que foi superior para a ferramenta CL6 devido às dimensões da ferramenta e à profundidade de penetração utilizada.



**Figura 4-2** - Evolução da temperatura, binário e força axial para amostras utilizando a ferramenta CL6 das ligas a) AA2017, b) AA5083, c) AA6082 e d) AA7075.

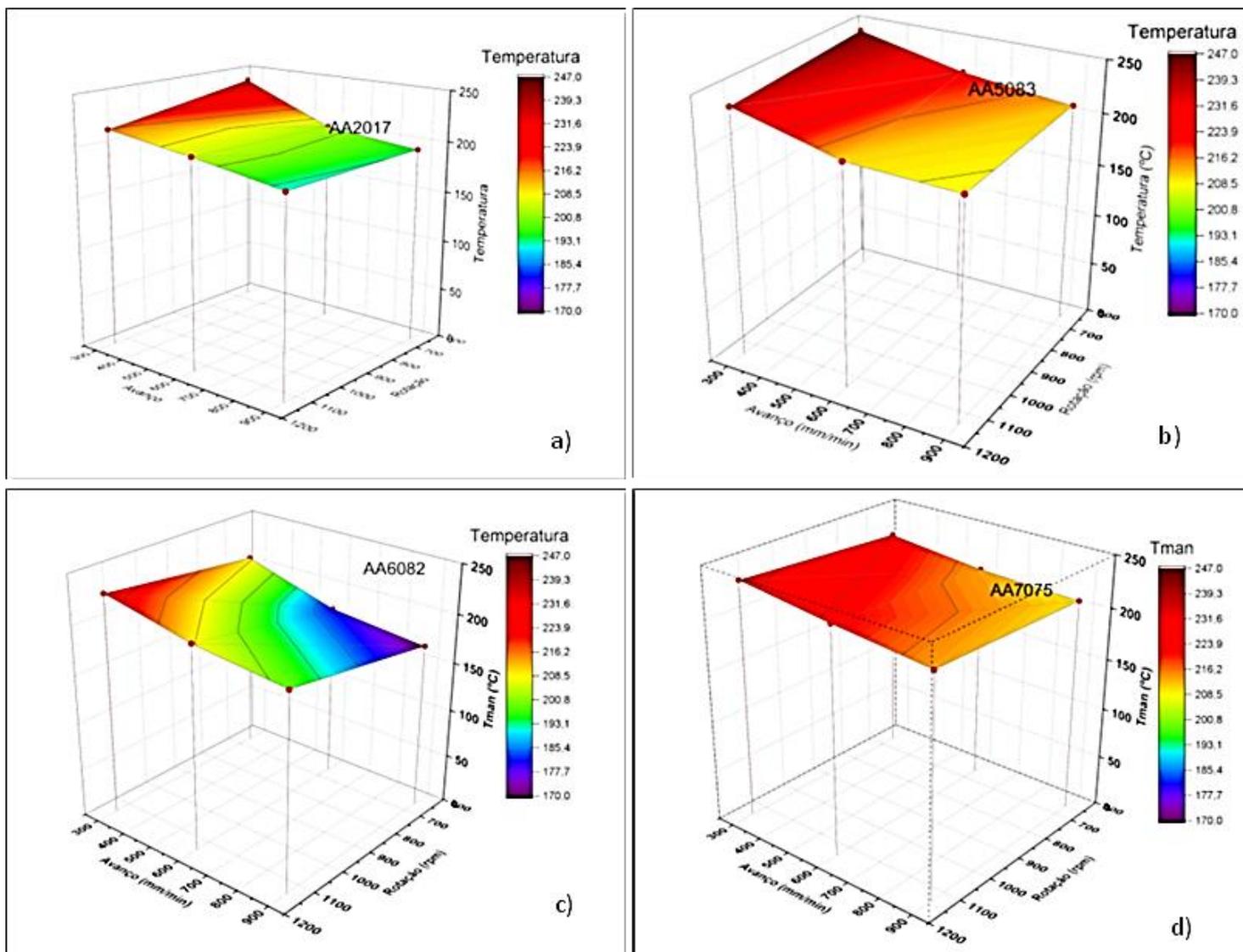
Para as três curvas apresentadas nos gráficos, é possível notar o crescimento rápido no início do processo, seguido de uma estabilidade após aproximadamente 3 segundos. Esta estabilidade representa o momento em que o pino penetra completamente no componente. Apenas após o contato da base da ferramenta é possível observar um aumento nos valores de binário e temperatura, indicando a forte influência do atrito entre a base da ferramenta e a superfície do material base na geração de calor e binário do processo. Por sua vez, a força

axial apresentou uma diminuição com o início do movimento transversal, voltando ao valor constante após o processo se estabilizar. De forma semelhante ao que se fez para a ferramenta sem pino, para as curvas de temperatura, binário e força axial, foram também analisados os valores de  $T_{ml}$ ,  $M_{pen}$ ,  $M_{ml}$ ,  $F_{pen}$  e  $F_{ml}$ .

Por fim, é possível observar que a liga AA5083 apresentou maiores temperaturas e binário para esta ferramenta, seguida da liga AA2017. As ligas AA6082 e AA7075 apresentaram valores semelhantes nos três *outputs*.

## 4.2. Evolução da temperatura

Na Figura 4-3 são apresentadas a evolução da temperatura, utilizando a ferramenta PL12, em função das velocidades de avanço e de rotação para as ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075, respetivamente. Analisando a Figura 4-3, é possível observar que, para todas as ligas, ocorre a diminuição do  $T_{ml}$  com o aumento da velocidade de avanço, uma vez que, para uma velocidade de movimentação linear inferior, a ferramenta dispõe de mais tempo para a transferência de calor com o material base. Por outro lado, a partir do esquema de cores dos gráficos, é possível observar a baixa influência da velocidade de rotação na  $T_{ml}$  para as ligas AA2017, AA5083 e AA7075. A única exceção ocorre para a liga AA6082, onde se pode observar um aumento da temperatura com o incremento da velocidade de rotação.



**Figura 4-3** - Evolução da temperatura de manutenção em função das velocidades de rotação e avanço para as ligas a)AA2017, b)AA5083, c)AA6082 e d)AA7075.

Na Figura 4-4 está comparada a evolução da  $T_{ml}$  para todos os materiais analisados neste trabalho, para diferentes velocidades de avanço e rotação. Analisando a figura, é possível observar que as ligas AA5082 e AA6083 registaram as maiores e menores temperaturas, respetivamente, para a menor velocidade de rotação (660 rpm). Por outro lado, é possível concluir que para velocidades de rotação mais elevadas o material base apresenta menor influência nos valores de temperatura atingidos. Contrariamente, é também possível observar que a gama de temperaturas registadas, para as diferentes ligas de

alumínio, foi superior para as velocidades de avanço inferiores, independentemente da velocidade de rotação utilizada.

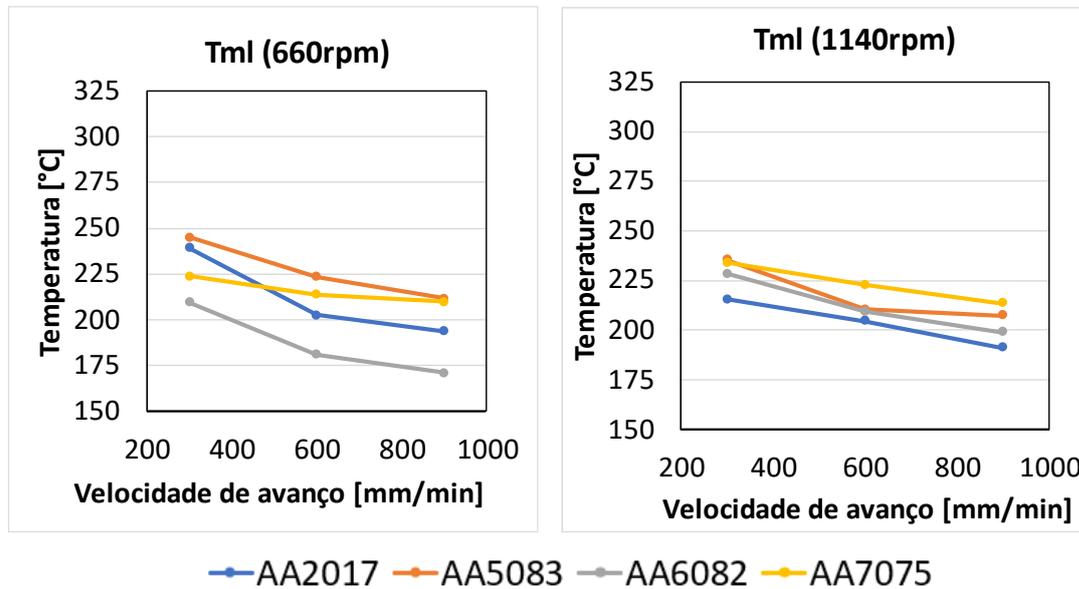


Figura 4-4 - Comparação da  $T_{ml}$  em função da velocidade de avanço das ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.

### 4.3. Evolução do binário

A Figura 4-5 apresenta as curvas de  $M_{pen}$  e de  $M_{ml}$  para as duas velocidades de rotação em função da velocidade de avanço para os materiais base testados, utilizando a ferramenta PL12. É possível observar um comportamento inverso da influência das velocidades de rotação e avanço para todas as ligas. Nota-se aumento do  $M_{ml}$  com o aumento da velocidade de avanço e sua diminuição com o aumento da velocidade de rotação. Este comportamento resulta no maior valor de  $M_{ml}$  para o conjunto de parâmetros 660 rpm-900mm/min e o menor valor para o conjunto 1140rpm – 300mm/min. É possível observar que o  $M_{pen}$  é superior ao  $M_{ml}$  para toda a gama de parâmetros testada. Para além disso, dos gráficos na Figura 4-5 também se observa que o  $M_{ml}$  se aproxima do  $M_{pen}$  com o aumento da velocidade de avanço. Assim como, a diferença entre  $M_{ml}$  e  $M_{pen}$  é menor para velocidades de rotação maiores, independente da velocidade de avanço. O aumento de  $M_{ml}$  com o aumento da velocidade de avanço também está relacionada com a diminuição do tempo disponível para transmissão de calor. Com a movimentação mais rápida, o material

base possui menos tempo para aquecer e amolecer, necessitando de maior esforço para realizar a operação.

Analisando as curvas de  $M_{pen}$  é possível observar uma diminuição de aproximadamente 10 Nm devido ao aumento da velocidade de rotação. A velocidade de avanço não apresenta efeito neste *output*, pois sua medição é realizada antes da etapa de movimentação da ferramenta.

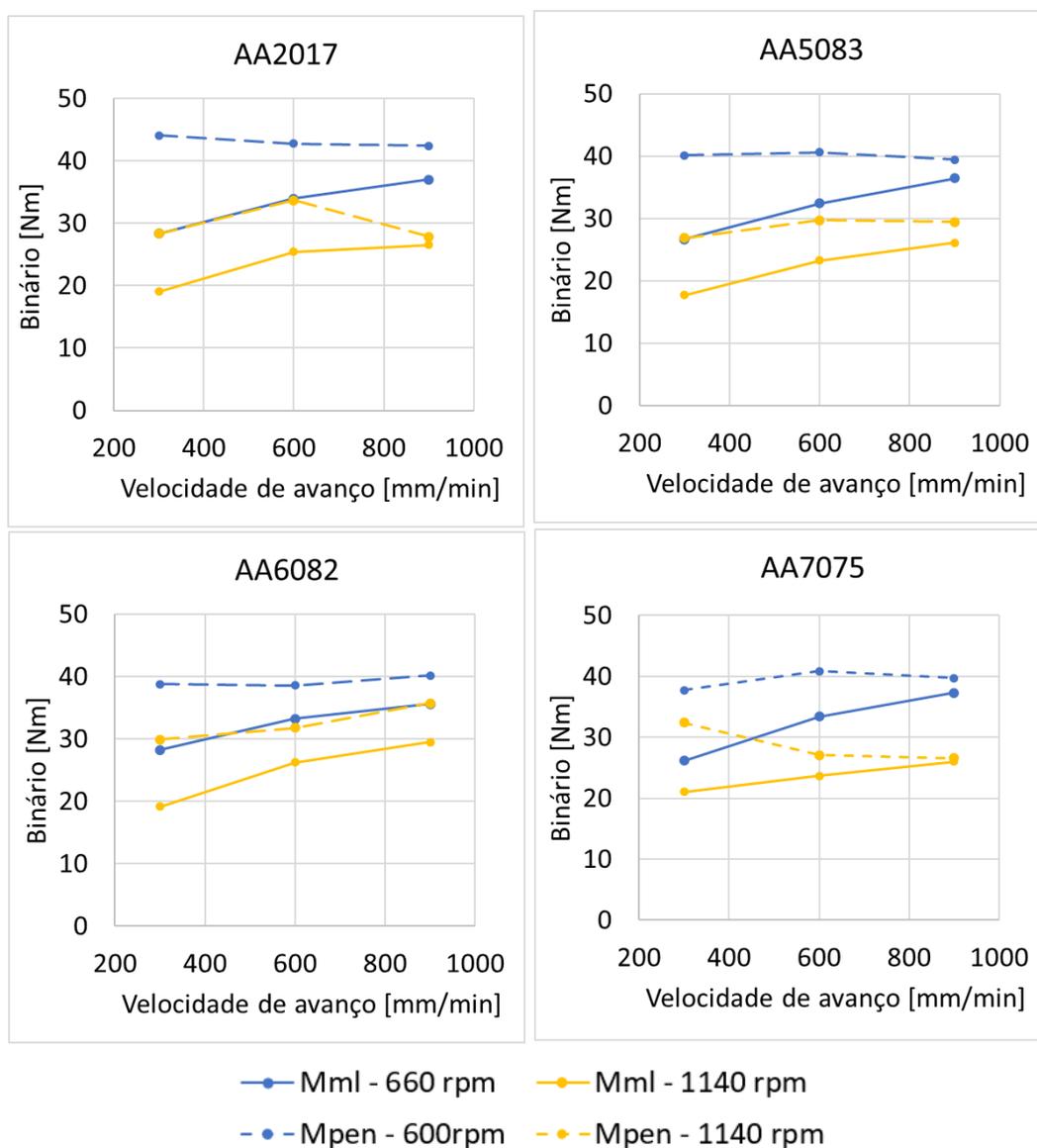


Figura 4-5 - Evolução do  $M_{ml}$  e  $M_{pen}$  para as velocidades de rotação 660rpm e 1140 rpm em função da velocidade de avanço para as quatro ligas.

Na Figura 4-6 está comparada a evolução da  $M_{ml}$  e  $M_{pen}$  entre os materiais analisados neste trabalho, para diferentes velocidades de avanço e rotação. Nos gráficos referentes a  $M_{pen}$  é possível observar uma evolução praticamente horizontal das curvas, pois não há movimentação linear na ferramenta durante a fase de penetração. Nota-se, também, que o material base apresenta maior influência na fase de penetração para velocidades de rotação mais elevadas, representado pelo distanciamento das curvas.

Analisando os gráficos para  $M_{ml}$  é possível observar uma sobreposição das linhas, indicando que as diferenças nas propriedades plásticas destes materiais não são responsáveis por grandes alterações durante o processo de soldadura.

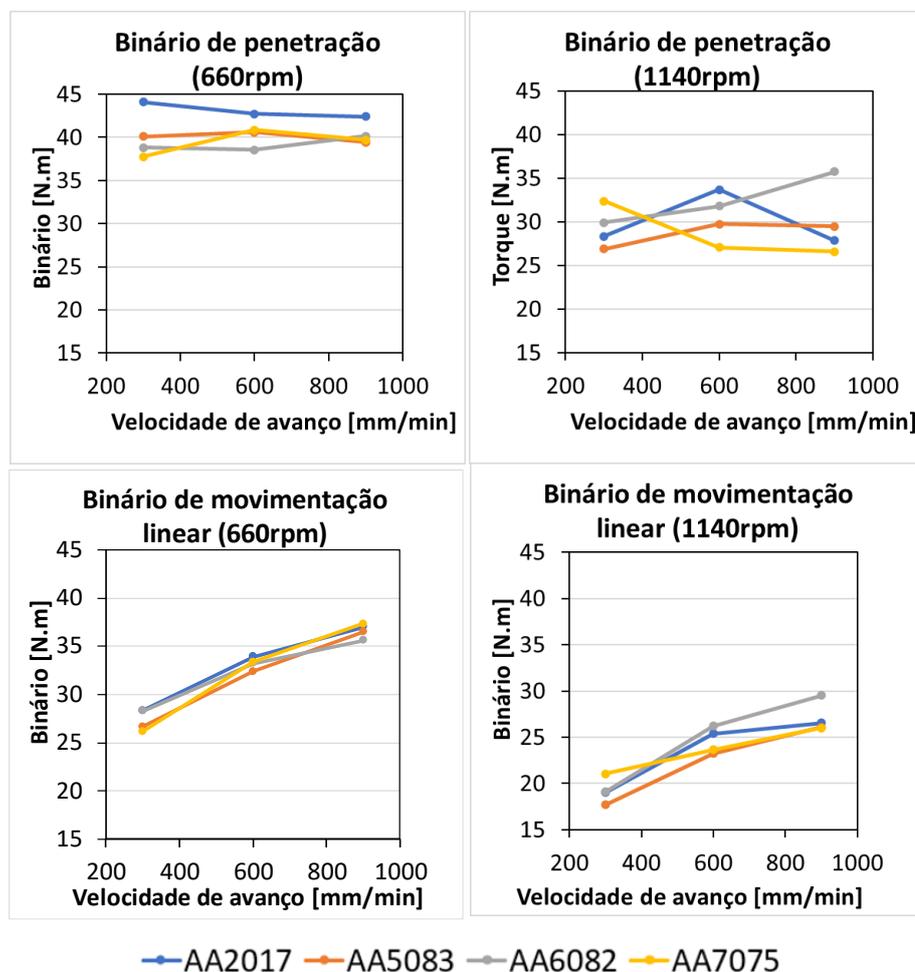


Figura 4-6 - Comparação do  $M_{ml}$  e  $M_{pen}$  em função da velocidade de avanço das ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.

#### 4.4. Evolução da força axial

Na Figura 4-7 são apresentadas as curvas de  $F_{pen}$  e de  $F_{ml}$  para as duas velocidades de rotação em função da velocidade de avanço, utilizando a ferramenta PL12. Para este *output* foram observadas diferenças mais significativas dos valores, comparando as diferentes ligas.

Inicialmente, é possível observar que, para velocidade de avanço superiores a 300mm/min, a  $F_{ml}$  apresenta valores superiores a  $F_{pen}$  para todas as quatro ligas.

Para a liga AA2017 (Figura 4-7 a)) foi observado aumento muito significativo da  $F_{ml}$  com o aumento da velocidade de avanço, demonstrando a grande influência deste parâmetro. Não foi identificada grande influência do aumento da velocidade de rotação para esta liga.

Nos gráficos correspondentes às ligas AA5083 e AA7075, nota-se uma maior influência da velocidade de rotação, principalmente para velocidades de avanço mais baixas. Isto implica em maior alcance em relação a valores de força axial para estas ligas em comparação com a AA2017.

Já a liga AA6082 apresentou ser a mais afetada pela velocidade de rotação nos valores de  $F_{ml}$  e  $F_{pen}$ , principalmente para velocidades de avanço mais altas, representado pelo maior distanciamento das curvas no gráfico.

O gráfico para a liga AA6082 (Figura 4-7 c)) apresenta maior disparidade, se comparado aos demais. Para esta liga, é possível observar uma influência semelhante dos dois parâmetros sendo analisados, onde a força axial diminui com o aumento da velocidade de rotação e com a diminuição da velocidade de avanço, resultando em um gráfico com um valor máximo, à 660rpm e 900mm/min, e mínimo, à 1140rpm e 300mm/min, muito bem definidos e distantes entre si. Assim com, para essa liga, o aumento da velocidade rotação apresentou maior influência nos valores de força axial para velocidades de avanço mais elevadas.

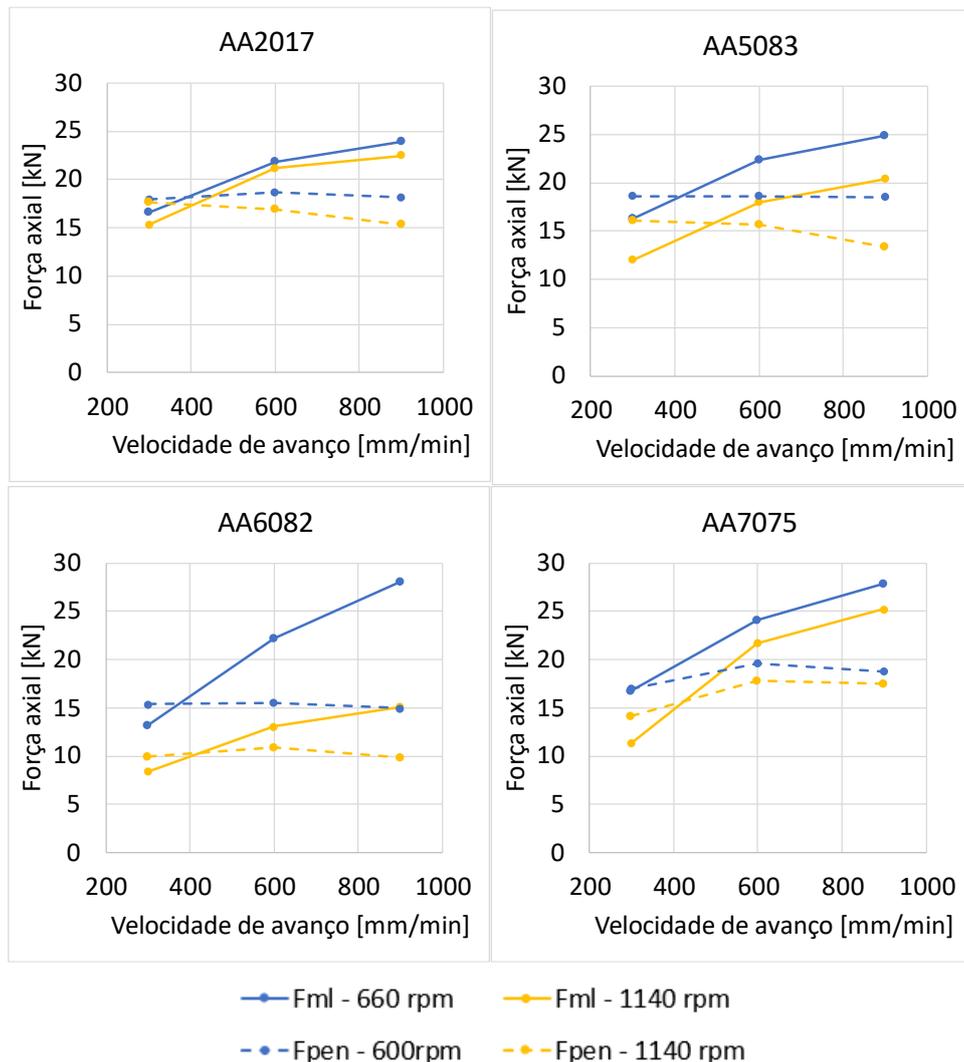


Figura 4-7 - Evolução do  $F_{ml}$  e  $F_{pen}$  para as velocidades de rotação 660rpm e 1140 rpm em função da velocidade de avanço para as quatro ligas.

Na Figura 4-8 é apresentada a evolução da  $F_{ml}$  e  $F_{pen}$  com a velocidade de avanço para as diferentes ligas. É possível observar que, para velocidade de rotação de 1140rpm, a influência do material base é maior nas duas forças estudadas.

Analisando os gráficos de  $F_{pen}$ , nota-se que a liga AA6082 apresentou menores valores para as duas velocidades de rotação. Para rotação de 660rpm, as demais ligas apresentaram curvas praticamente sobrepostas, sendo apenas a curva para o AA6082 cerca de 5kN inferior. Para a rotação de 1140rpm esta disparidade aumenta, sendo o AA5083 o que apresenta maiores valores, mais que o dobro da liga AA6082 em alguns testes. As ligas AA2017 e AA7075 não apresentaram mudanças significativas com o aumento da velocidade de rotação.

Para a  $F_{ml}$ , a liga AA7075 apresentou maiores valores, principalmente para a velocidade de rotação mais baixa, enquanto a liga AA6082 permaneceu com valores mais baixos, semelhante ao analisado durante a fase de penetração.

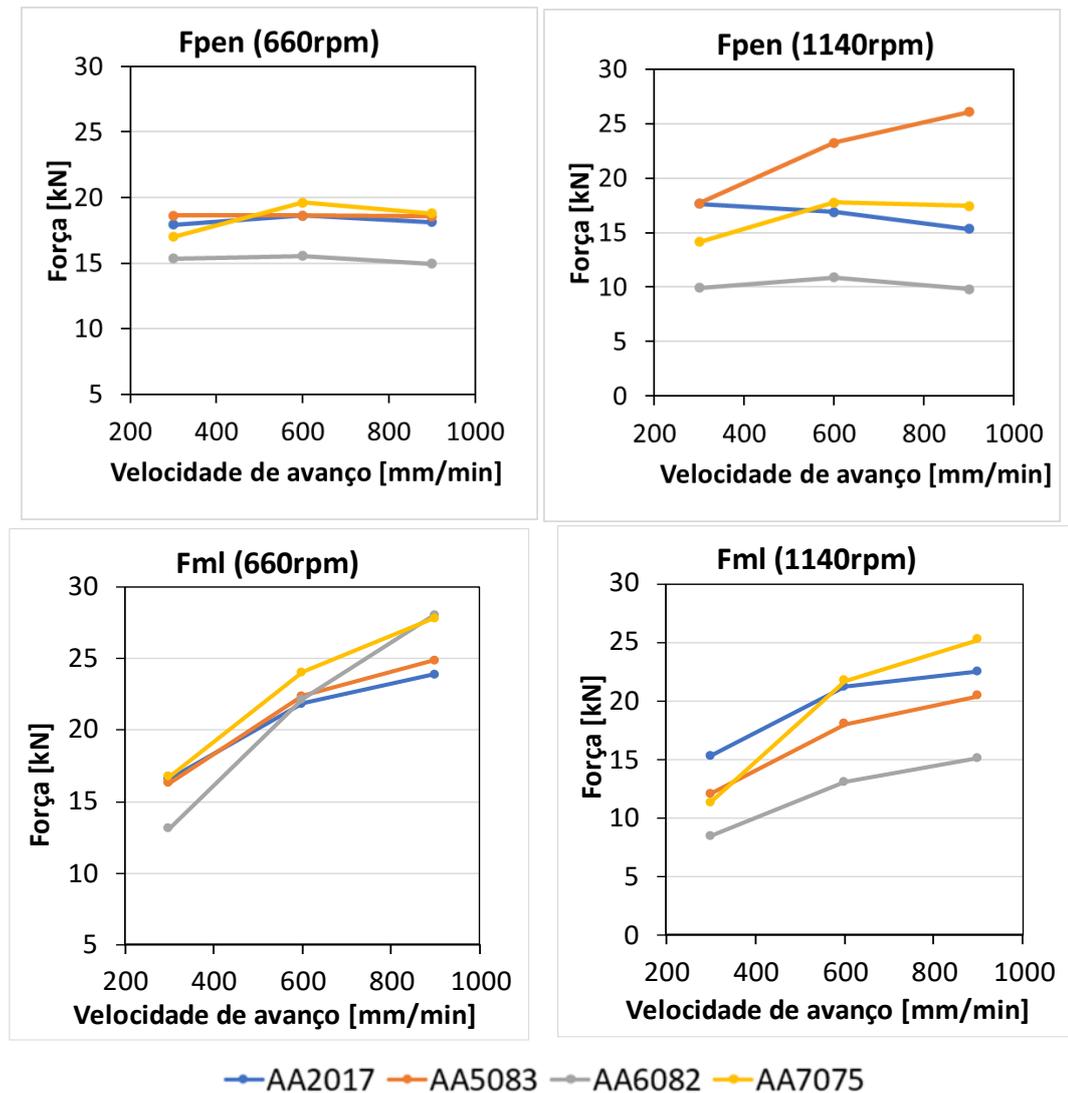


Figura 4-8 - Comparação da  $F_{ml}$  e  $F_{pen}$  em função da velocidade de avanço entre ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075 para a)660rpm e b)1140rpm.

#### 4.5. Influência da geometria da ferramenta

Neste trabalho foram também realizados ensaios com a ferramenta PL12 e CL6, isto é, uma ferramenta sem pino e uma ferramenta convencional com pino, respetivamente. Para o fim de analisar apenas a influência da geometria da ferramenta nos valores de temperatura,

binário e força axial registados, neste capítulo, apenas são comparados os ensaios realizados com as duas ferramentas utilizando os mesmos parâmetros operatórios.

A Figura 4-9 compara as  $T_{ml}$  obtidas para cada ferramenta em soldaduras utilizando 660rpm e 600mm/min nas quatro ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075.

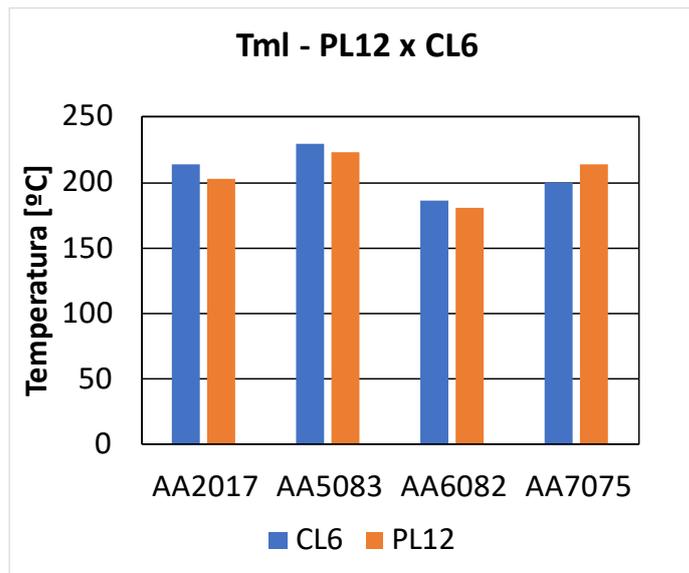
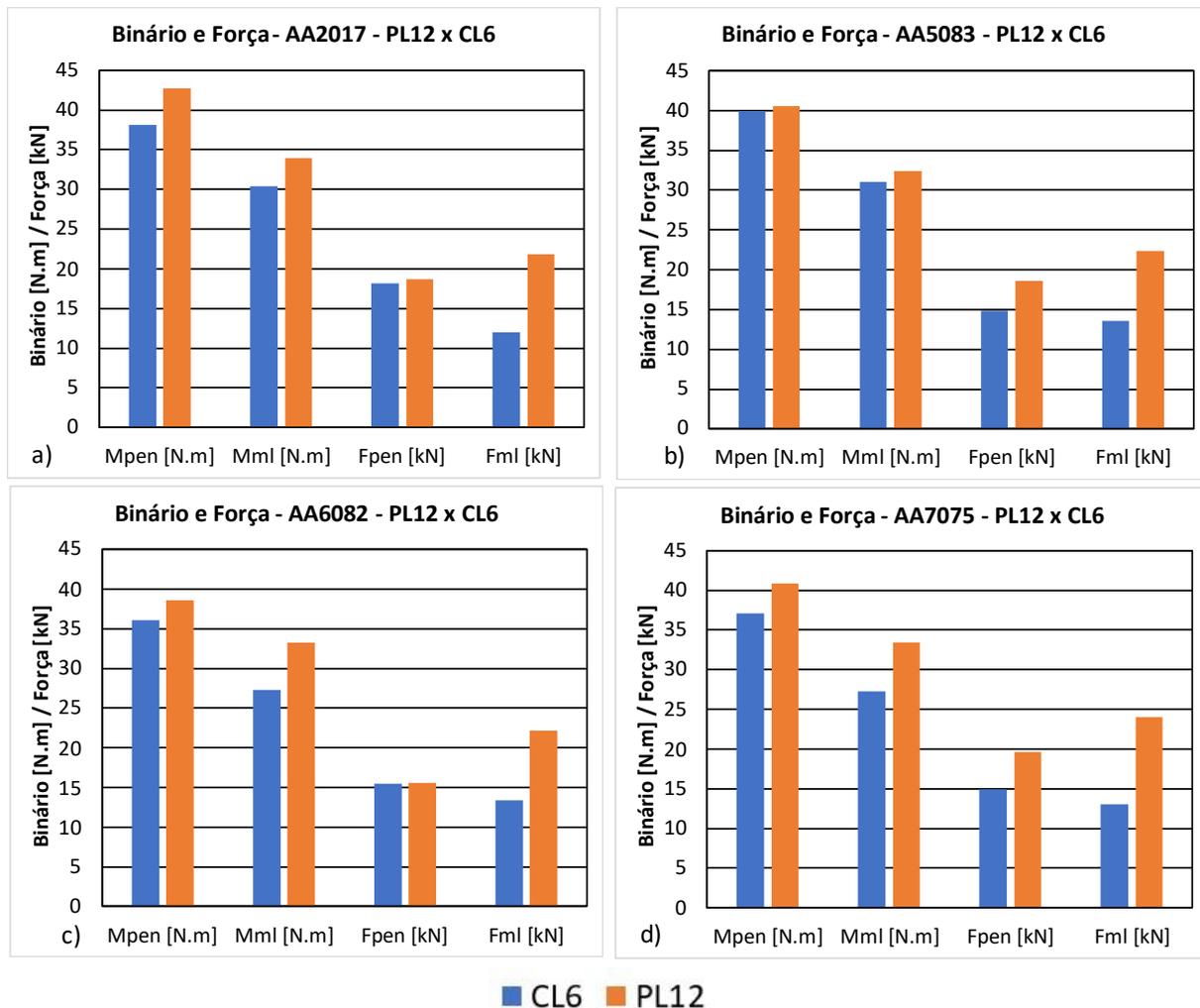


Figura 4-9 - Comparação das  $T_{ml}$  utilizando as ferramentas CL6 e PL12 para as ligas AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075.

Analisando o gráfico, verifica-se que a utilização da ferramenta CL6 promoveu um pequeno aumento de temperatura, sendo este aumento de 5,5% para a liga AA2017, 2,8% para a liga AA5082 e 2,6% para a liga AA7075. Para a liga AA7075, este aumento (6,8%) ocorreu utilizando a PL12. É possível concluir que, para as condições testadas, a geometria da ferramenta teve influência muito reduzida nos valores de temperatura registados.

A Figura 4-10 apresenta a comparação dos valores de  $M_{pen}$ ,  $M_{ml}$ ,  $F_{pen}$  e  $F_{ml}$  utilizando as ferramentas PL12 e CL6 para as quatro ligas estudadas.



**Figura 4-10** - Comparação de binário e força axial utilizando as ferramentas CL6 e PL12 para as ligas a)AA2017, b)AA5083, c)AA6082 e d)AA7075.

De maneira geral, todos os valores de força axial e binário apresentam-se maiores quando utilizada a ferramenta PL12, sendo a maior diferença para os valores de força axial. Analisado primeiramente os valores de  $M_{pen}$  e  $M_{ml}$  é possível observar um aumento de, respetivamente, 12% e 11% para o AA2017, 1,7% e 4,2% para o AA5083, 6,8% e 22% para o AA6082 e 10% e 23% para o AA7075 quando utilizada a ferramenta PL12. Nota-se que a liga AA5083, não tratável termicamente, foi a menos influenciada nos valores de binário com a troca de ferramenta. Conclui-se, também, que o  $M_{ml}$  é geralmente mais afetado que o binário máximo.

Por fim, analisando as  $F_{pen}$  e  $F_{ml}$ , é possível observar um aumento de 23,4% e 83,7% para o AA2017, 54,1% e 65,2% para o AA5083, 47,1% e 65,5% para o AA6083 e 65,8% e 84,6% para o AA7075 quando utilizada a ferramenta PL12.

Pode-se concluir que a utilização da ferramenta CL6, com pino, resultou em temperaturas levemente superiores e diminuição considerável dos valores de binário e força axial. Estes aumentos de esforços na ferramenta devem ser controlados no ponto de vista de um processo industrializado, pois podem acarretar em desgastes excessivos da ferramenta ou equipamento de soldadura.

#### **4.6. Macroestrutura**

Após a análise dos *outputs* coletados durante o processo, foi realizado o corte das amostras a fim de observar a sua macroestrutura. Os grãos modificados durante o processo apresentam coloração diferente após o ataque químico, tornando possível observar os locais afetados e suas dimensões. Esse estudo é crucial para a determinação da qualidade da soldadura, servindo como uma indicação do melhor grupo de parâmetros a se utilizar para cada material.

Em uma primeira análise visual das soldaduras foi observado excesso de rebarba em algumas amostras. As amostras que apresentaram maior presença de rebarba foram as realizadas com menores velocidade de avanço, com temperaturas mais elevadas e menor tempo de arrefecimento, resultando em maior amaciamento do material e maior propensão a geração de rebarba.

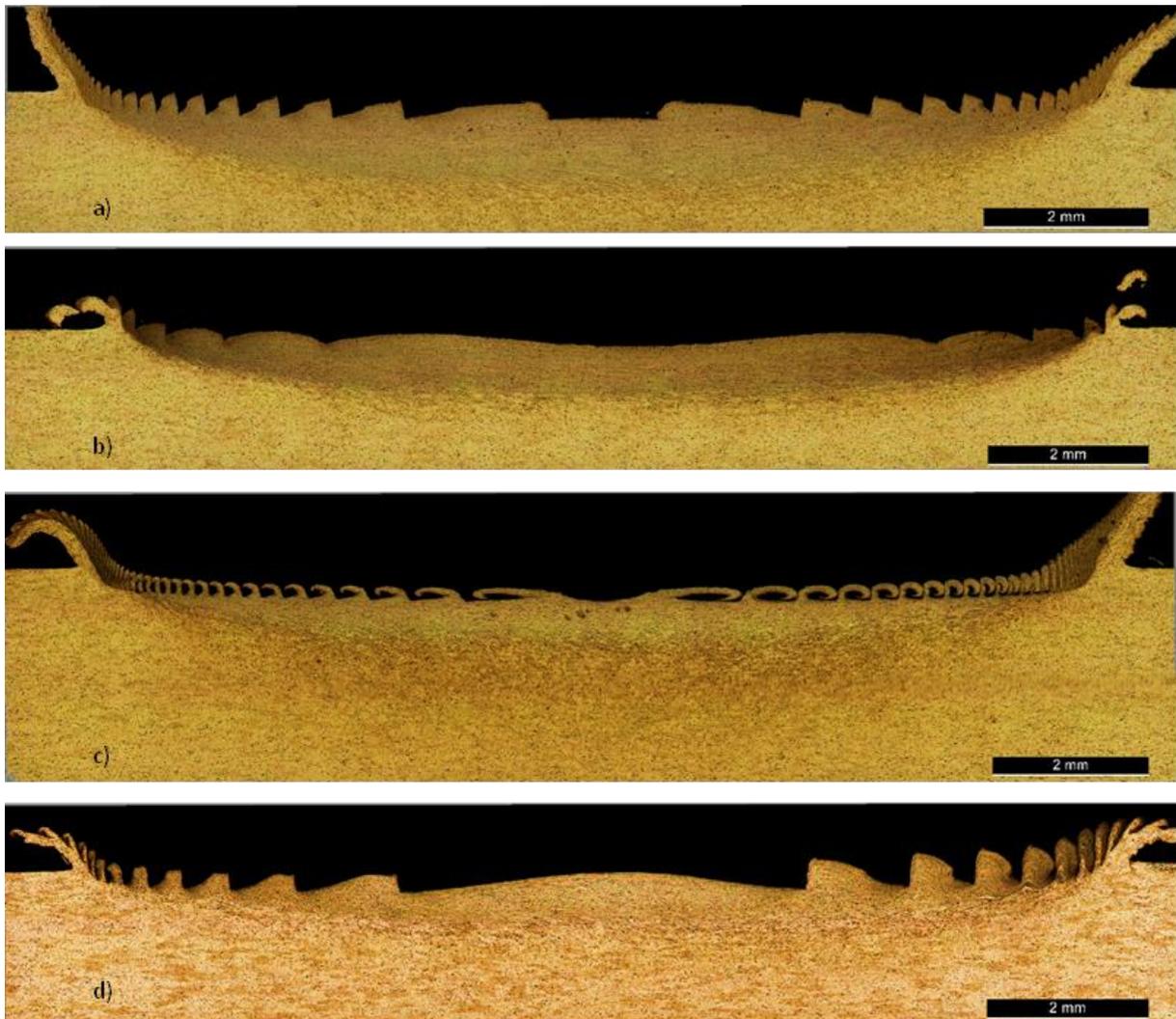
A Figura 4-11 apresenta a seção transversal da amostra P2\_600\_900 com as medidas realizadas para determinação da profundidade da ZM. Para realizar a medida desta profundidade foram realizadas medições da espessura total da chapa e da distância entre a face inferior da amostra e a fronteira entre ZM e ZTMA, utilizando o mesmo *software* responsável pela realização das fotos. Subtraindo os dois valores é possível obter a profundidade da ZM em relação ao topo da amostra. O mesmo processo foi utilizado para todas as amostras apresentadas neste capítulo.



**Figura 4-11** - Seção transversal da amostra P2\_600\_900 com medições da espessura total da chapa e distância entre a ZM e face inferior da amostra.

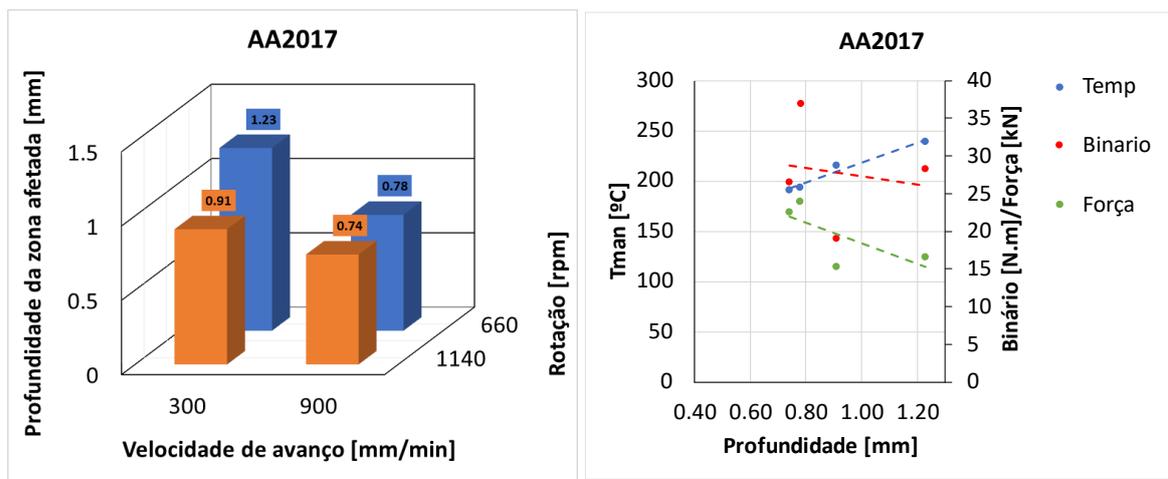
#### **4.6.1. AA2017**

Na Figura 4-12 são apresentadas as secções transversais das amostras a) P2\_660\_300, b) P2\_660\_900, c) P2\_1140\_300 e d) P2\_1140\_900. Nestas imagens, é possível identificar as quatro zonas apresentadas no subcapítulo 2.3. Na região central da soldadura nota-se a ZM devido à sua coloração mais escura e grão de tamanho muito reduzido, não sendo possível determinar suas fronteiras. Em seguida, encontra-se a ZTMA, caracterizado pelo alongamento dos grãos na direção do fluxo do material. E, por fim, encontram-se a ZTA, caracterizada por grãos bem definidos, mas com coloração diferente do MB, semelhante a todo o restante da amostra não afetada pelo processo de soldadura.



**Figura 4-12** - Secção transversal com ataque químico das amostras a) P2\_660\_300, b) P2\_660\_900, c) P2\_1140\_300 e d) P2\_1140\_900.

Os valores de profundidade de ZM para a liga AA2017 são apresentados na Figura 4-13. Para a amostra P2\_660\_300, foi medida uma profundidade de 1,23mm (cerca de 12% da espessura da chapa), para a amostra P2\_660\_900, uma profundidade de 0,78mm (8%), para a amostra P2\_1140\_300, uma profundidade de 0,91 (9%), e para a amostra P2\_1140\_900, uma profundidade de 0,74mm (7%).



**Figura 4-13** - Profundidades da ZM em AA2017 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de  $T_{ml}$ ,  $M_{ml}$ , e  $F_{ml}$ .

A Figura 4-13 também apresenta a relação dessa profundidade com os valores de  $T_{ml}$ ,  $M_{ml}$ , e  $F_{ml}$ . É possível notar que as amostras com maior ZM estão relacionadas com temperaturas mais elevadas, enquanto a força axial e binário apresentam tendência de decaimento.

É possível concluir que, para o material AA2017, os parâmetros que resultaram em soldaduras mais profundas são a velocidade de avanço e rotação mais baixas. As amostras com velocidade de avanço mais elevadas apresentaram soldaduras muito superficiais. Considerando as dimensões elevadas das chapas, este tipo de soldadura superficial poderia acarretar em um componente com baixa resistência nesta região.

#### 4.6.2. AA5083

Na Figura 4-14 são apresentadas as secções transversais das amostras a) P5\_660\_300, b) P5\_660\_900, c) P5\_1140\_300 e d) P5\_1140\_900. Para a amostra P5\_660\_300, foi medida uma profundidade de ZM de 1,09mm (11%), 1,00mm (10%) para a amostra P5\_660\_900, 1,12mm (11%) para a amostra P5\_1140\_300 e 0,73mm (7%) para a amostra P5\_1140\_900. A liga AA5083 apresentou a maior média de profundidade de ZM entre todas as ligas estudadas, apresentando valores mais constantes com as alterações de parâmetros. Este comportamento indica maior soldabilidade desta liga, apresentando menor dependência dos parâmetros de soldadura para obter um resultado satisfatório.

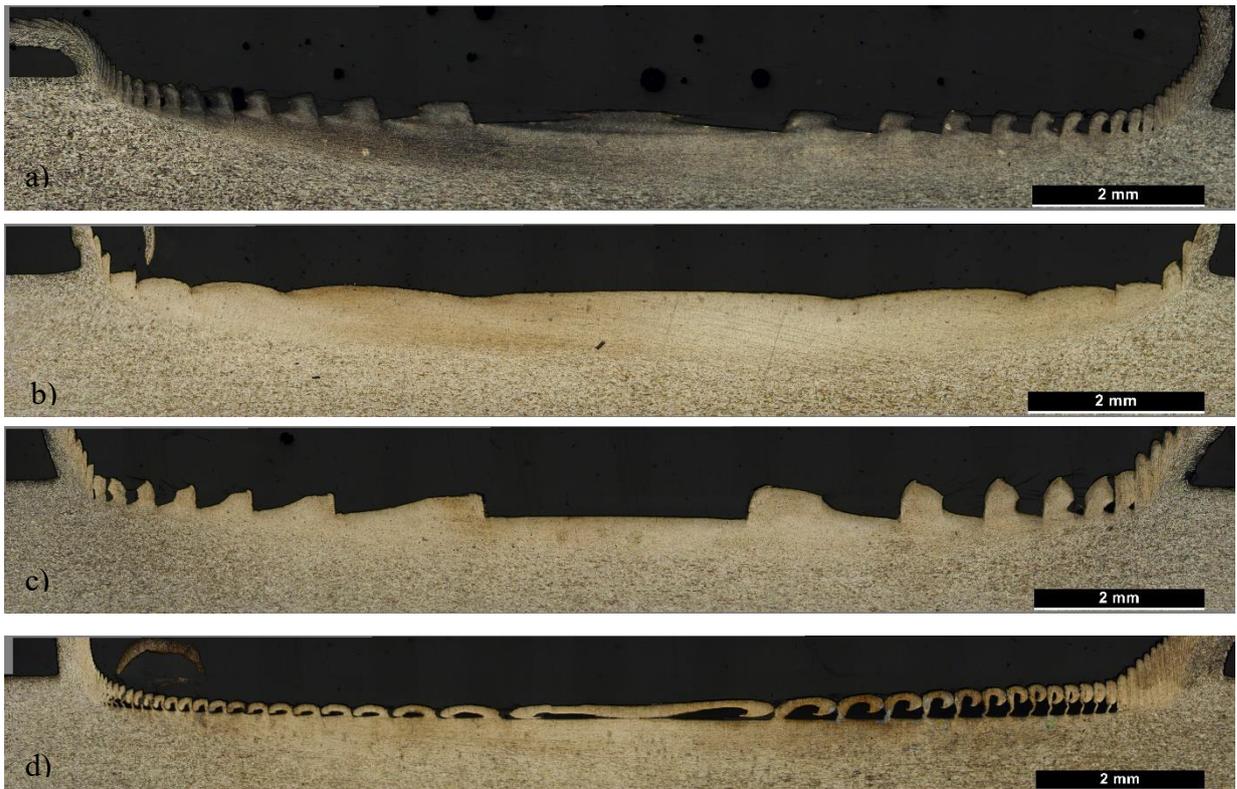


Figura 4-14 - Secção transversal com ataque químico das amostras a) P5\_660\_300, b) P5\_660\_900, c) P5\_1140\_300 e d) P5\_1140\_900.

Na Figura 4-15 são apresentados os valores de profundidade para a liga AA5083 comentados anteriormente e sua relação com os *outputs* de temperatura, binário e força axial de movimento linear. É possível observar a relação das amostras com maior ZM para temperaturas mais altas, assim como para valores menores de  $M_{ml}$  e  $F_{ml}$ .

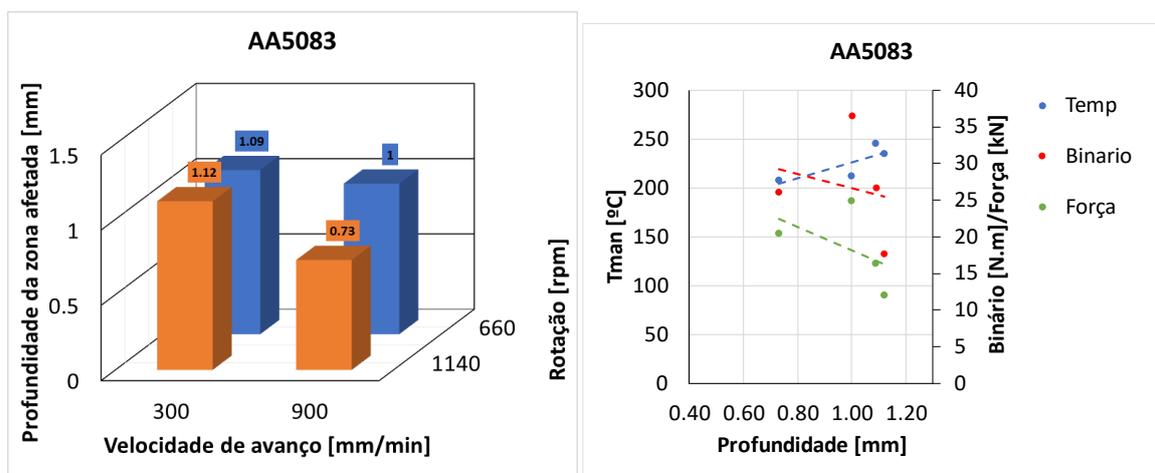
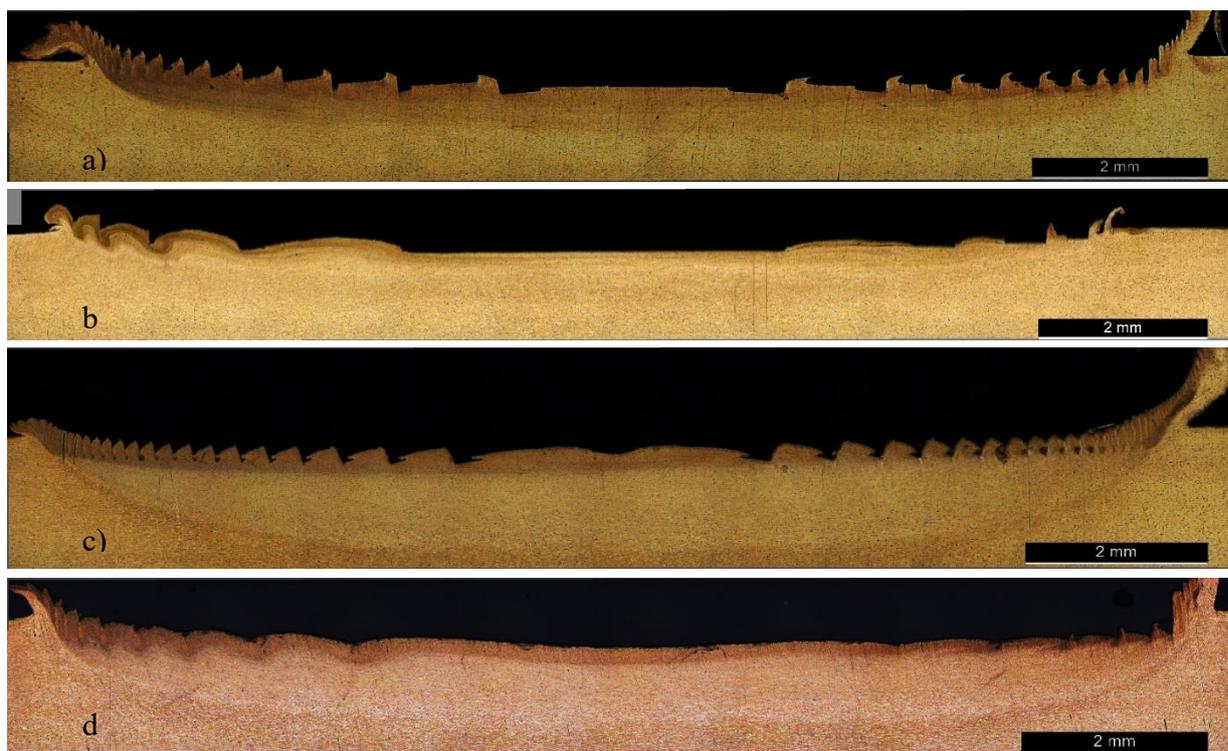


Figura 4-15 - Profundidades da ZM em AA5083 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura.

#### 4.6.3. AA6082

Na Figura 4-16 são apresentadas as secções transversais das amostras a) P6\_660\_300, b) P6\_660\_900, c) P6\_1140\_300 e d) P6\_1140\_900. Para a amostra P6\_660\_300, foi medida uma profundidade de ZM de 0,85mm (8%), 0,78mm (8%) para a amostra P6\_660\_900, 1,35mm (13%) para a amostra P6\_660\_900 e 1,23mm (12%) para a amostra P6\_1140\_900.

A Figura 4-17 apresenta os valores de profundidade de ZM para amostras de AA6082 em função das velocidades de rotação e avanço, assim como sua relação com os *outputs* de movimento linear. Analisando os valores apresentados na Figura 4-17, nota-se que as amostras de AA6082 com maior área afetada foram as submetidas à maior velocidade de rotação. Pode-se observar que o aumento da velocidade de avanço, para este material, não apresentou muita influência na dimensão da área afetada. Na mesma figura, nota-se a mesma tendência de aumento dessa área com o aumento da temperatura, observada nas amostras anteriores.



**Figura 4-16** - Secção transversal com ataque químico das amostras a) P6\_660\_300, b) P6\_660\_900, c) P6\_1140\_300 e d) P6\_1140\_900.

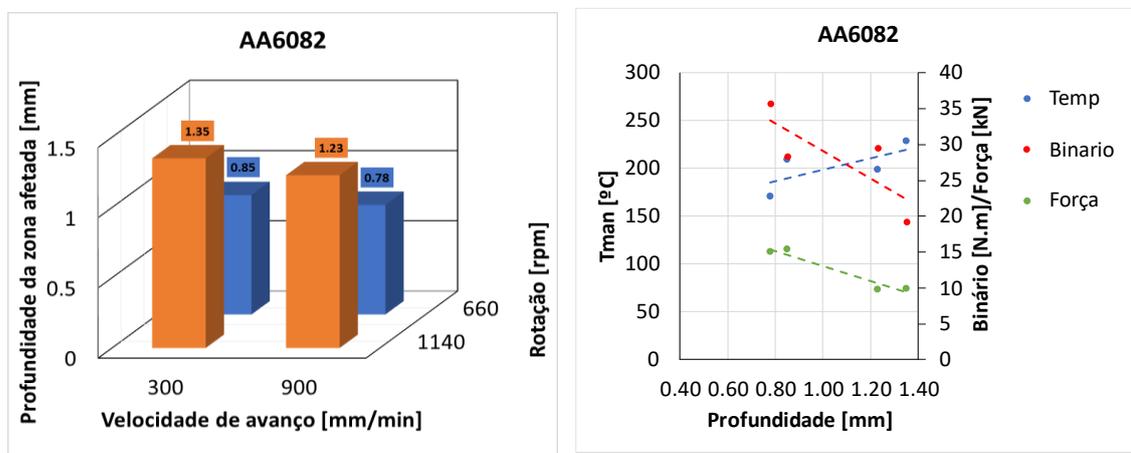


Figura 4-17 - Profundidades da ZM em AA6082 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura.

#### 4.6.4. AA7075

Na Figura 4-18 são apresentadas as secções transversais das amostras a) P7\_660\_300, b) P7\_660\_900, c) P7\_1140\_300 e d) P7\_1140\_900. Para a amostra P7\_660\_300, foi medida uma profundidade de ZM de 0,75mm (7%), 0,79mm (8%) para a amostra P7\_660\_900, 0,72mm (7%) para a amostra P7\_1140\_300 e 0,48mm (5%) para a amostra P7\_1140\_900.

A Figura 4-19 apresenta os valores de profundidade de ZM para as amostras de AA7075 e sua relação com os *outputs* de movimentação linear. Nota-se que a liga AA7075 apresenta menor área referente a ZM que as outras ligas, consequentemente resultando em uma soldadura mais superficial. A partir da Figura 4-19, nota-se pouca diferença no tamanho da ZM para as amostras deste material. A amostra P7\_1140\_900 apresenta o menor valor analisado dentre todas as amostras observadas.

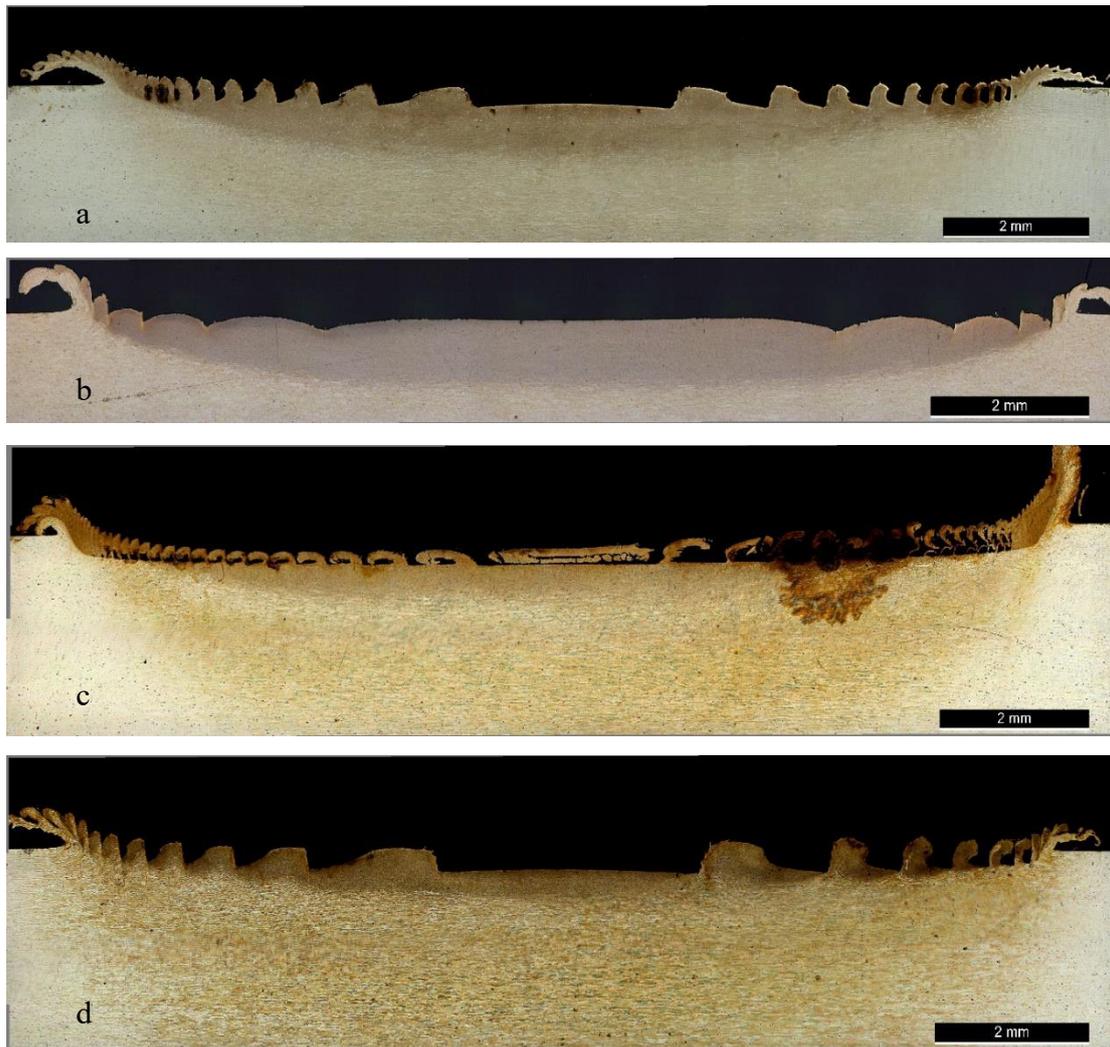


Figura 4-18 – Secção transversal com ataque químico das amostras a) P7\_660\_300, b) P7\_660\_900, c) P7\_1140\_300 e d) P7\_1140\_900.

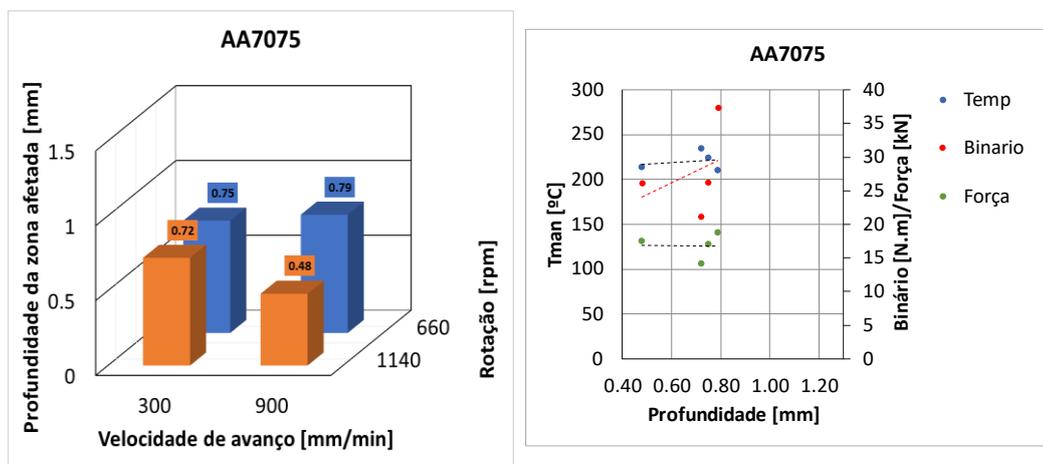


Figura 4-19 - Profundidades da ZM em AA7075 em função da velocidade de avanço e rotação, e sua relação com os valores de binário, força axial e temperatura.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

A influência dos parâmetros velocidade de rotação, velocidade de avanço e geometria da ferramenta para soldaduras FSW em chapas de alumínio de elevada espessura foi analisada. Foi possível obter as seguintes conclusões:

- Foi observado diminuição da  $T_{ml}$  com o aumento da velocidade de avanço e pouca influência do aumento da velocidade de rotação neste *output*. Apenas a liga AA6082 apresentou influência da velocidade de rotação nos valores de temperatura. As ligas AA2017 e AA6082 apresentaram menores temperaturas e maior variação com a alteração dos parâmetros de soldadura.
- Os valores de  $M_{ml}$  diminuíram com o aumento da velocidade de rotação e com a diminuição da velocidade de avanço, independente do material base. Todas as ligas apresentaram valores semelhantes quando utilizados os mesmos parâmetros de soldadura, indicando baixa influência do material base neste *output*.
- A  $F_{ml}$  apresentou aumento com aumento da velocidade de avanço. Por outro lado, verificou-se pouca influência da velocidade de rotação para as ligas AA2017, AA5083 e AA7075. A liga AA6082 foi a única que apresentou diminuição significativa deste *output* com o aumento da velocidade de rotação.
- Soldaduras utilizando a ferramenta CL6, com pino, apresentaram menores valores de binário e força axial quando comparados com amostras utilizando a ferramenta PL12, sem pino, sob os mesmos parâmetros de processo. A geometria da ferramenta apresentou influência muito reduzida nos valores de temperatura registrados.
- Para as amostras de AA2017 e AA5083 foi observada diminuição da ZM devido ao aumento da velocidade de avanço.
- Verificou-se diminuição da ZM devido à diminuição da velocidade de rotação apenas para a liga AA6082, não apresentando grande influência da velocidade de avanço.

- Amostras de AA7075 apresentaram menores zonas de mistura dentre todas as estudadas, indicando menor soldabilidade deste material, assim como pouca influência dos parâmetros de soldadura na macroestrutura.
- As maiores zonas de mistura para todas as amostras, se relacionaram com maiores valores de temperatura e menores valor de binário e força axial.

## 5.2. Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendado:

- Realização de análises de microestruturas e ensaios de dureza das regiões da soldadura.
- Estudo da influência de mais parâmetros de soldadura, como profundidade de penetração e ângulo de ataque.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. M. N. J. C. M. M. G. T.-S. P. D. and C. J. N. E. Thomas, «Friction welding», 5460317, 29 de Outubro de 1997
- [2] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, e P. J. Withers, «Friction stir welding of aluminium alloys», *International Materials Reviews*, vol. 54, n. 2. Maney Publishing, pp. 49–93, 2009. doi: 10.1179/174328009X411136.
- [3] V. M. Magalhães, C. Leitão, e D. M. Rodrigues, «Friction stir welding industrialisation and research status», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 23, n. 5. Taylor and Francis Ltd., pp. 400–409, 4 de Julho de 2018. doi: 10.1080/13621718.2017.1403110.
- [4] «FSW TWI - <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147>».
- [5] R. Nandan, T. DebRoy, e H. K. D. H. Bhadeshia, «Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties», *Progress in Materials Science*, vol. 53, n. 6. pp. 980–1023, Agosto de 2008. doi: 10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.
- [6] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, e T. DebRoy, «Review: Friction stir welding tools», *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, n. 4, pp. 325–342, Mai. 2011, doi: 10.1179/1362171811Y.0000000023.
- [7] M. A. R. Pereira, I. Galvão, J. D. Costa, R. M. Leal, e A. M. Amaro, «Joining of Polyethylene Using a Non-Conventional Friction Stir Welding Tool», *Materials*, vol. 15, n. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15217639.
- [8] H. Liu, H. Fujii, M. Maeda, e K. Nogi, «Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy».
- [9] P. H. Shah e V. Badheka, «An Experimental Investigation of Temperature Distribution and Joint Properties of Al 7075 T651 Friction Stir Welded Aluminium Alloys», *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 543–550, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.03.061.
- [10] R. S. Mishra e Z. Y. Ma, «Friction stir welding and processing», *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 50, n. 1–2. 31 de Agosto de 2005. doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [11] C. RAJENDRAN, K. SRINIVASAN, V. BALASUBRAMANIAN, H. BALAJI, e P. SELVARAJ, «Effect of tool tilt angle on strength and microstructural characteristics of friction stir welded lap joints of AA2014-T6 aluminum alloy», *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 29, n. 9, 2019, doi: 10.1016/S1003-6326(19)65090-9.
- [12] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, P. N. B. Reis, e A. Loureiro, «Effect of friction stir welding techniques and parameters on polymers joint efficiency—a critical review», *Polymers*, vol. 13, n. 13. MDPI AG, 1 de Julho de 2021. doi: 10.3390/polym13132056.
- [13] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, T. Kurita, e S. Murata, «Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy», *Int J Fatigue*, vol. 30, n. 10–11, pp. 1956–1966, Out. 2008, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.01.006.

- [14] Y. Tozaki, Y. Uematsu, e K. Tokaji, «A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance», *J Mater Process Technol*, vol. 210, n. 6–7, pp. 844–851, Abr. 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.01.015.
- [15] Y. C. Chiou, C. Te Liu, e R. T. Lee, «A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy», *J Mater Process Technol*, vol. 213, n. 11, pp. 1818–1824, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.018.
- [16] M. Simoncini, D. Ciccarelli, A. Forcellese, e M. Pieralisi, «Micro- And macro-mechanical properties of pinless friction stir welded joints in AA5754 aluminium thin sheets», em *Procedia CIRP*, 2014. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.099.
- [17] T. Mira-Aguiar, D. Verdera, C. Leitão, e D. M. Rodrigues, «Tool assisted friction welding: A FSW related technique for the linear lap welding of very thin steel plates», *J Mater Process Technol*, vol. 238, pp. 73–80, Dez. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.006.
- [18] D. G. Andrade, C. Leitão, N. Dialami, M. Chiumenti, e D. M. Rodrigues, «Analysis of contact conditions and its influence on strain rate and temperature in friction stir welding», *Int J Mech Sci*, vol. 191, Fev. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106095.
- [19] N. Dialami, M. Chiumenti, M. Cervera, e C. Agelet De Saracibar, «An apropos kinematic framework for the numerical modeling of friction stir welding», *Comput Struct*, vol. 117, pp. 48–57, 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2012.12.006.
- [20] M. Akbari, M. R. M. Aliha, e F. Berto, «Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain», *Forces in Mechanics*, vol. 10, 2023, doi: 10.1016/j.finmec.2023.100166.
- [21] M. Awang e V. H. Mucino, «Energy generation during friction stir spot welding (FSSW) of Al 6061-T6 plates», *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, n. 1–3, pp. 167–174, Jan. 2010, doi: 10.1080/10426910903206758.
- [22] D. G. Andrade, C. Leitão, N. Dialami, M. Chiumenti, e D. M. Rodrigues, «Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys», *Int J Mech Sci*, vol. 182, Set. 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105725.
- [23] D. G. Andrade, «ANALYSIS OF THE THERMO-MECHANICAL CONDITIONS IN FRICTION STIR BASED TECHNOLOGIES », Universidade de Coimbra, Coimbra, 2021.
- [24] S. B. Aziz, M. W. Dewan, D. J. Huggett, M. A. Wahab, A. M. Okeil, e T. W. Liao, «Impact of Friction Stir Welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints», *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 29, n. 9, 2016, doi: 10.1007/s40195-016-0466-2.
- [25] D. G. Andrade, S. Sabari, C. Leitão, e D. M. Rodrigues, «Shoulder related temperature thresholds in fssw of aluminium alloys», *Materials*, vol. 14, n. 16, Ago. 2021, doi: 10.3390/ma14164375.
- [26] R. S. Mishra e M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*. ASM-International, 2007.
- [27] D. M. Rodrigues, C. Leitão, R. Louro, H. Gouveia, e A. Loureiro, «High speed friction stir welding of aluminium alloys», em *Science and Technology of Welding and Joining*, Nov. 2010, pp. 676–681. doi: 10.1179/136217110X12785889550181.
- [28] J. Q. Su, T. W. Nelson, R. Mishra, e M. Mahoney, «Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium», *Acta Mater*, vol. 51, n. 3, 2003, doi: 10.1016/S1359-6454(02)00449-4.
- [29] ASM international, *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy*. ASM-International, 1995.

- [30] Carlos Miguel Almeida Leitão, «INFLUENCE OF BASE MATERIAL PLASTIC PROPERTIES AND PROCESS PARAMETERS ON FRICTION STIR WELDABILITY», Universidade de Coimbra, 2013.
- [31] C. Leitão, R. Louro, e D. M. Rodrigues, «Analysis of high temperature plastic behaviour and its relation with weldability in friction stir welding for aluminium alloys AA5083-H111 and AA6082-T6», *Mater Des*, vol. 37, pp. 402–409, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.01.031.
- [32] D. G. Andrade, C. Leitão, e D. M. Rodrigues, «Influence of base material characteristics and process parameters on frictional heat generation during Friction Stir Spot Welding of steels», *J Manuf Process*, vol. 43, pp. 98–104, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.05.015.

