



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Edgar Rocha Barbosa

**ANÁLISE E MONITORIZAÇÃO DE UMA
TECNOLOGIA DE SOLDADURA – APLICAÇÃO À
LIGAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO PARA A
INDÚSTRIA NAVAL**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica no ramo de
Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Dulce Maria Esteves
Rodrigues 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 e monitorização de uma tecnologia de soldadura – Aplicação à ligação de ligas de alumínio para a indústria naval

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

Analysis and monitoring of a welding technology - Application to the joining of aluminium alloys for the naval industry

Autor

Edgar Rocha Barbosa

Orientadores

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão

Júri

Presidente **Professora Doutora Nataliya Sakharova**
Professora Auxiliar Convidada da Universidade de Coimbra

Orientador **Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais **Doutor David Gomes Andrade**
Investigador da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2023

À minha família.

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de algumas pessoas, às quais não poderia deixar de agradecer:

Antes de mais, aos meus pais, Gabriel e Rosa, à minha irmã, Ariana e à minha avó Rosa, por tudo o que fazem e fizeram por mim, são o meu porto de abrigo em qualquer circunstância, espero um dia conseguir retribuir.

Aos meus amigos de Viana e aos que Coimbra me deu, agradecer todos os momentos passados juntos, todas as palavras de carinho e conforto assim como todos os conselhos.

À professora Dulce Rodrigues e ao professor Carlos Leitão, orientadores da presente dissertação, por toda a orientação, conhecimentos, motivação, paciência e bom ambiente de trabalho proporcionado durante o desenvolvimento deste trabalho, sem o qual seria impossível alcançar este feito.

A toda a equipa presente no laboratório e na oficina, um muito obrigado por toda a partilha de conhecimento, pela disponibilidade e pelo bom ambiente. Foi sem dúvida mais fácil percorrer este caminho a vosso lado.

Resumo

A influência dos diferentes parâmetros de processo sobre o binário, a potência de soldadura e a penetração da ferramenta em soldaduras produzidas por Tool Assisted Friction Spot Welding (TAFSW) em diferentes ligas de alumínio, foi estudada na presente dissertação. Para tal, as soldaduras foram realizadas em controlo de força, com recurso a ferramentas de vários diâmetros, usando diferentes velocidades de rotação. Como materiais de base foram utilizadas três ligas de alumínio tratáveis termicamente (AA2017-T451, AA6082-T651, AA7075-T651) e uma liga de alumínio não tratável termicamente (AA5083-H111).

As medições de temperatura foram realizadas com o auxílio de uma câmara termográfica e o binário foi registado através do equipamento onde foram produzidas as soldaduras. Também se registou para cada instante a posição que a ferramenta ocupava. O processamento dos dados do processo permitiu comparar os ciclos térmicos e os valores do binário para as diferentes condições de soldadura testadas. De entre todos os ensaios realizados, foi selecionado um nicho para análise metalográfica.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que, para o processo TAFSW, as dimensões da ferramenta, velocidade de rotação e a força axial influenciam a evolução da penetração da ferramenta. As diferentes propriedades dos materiais demonstraram influência nos valores de binário de manutenção, potência de soldadura e velocidade de rotação da ferramenta alcançados. Somente o binário estabiliza depois da força axial atingir o valor imposto, a temperatura apresenta uma evolução ao longo do processo de constante crescimento. Verificou-se que tanto o diâmetro da ferramenta como a velocidade de rotação têm forte influência nos valores de binário manutenção. De acordo com os presentes resultados, enquanto que o aumento no diâmetro da ferramenta resulta num forte aumento dos valores de binário, o aumento da velocidade de rotação leva a uma diminuição dos mesmos.

Palavras-chave: TAFSW, Binário, Velocidade de penetração, Potência de soldadura, Alumínio.

Abstract

The influence of different process parameters on the torque, welding power, and tool penetration in welds produced by Tool Assisted Friction Spot Welding (TAFSW) on different aluminum alloys was studied in this dissertation. For this, welds were performed under force control, using tools of various diameters and different rotation speeds. The base materials used were three heat-treatable aluminum alloys (AA2017-T451, AA6082-T651, AA7075-T651) and a non-heat treatable aluminum alloy (AA5083-H111). Temperature measurements were carried out with the help of a thermal imaging camera and the torque was recorded through the equipment where the welds were produced. The position of the tool at each moment was also recorded. The processing of the process data allowed to compare the thermal cycles and the torque values for the different welding conditions tested. Among all the tests carried out, one niche was selected for metallographic analysis. The work developed concluded that for the TAFSW process, the tool dimensions, rotation speed and axial force influence the evolution of tool penetration. The different properties of the materials showed influence on the maintenance torque values, welding power, and tool rotation speed achieved. Only the torque stabilizes after the axial force reaches the imposed value, the temperature presents an evolution throughout the process of constant growth. It was found that both the tool diameter and the rotation speed have a strong influence on the maintenance torque values. According to the present results, while an increase in tool diameter results in a significant increase in torque values, an increase in rotation speed leads to a decrease in the same.

Keywords: TAFSW, Torque, Penetration speed, Welding power, Aluminium.

Índice

| | |
|---|------|
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xi |
| Simbologia e Siglas | xiii |
| Simbologia..... | xiii |
| Siglas | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 3 |
| 2.1. Friction Stir Welding (FSW) | 3 |
| 2.1.1. Friction Stir Spot Welding..... | 5 |
| 2.1.2. Tool Assisted Friction Spot Welding (TAFSW)..... | 8 |
| 2.2. Condições Termomecânicas | 9 |
| 2.3. Macroestrutura e Microestrutura..... | 14 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 17 |
| 3.1. Materiais Base..... | 17 |
| 3.2. Produção das soldaduras | 18 |
| 3.2.1. Ferramentas | 18 |
| 3.2.2. Parâmetros | 19 |
| 3.3. Aquisição da temperatura | 22 |
| 3.4. Aquisição e tratamento do binário | 22 |
| 3.5. Metalografia..... | 23 |
| 4. ANÁLISE DE RESULTADOS..... | 25 |
| 4.1. Análise da penetração da ferramenta | 25 |
| 4.1.1. Comparação de resultados das diferentes ligas | 25 |
| 4.1.2. Análise da influência da força axial na penetração da ferramenta | 27 |
| 4.1.3. Análise da influência do diâmetro | 29 |
| 4.1.4. Pressão diferente..... | 30 |
| 4.1.5. Pressão semelhante | 33 |
| 4.2. Análise da evolução dos parâmetros de saída..... | 35 |
| 4.2.1. Análise de dados do binário de manutenção | 39 |
| 4.3. Análise da Potência de soldadura | 42 |
| 4.4. Macroestrutura | 43 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 47 |
| 5.1. Trabalhos futuros | 48 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |
| ANEXO A | 53 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. a) Movimento axial e rotativo da ferramenta de soldadura b) Friction Stir Welding (FSW) c) Friction Stir Spot Welding (FSSW)..... | 4 |
| Figura 2.2. FSW geometrias da ferramenta: a) FSW ferramentas com geometrias de pino diferentes, b) FSW ferramentas sem pino (adaptado de [10])..... | 5 |
| Figura 2.3. Fases necessárias à execução de soldadura por FSSW a) <i>Plunging Stage</i> , b) <i>Dwell stage</i> , c) <i>Retraction Stage</i> | 8 |
| Figura 2.4. Evolução da temperatura e do binário ao longo do tempo para a) AA2017/ PL18/ 1140 rpm, b) AA5083/ PL10/ 1500 rpm, c) AA6082/ PL16/ 870 rpm e d) AA7075/ PL12/ 660 rpm[28]. | 10 |
| Figura 2.5. Macroestrutura FSSW [42]. | 16 |
| Figura 2.6. Macroestrutura FSSW sem pino [42]..... | 16 |
| Figura 3.1. Propriedades do material base: tensão de cedência, resistência máxima à tração, dureza e condutividade térmica [38]. | 18 |
| Figura 3.2. a) Ferramenta modular b) Módulo PL10 | 19 |
| Figura 3.3. Disposição da câmara termográfica | 22 |
| Figura 3.4. Exemplo de curva de binário durante o processo TAFSW | 23 |
| Figura 4.1. Comportamento dos difentes materias base..... | 26 |
| Figura 4.2. Influência da força na velocidade de penetração da ferramenta para AA5083 e AA6082. | 27 |
| Figura 4.3. Evolução da penetração em função do diâmetro e da força para AA6082. | 28 |
| Figura 4.4. Evoluções das penetrações com o diâmetro para a) AA6082 e b) AA5083. | 29 |
| Figura 4.5. Evolução da penetração com pressões diferentes para a) AA6082 e b) AA5083 | 31 |
| Figura 4.6. Evolução das penetrações com pressões semelhantes a) e c) AA5083 e b) e d) AA6082. | 34 |
| Figura 4.7. Evolução da temperatura, Binário e Força com o tempo para a) AA2017/660rpm/PL12/8 kN, b) AA7075/660rpm/PL12/8 kN, c) AA5083/870rpm/PL12/8 kN, d) AA6082/870rpm/PL12/8 kN. | 38 |
| Figura 4.8. Evolução do Mman com a velocidade de rotação para AA5083, AA6082, AA2017 e AA7075..... | 39 |
| Figura 4.9. Evolução Mman com o diâmetro para AA6082 | 40 |
| Figura 4.10. Evolução Mman com o controlo de força, diâmetro e velocidade da ferramenta para AA5083 e AA6082. | 41 |
| Figura 4.11. Evolução da potência para as diferentes ligas..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.12. Evolução da potência com a velocidade de rotação da ferramenta e diâmetro da ferramenta para a) AA6082 e b) AA5083 | 43 |
| Figura 4.13. Macroestrutura resultante da ferramenta PL12, controlo de força de 8kn e velocidade de rotação de 660rpm para a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e d) AA7075..... | 44 |
| Figura 4.14. Macroestrutura resultante da ferramenta PL12, controlo de força de 8kn e velocidade de rotação de 1500rpm para a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e d) AA7075..... | 45 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Composição química das ligas de alumínio (% em peso) | 17 |
| Tabela 3.2. Parâmetros | 20 |
| Tabela 4.1. Pressões Resultantes | 31 |
| Tabela 4.2. Pressões resultantes | 34 |
| | |
| Tabela A. 1 Binário de manutenção, potência de soldadura. | 53 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

pr – Velocidade de penetração

dz – Profundidade de penetração

Tmax – Temperatura máxima

Tmax – Temperatura de manutenção

Mmax – Binário máximo

Mman – Binário de manutenção

Siglas

FSW – Friction Stir Welding

TWI – The Welding Institute

TAFSW – Tool Assisted Friction Spot Welding

RSW – Resistance Spot Welding

FSSW – Friction Stir Spot Welding

TAFW – Tool Assisted Friction Welding

RPM – Rotação por minuto

SZ – Stir Zone

TMAZ – Thermomechanically affected zone

HAZ – Heat Affected Zone

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por fricção (FSW) é um processo de união linear em estado sólido, desenvolvido e patenteado em 1991, por Wayne Thomas no The Welding Institute (TWI). Esta tecnologia de união, atinge temperaturas até cerca de 80% do ponto de fusão dos materiais de base, surgiu com o objetivo de ultrapassar as dificuldades da soldadura por fusão, especialmente nas ligas de alumínio. Para além de produzir soldaduras com boas propriedades mecânicas, também, devido à reduzida quantidade de calor gerado, o processo FSW permitiu minimizar a ocorrência de defeitos e distorções. O estudo e desenvolvimento da tecnologia permitiu alargar as funcionalidades do processo nas outras variantes de soldadura e a outros materiais para além do alumínio, tais como aços e materiais dissimilares. Uma dessas variantes, o processo, Tool Assisted Friction Spot Welding (TAFSW) é uma tecnologia de soldadura por pontos baseada nos princípios operativos da FSW, mas sem o movimento transversal da ferramenta e a mistura do material base visto que a ferramenta de trabalho não tem na sua constituição o tradicional pino. Face à crescente utilização de ligas de alumínio na indústria naval, devido às suas boas propriedades, como a elevada resistência mecânica e à corrosão. Também a sua utilização surge como uma forma de colmatar os desafios ambientais associados a esta indústria, tal como a redução das emissões de gases poluentes. Com isto, a TAFSW tornou-se rapidamente uma promissora tecnologia para substituir a soldadura por fusão, a soldadura por resistência (RSW) ou a típica união por rebitagem.

O principal objetivo de qualquer estudo científico sobre processos de união é desenvolver a sua reprodutibilidade e a sua aplicação eficiente a nível industrial, em que os requisitos de qualidade devem corresponder a um elevado volume de produção. Neste contexto, a análise e previsão das respostas termomecânicas durante a soldadura TAFSW são de extrema relevância para otimizar a seleção dos parâmetros do processo.

No presente trabalho, foram produzidas soldaduras por pontos utilizando a tecnologia TAFSW, em chapas de 10 mm de espessura, de diferentes tipos de ligas de alumínio, mais concretamente, as ligas tratáveis termicamente (AA2017-T451, AA6082-T651, AA7075-T651) e ligas não tratáveis termicamente (AA5083-H111). Foram utilizadas quatro

ferramentas e velocidades de rotação diferentes, assim como vários controlos de força. Os ciclos térmicos foram adquiridos através de uma câmara termográfica e foram associados aos valores de binário de saída registados pela máquina de soldar. Os dados obtidos foram tratados e posteriormente analisados tendo em conta os diferentes parâmetros do processo e os materiais de base seleccionados.

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. Após uma introdução inicial no capítulo 1, a revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 2. O capítulo começa por descrever a tecnologia FSW juntamente com as variantes que surgiram com ela. Posteriormente, é efectuada uma revisão mais focada do trabalho já desenvolvido sobre as condições termomecânicas para o processo TAFSW. No capítulo 3 é explicado o procedimento experimental, juntamente com as ferramentas utilizadas, os parâmetros de entrada do processo, as propriedades dos materiais de base e alguns pormenores sobre o tratamento dos dados. A análise e discussão dos resultados são desenvolvidas no capítulo 4.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões da presente investigação, bem como algumas recomendações para trabalhos futuros no mesmo domínio de investigação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Friction Stir Welding (FSW)

O processo *Friction Stir Welding* é um método de soldadura em estado sólido, criado e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), em Abbingdon, Reino Unido, em 1991, com o objetivo primário de colmatar as dificuldades enfrentadas pelas tradicionais metodologias de soldadura por fusão na ligação de ligas de alumínio[1]. Esta tecnologia revelou-se uma opção sustentável e segura, que não requer a utilização de material de adição ou gases de proteção, tal como as tecnologias de soldadura tradicionais, para além de que é uma tecnologia com baixo consumo energético[2].

Em termos práticos pode afirmar-se que a tecnologia FSW apresenta várias potencialidades com importante interesse industrial, tais como a possibilidade de efetuar a ligação similar e dissimilar de ligas de alumínio, a produção de ligações com elevada resistência mecânica, a supressão de defeitos característicos da soldadura por fusão, como as porosidades e a fissuração a quente, além de poder ser utilizado para unir componentes de grandes dimensões, num leque muito variado de configurações de junta [2]. Para além das ligas de alumínio, esta técnica permite ainda soldar vários outros materiais, tais como, por exemplo, as ligas de magnésio[3]. Permite ainda a ligação dissimilar de materiais metálicos, com grande foco na ligação alumínio-cobre[4]. A aplicação de ligas leves, tais como as ligas de alumínio, com elevada resistência mecânica e à corrosão, surge como uma forma de colmatar os desafios ambientais associados à indústria dos transportes, tais como a redução das emissões de gases poluentes.

Todas as vantagens mencionadas anteriormente, impulsionaram diversas indústrias, como a aeroespacial, a automóvel, a eletrónica e a naval, a utilizar a tecnologia FSW e a apoiar/incentivar o constante aprimoramento da mesma[5][2]. Portanto, desde a sua criação, a investigação em ligação de materiais por FSW não parou. A prova disso são as mais de 3000 patentes publicadas desde 1993[5].

Na Figura 2.1 está ilustrado o processo de soldadura por FSW. Tal como se mostra na figura, uma ferramenta não consumível, cilíndrica, constituída por duas partes, base e pino, e animada de um movimento de rotação constante, é inserida na interface entre os materiais

que se pretendem unir até a base entrar em contacto com a sua superfície. Quando a base atinge a superfície, a geração de calor começa devido ao atrito. O calor gerado amacia o material, e a ferramenta promove a sua mistura, por deformação plástica, em torno do seu eixo. Após um período de tempo necessário para assegurar a estabilização das condições termomecânicas, a ferramenta começa um movimento de translação linear, que assegura a ligação eficiente de vários materiais, numa gama diversificada de configurações de junta. No final da soldadura, a ferramenta é extraída, deixando um orifício de saída no componente soldado, resultante da inserção do pino na interface [2][6]. O processo FSW possui diversos parâmetros ajustáveis, usualmente designados por parâmetros do processo, os quais consistem nas velocidades de rotação e de translação da ferramenta, assim como na força axial, que promove o contato entre a ferramenta e a superfície dos elementos a ligar. Estes parâmetros são os responsáveis pela geração do calor por fricção e deformação plástica[2][7]. No entanto, para além dos parâmetros descritos, também a dimensão e a geometria da base e do pino, possuem grande influência na geração de calor, assim como no volume e fluxo do material deformado, afetando diretamente a qualidade da soldadura e a sua morfologia[8].

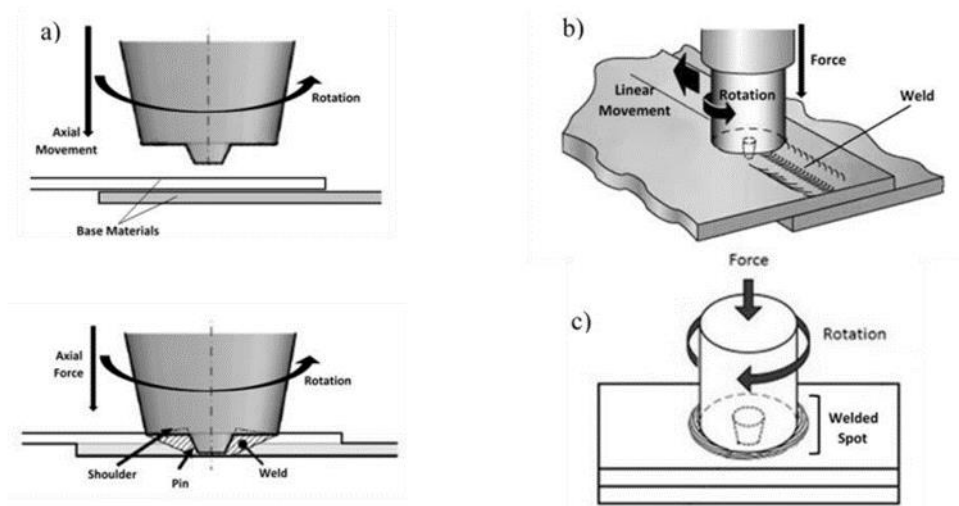


Figura 2.1. a) Movimento axial e rotativo da ferramenta de soldadura b) Friction Stir Welding (FSW) c) Friction Stir Spot Welding (FSSW).

Alguns exemplos de configurações de ferramentas passíveis de serem utilizadas na ligação por FSW de ligas metálicas são apresentados na Figura 2.2. Recentemente, com o objetivo de eliminar o orifício deixado pelo pino[8], após a sua extração, e as tensões provocadas por ele, foi testada a utilização de ferramentas sem pino, que apresenta a

vantagem acrescida de permitir aumentar a vida útil das mesmas. No entanto, devido à ausência do pino, a mistura mecânica dos materiais base em torno da ferramenta (*stir*) é suprimida, sendo a ligação obtida através de uma combinação de deformação plástica da interface e de difusão atômica a alta temperatura. Apesar da supressão da mistura dos materiais, alguns estudos concluíram já que as soldaduras obtidas com ferramentas sem pino apresentam qualidade semelhante ou superior às realizadas com pino[9][10][11][12]. Esta variante da tecnologia FSW, que faz uso de ferramentas sem pino, é apelidada na literatura de *pinless* FSW, ou então, mais recentemente, de *Tool Assisted Friction Welding* (TAFW), designação esta, proposta pela Universidade de Coimbra[9]. De realçar ainda que, a realização de soldaduras por pontos, executada através da supressão do movimento de translação da ferramenta, deu já origem a uma outra variante da tecnologia FSW, designada por *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), processo este que será aprofundado no subcapítulo seguinte.

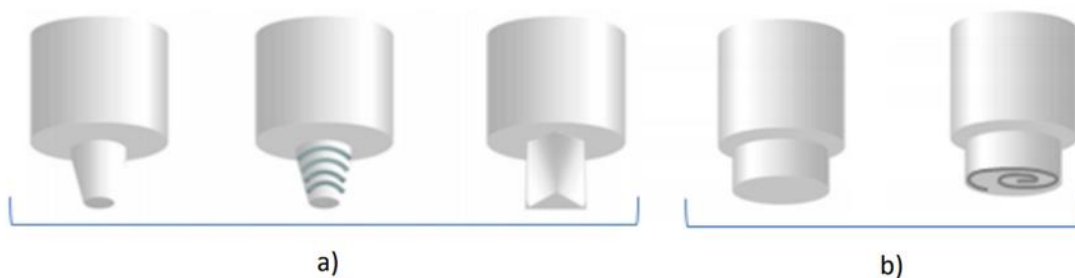


Figura 2.2. FSW geometrias da ferramenta: a) FSW ferramentas com geometrias de pino diferentes, b) FSW ferramentas sem pino (adaptado de [10]).

2.1.1. Friction Stir Spot Welding

A utilização de soldadura por pontos, é o método mais rápido, económico e prático, de unir chapas sobrepostas. Para efetuar este tipo de ligação, a tecnologia *Resistance Spot Welding* (RSW) é o método mais utilizado industrialmente. Este processo baseia-se na aplicação simultânea de calor, gerado por resistência elétrica, e de pressão, para realizar a soldadura. A pressão é aplicada por elétrodos, que em contacto com as chapas a soldar, conduzem a corrente elétrica necessária à geração de calor por efeito de Joule, calor esse que promove a fusão localizada do material base, que solidifica sob pressão, originando a soldadura [13]. Tal como já referido, suprimindo o movimento de translação da ferramenta, na tecnologia

FSW, é possível efetuar soldadura por pontos, tal como em RSW, designando-se este procedimento por FSSW[14].

A metodologia de soldadura por FSSW pode ser dividida em três fases, tal como se mostra na Figura 2.3. Na primeira fase, denominada de *Plunging Stage* (Figura 2.3), a ferramenta animada com uma velocidade de rotação constante, é inserida na interface entre os materiais a soldar. A velocidade a que a ferramenta desce, ao penetrar a peça, é designada por velocidade de penetração (p_r), e a distância que a mesma penetra na peça é designada de profundidade de penetração (d_z). Quando a ferramenta entra em contacto com os materiais a ligar, inicia-se a interação mecânica e o amaciamento do material base, originado pelo calor gerado pela fricção entre este e a ferramenta, assim como pela deformação plástica.

A segunda fase, designada por *Dwell Stage* (Figura 2.3), começa após a profundidade de penetração pré-estabelecida ser atingida. Nesta tecnologia, a penetração da ferramenta pode ser estabelecida de dois modos distintos, por controlo de força ou por controlo de posição. Em controlo de força é estabelecido um valor máximo para a força axial que atua na ferramenta e a penetração desta termina quando esse valor de força é atingido. Em controlo de posição é estabelecido o valor máximo para a penetração da ferramenta. Após concluída a penetração da ferramenta, esta permanece em rotação durante um período de tempo pré-definido, normalmente de alguns segundos, que é designado por *dweel time*, no caso de ser utilizada soldadura em controlo de posição. No caso de o processo estar a ser executado em controlo de força, existem dois critérios que podem ser utilizados para a definição do *dweel time*. Pode ser utilizado um intervalo de tempo pré-definido, tal como em soldadura em controlo de posição, ou então, um valor máximo para a penetração da ferramenta no metal base, visto que o movimento axial da ferramenta pode não parar em controlo de força, devido ao amaciamento contínuo do material. Durante o *Dweel Stage*, a ferramenta promove a ligação dos materiais a unir, por mistura mecânica dos mesmos através da interface. Após este período, inicia-se a terceira fase do processo, durante o qual a ferramenta é extraída da soldadura, e é designado por *Retraction Stage* (Figura 2.3). É nesta fase que se forma o indesejável orifício, na soldadura, no caso de serem utilizadas ferramentas convencionais com pino.

A ligação por FSSW, que está representada na Figura 2.1c e na Figura 2.3, rapidamente demonstrou ser uma promissora alternativa ao processo RSW ou à típica união por rebites, ambos utilizados com a mesma finalidade[15], em diversas indústrias. Promissora

alternativa pois, apresenta as mesmas vantagens da tecnologia FSW, tais como o facto de ser considerada uma tecnologia verde e possuir uma boa rentabilidade económica. Estima-se que a utilização de FSSW resulta em 90% de poupança de energia e 40% de redução do capital investido, quando comparada com a utilização de RSW, na ligação de ligas de alumínio. Com efeito, a utilização do processo FSSW evita a necessidade de investir em vários equipamentos necessários à utilização da tecnologia RSW na ligação de ligas de alumínio, incluindo uma potente fonte de energia eléctrica, uma unidade de arrefecimento e uma máquina para o tratamento dos eléctrodos[16]. De realçar também o facto de, sendo a tecnologia FSSW um método de ligação em estado sólido, permitir evitar os usuais problemas de soldabilidade por fusão das ligas de alumínio, tais como a fissuração a quente e a formação de porosidades, entre outros[13]. Atendendo ao exposto, poder-se-á afirmar que a tecnologia FSSW permite produzir soldaduras com resistência comparável ou superior às produzidas por RSW[13]. Para além disso, permite ainda soldar uma gama mais diversificada de materiais, desde alumínios e aços, até a polímeros. No entanto, tal como a tecnologia FSW, apresenta também o problema de as soldaduras conterem um orifício central, associada à extração do pino, no final da operação de soldadura [17]. A presença desse orifício, que conduz a uma redução da secção resistente das soldaduras, constitui um defeito geométrico propício a originar concentração de tensões e, também, problemas de corrosão[18][19].

De modo a colmatar os problemas descritos, várias variantes da tecnologia FSSW foram já desenvolvidas e outras estão em constante desenvolvimento. Entre elas, as mais relevantes são a técnica *Pinless* FSSW[12], criada para combater o problema do orifício deixado pela ferramenta através da supressão do pino da ferramenta, e a técnica *Refill* FSSW[20] que envolve a adição de material de modo a preencher o orifício, e, mais recentemente, a técnica *Tool Assisted Friction Spot Welding* (TAFSW)[21].

No entanto, não é só a geometria da ferramenta que condiciona as propriedades das ligações, mas também os parâmetros de soldadura. Muitos investigadores estudaram o efeito da geometria da ferramenta e dos parâmetros do processo nas propriedades mecânicas das soldaduras produzidas por FSSW. Conclui-se que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta e do *dwell time* faz com que aumente a resistência à tracção das soldaduras, neste caso utilizando com material base as ligas de alumínio AA6061, AA7010 e AA6111 [13][22]. A largura da soldadura e a sua resistência estão intrinsecamente conectadas. O

dwell time é o parâmetro mais importante na obtenção de soldaduras com boas propriedades, seguido da velocidade de rotação da ferramenta e, por último, da penetração atingida[23]

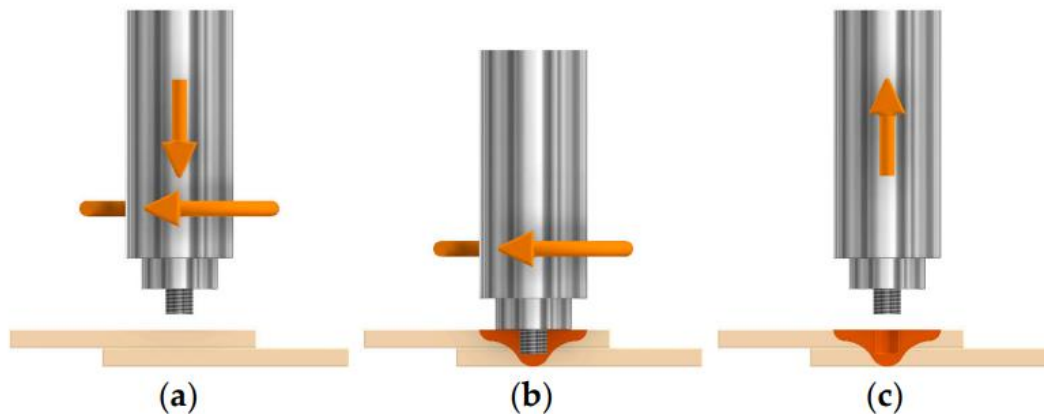


Figura 2.3. Fases necessárias à execução de soldadura por FSW a) *Plunging Stage*, b) *Dwell stage*, c) *Retraction Stage*

2.1.2. Tool Assisted Friction Spot Welding (TAFSW)

A aplicação de ferramentas sem pino na soldadura por pontos ocorreu, pela primeira vez, em 2009[13], tendo sido designada por *pinless* FSSW. No entanto, em algumas aplicações, constatou-se que a utilização de ferramentas sem pino não promove a mistura mecânica dos metais a ligar através da interface (*stir*), pelo que os mecanismos de ligação são necessariamente diferentes daqueles que ocorrem em FSSW. Com base nessa constatação, foi proposta a designação *Tool Assisted Friction Spot Welding* (TAFSW)[24] para o processo e iniciou-se um ciclo de investigações com vista a averiguar os mecanismos de ligação dos materiais, na ausência de mistura mecânica. Esta investigação iniciou-se na sequência de estudos devotados ao desenvolvimento da tecnologia *Tool Assisted Friction Welding* (TAFW)[9].

A tecnologia TAFW apresenta várias qualidades, tais como a supressão do orifício resultante da utilização do pino, e ainda, de outros defeitos característicos da ligação em junta sobreposta por FSW, tal como os defeitos do tipo *hook* [25]. Este defeito resulta do fluxo ascendente do material da chapa inferior da junta sobreposta, que cria uma região não ligada, que se apresenta como uma fenda em forma de gancho[26]. A tecnologia TAFW permite também soldar chapas muito finas com elevada eficiência[9].

Tal como já referido, a ferramenta utilizada em TAFSW é formada apenas pela base, podendo esta apresentar várias configurações, ou seja, ser completamente lisa ou, então, apresentar ligeiros relevos, tal como se mostra na Figura 2.2 b). A introdução de relevos na base da ferramenta tem por objetivo promover um aumento da deformação plástica e do atrito, conduzindo a uma maior geração de calor [12][27]. Como não há mistura mecânica dos materiais [21], a ligação é criada pelo ocorrência de difusão atômico através da interface, sob as altas pressões e temperaturas originadas pela ferramenta [9].

Em TAFSW, as propriedades das soldaduras são determinadas pela geometria da ferramenta (diâmetro e morfologia), pelos parâmetros do processo e pelas propriedades do material base. Um estudo realizado em 2014 permitiu concluir que a velocidade de rotação da ferramenta e o *dwell time* são os factores que efetivamente determinam a resistência das juntas. Concluíram também que quanto maior a velocidade de rotação e/ou maior o *dwell time*, mais grave é o defeito de *hook* [19].

Em TAFSW, tal como em FSSW, as soldaduras tanto podem ser efetuadas em controlo de força, como em controlo de posição.

2.2. Condições Termomecânicas

O binário e a temperatura estão ligados. No entanto, há pouco conhecimento sobre o modo como o binário evolui com as condições de soldadura, assim como sobre a evolução da temperatura durante a soldadura ou da relação entre o binário e a temperatura. Portanto, este continua a ser um tópico amplamente abordado na literatura sobre FSW e tecnologias relacionadas.

Na Figura 2.4 são apresentados os resultados relativos à evolução da temperatura e do binário, durante a soldadura por TAFSW de quatro ligas de alumínio. Estes resultados referem-se a soldaduras efetuadas em controlo de posição por Costa Gaspar[28]. Neste estudo concluiu-se que as evoluções da temperatura e do binário ao longo do tempo são independentes dos parâmetros do processo e das características dos metais base, neste caso, quatro ligas de alumínio com propriedades marcadamente diferentes. Todas as curvas apresentadas na figura mostram que um aumento acentuado do binário e da temperatura ocorre nos primeiros 4 segundos do processo, o qual resulta da rápida transição das condições termomecânicas associadas ao *Plugin Stage*. Com efeito, durante este estágio do

processo, o contacto inicial entre a ferramenta e as chapas, promove a geração de calor por atrito, o qual amacia o metal base, facilitando a sua deformação plástica e estabelecendo um novo mecanismo de geração de calor. Quando a ferramenta atinge a profundidade de mergulho pré-definida, o binário atinge o seu valor máximo, iniciando-se então a segunda fase do processo, o *Dwell Stage*. Durante este estágio, o amaciamento do material, associado ao aquecimento, reduz o esforço necessário para o deformar plásticamente em torno da ferramenta, permitindo assim que o binário diminua, até ser atingido um valor que permanece praticamente constante até ao final do *Dwell Stage*. Durante este período, a temperatura também estabiliza num valor máximo. Em geral, quando os valores máximos da temperatura atingida durante o processo aumentam, os valores do binário diminuem. Portanto, a dependência entre o binário e a temperatura é condicionada pela geração de calor associada ao atrito e à deformação plástica.

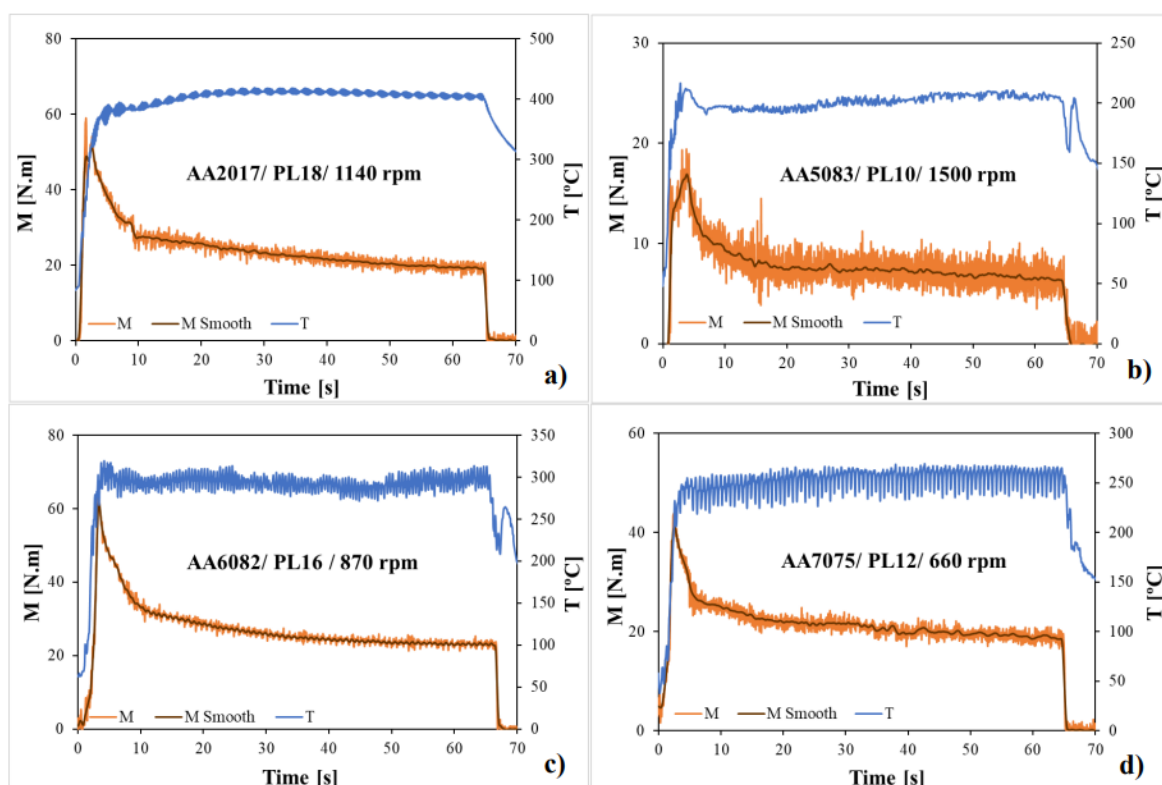


Figura 2.4. Evolução da temperatura e do binário ao longo do tempo para a) AA2017/ PL18/ 1140 rpm, b) AA5083/ PL10/ 1500 rpm, c) AA6082/ PL16/ 870 rpm e d) AA7075/ PL12/ 660 rpm[28].

A compreensão dos mecanismos de geração de calor, assim como a previsão da temperatura atingida ao longo do processo, também carecem ainda de estudo, de modo a desenvolver conhecimentos fulcrais para a seleção das combinações ótimas de parâmetros,

para uma gama muito diversificada de aplicações e materiais base. Como já referido anteriormente, sendo esta uma tecnologia de soldadura em estado sólido, são atingidas temperaturas entre 0,94 a 0,98 da temperatura de fusão do material base[29]. É expectável que os ciclos térmicos de soldadura possam ser totalmente controlados por uma cuidadosa seleção das características da ferramenta e dos parâmetros do processo.

Foram já vários os trabalhos que analisaram a influência da velocidade de rotação, do comprimento do pino e do diâmetro da base e do pino, nos ciclos térmicos produzidos em soldadura por FSW e por FSSW de ligas de alumínio[30]. De acordo com a literatura, as duas fontes principais de geração de calor durante o processo FSW são o atrito, resultante do contato entre a ferramenta e a peça, e a deformação plástica, resultante da agitação/mistura do material em torno do eixo da ferramenta. De acordo com Awang e Mucino et al. [31], o atrito é responsável por cerca de 97% da geração de calor, enquanto a deformação plástica é responsável por apenas 3%. No entanto, esta conclusão não é consensual e a investigação em torno deste tema é ininterrupta. Com efeito, outro trabalho mostrou que o calor resultante da deformação plástica tem um efeito considerável nas temperaturas máximas atingidas[32] e que 95% da potência mecânica de entrada é transformada em energia de deformação plástica, e convertida em calor, enquanto o restante é armazenado sob a forma de deslocamentos e outros defeitos microestruturais, como novas fronteiras de grão.

Atualmente, a compreensão total dos princípios termomecânicos subjacentes ao processo de soldadura por FSW não foi ainda alcançada, faltando ainda dados importantes que relacionam os parâmetros do processo, e as propriedades dos materiais, com as condições de processamento e as características mecânicas e metalúrgicas dos componentes processados. De acordo com Colligan e Mishra et al. [33], o conhecimento desses dados será útil na otimização das condições do processo com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e microestruturais das soldaduras e eliminar defeitos de soldadura/processamento.

Encontrar um parâmetro de saída do processo, que permita o controlo das condições de processamento, permitindo a monitorização em tempo real das propriedades das soldaduras, é também um passo importante para consolidar a aplicação generalizada das técnicas FSW a nível industrial. Longhurst et al. [34] propuseram a utilização do binário registado pelas máquinas de soldar como parâmetro de controlo do processo FSW, em

alternativa a outros trabalhos que propõe o controlo do processo através da monitorização da profundidade de penetração da ferramenta ou da força vertical. Segundo eles, o controlo por binário é mais fácil de adaptar a condições de trabalho variáveis, tais como alterações nas características da peça de trabalho, pois o binário constitui um indicador mais adequado da profundidade da ferramenta do que a força axial. Em FSSW, o binário tem já sido utilizado como instrumento de monitorização, em tempo real, para a prevenção e deteção de defeitos[35]. O binário é também considerado a forma mais precisa de determinar a energia gasta no processo de soldadura[34]. Neste contexto, a modulação da relação entre os diferentes parâmetros do processo e o binário é vista como tendo grande potencial para a otimização da tecnologia de soldadura TAFSW. Com efeito, foi já demonstrado que em TAFSW, o binário registado durante a operação de soldadura depende de parâmetros de processo tais como a velocidade de rotação e características da ferramenta, tais como o diâmetro[28].

Freeney et al.[36] estudaram o efeito da velocidade de rotação nas propriedades mecânicas de soldaduras produzidas por FSSW na liga de alumínio AA5052, assim como a sua influência na geração de calor e no binário atingido ao longo de processo. Os autores fizeram variar a velocidade de rotação da ferramenta entre 1000 e 3000 rpm, mas utilizaram valores constantes para a velocidade de penetração (2,5 mm/s) e para o *Dwell time* (490 ms). De acordo com este trabalho, quanto menor a velocidade de rotação da ferramenta, menor é a quantidade de calor gerado por fricção, o que promove um menor amaciamento do material e, conseqüentemente, conduz a maiores valores da tensão associada ao fluxo plástico, e, assim, a maiores valores do binário registado. Os autores concluíram também que a resistência da soldadura é proporcional à sua dimensão, sendo que esta aumenta para velocidades de rotação da ferramenta menores.

Costa Gaspar et al. [28] estudou a influência dos diferentes parâmetros do processo FSSW sobre o binário e a temperatura desenvolvidos, em soldadura em controlo de posição, com ferramentas sem pino (equivalente a TAFSW), das ligas de alumínio AA2017-T451, AA6082-T651, AA7075-T651 e AA5083-H111. O autor concluiu que o diâmetro da base da ferramenta é o principal parâmetro que condiciona a geração de calor, enquanto que a velocidade de rotação apresenta uma influência menor nas temperaturas alcançadas durante o *Dwell Stage*. De acordo com o autor, as propriedades das diferentes ligas de alumínio

estudadas, não tiveram um impacto perceptível nos valores das temperaturas registadas, nem nos valores do binário.

Uma das primeiras investigações efetuadas sobre *pinless* FSSW mostrou a importância da geometria da base nas temperaturas máximas atingidas e no fluxo do material. O estudo visou a ligação de ligas de alumínio AA6111-T4, utilizando uma velocidade de rotação de 2000 rpm e um *dwell time* máximo de 2,5 segundos, tendo sido testadas duas ferramentas, uma de base plana e uma de base estriada. De acordo com os autores, enquanto a utilização da ferramenta de base plana, com 10 mm de diâmetro, conduziu a uma temperatura máxima de 380°C, a utilização da ferramenta de base estriada, com o mesmo diâmetro, conduziu a uma temperatura máxima de 430°C[37].

Andrade et al. [38] avaliaram a geração de calor em *pinless* FSSW das ligas de alumínio AA5083, AA6082, AA2017 e AA7075. Neste trabalho foram testadas ferramentas revestidas e não revestidas, com diversas combinações de parâmetros do processo e geometrias da ferramenta. Os autores concluíram que a temperatura aumenta de forma não linear com o aumento do diâmetro da base, independentemente da velocidade de rotação utilizada. Houve um aumento de cerca de 250°C, quando o diâmetro da base da ferramenta aumentou de 10 mm para 18 mm, para todas as ligas estudadas. Por outro lado, independentemente da liga ou do diâmetro da base utilizado, a temperatura quase não variou com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta para valores acima de 600 rpm, revelando assim, que para velocidades de rotação superiores a 600 rpm, os ciclos térmicos podem ser totalmente controlados por uma seleção adequada do diâmetro da ferramenta. O binário da ferramenta diminuiu com o aumento da velocidade de rotação e com a diminuição do diâmetro da ferramenta. Para os diâmetros de ferramenta de 10 e 18 mm, o aumento da velocidade de rotação de 660 para 1500 rpm, resultou numa diminuição do binário de cerca de 7 e 20 N.m, respectivamente. O revestimento da ferramenta não proporcionou resultados diferentes nas temperaturas atingidas ao longo do processo, nem nos perfis de dureza, relativamente a ferramentas não revestidas.

A importância de parâmetros tais como o *dwell time* e a profundidade de penetração, na geração de calor em *pinless* FSSW, foi avaliada num trabalho experimental, efetuado na liga de alumínio AA6061 [39]. O aumento do valor do *dwell time* de 3 para 5 segundos, fez com que a temperatura aumentasse de cerca de 268°C para aproximadamente 306°C, para uma velocidade de rotação de 1000 rpm. Para a velocidade de rotação de 1500 rpm, o

aumento de temperatura foi muito semelhante, 274°C para 310°C. As soldaduras foram realizadas em controlo de posição, mas tal como observado poderiam ter sido realizadas em controlo de força uma vez que a força axial tem uma relação linear com a profundidade de imersão, ao monitorizar a força axial pode ser possível avaliar a profundidade que a ferramenta atinge e o tamanho do ponto de soldadura resultante. Quando se aumentou a profundidade de mergulho da ferramenta, em apenas 0,05 mm, verificou-se um aumento de 30°C nas temperaturas registadas. Maior profundidade equivale a maior área de contacto entre a ferramenta e o material, o que promove maior geração de calor. Por fim, tal como reportado por Costa Gaspar et al.[28] , foi uma vez mais demonstrado que velocidades de rotação superiores a 600 rpm, apresentam pouca influência na geração de calor. As velocidades de rotação utilizadas neste trabalho foram respetivamente 750, 1250 e 1750 rpm.

Leitão et al.[40] estudou a influência do comportamento plástico a altas temperaturas de duas ligas de alumínio, AA5083-T111 e AA6082-T6, na sua soldabilidade por FSW. O comportamento plástico das duas ligas, em diferentes condições de ensaio, foi analisado e comparado através de caracterização mecânica. Conclui-se que a liga AA6082, que apresenta forte amaciamento durante a deformação plástica a alta temperatura, tem uma boa soldabilidade em FSW. Já para a liga AA5083, que apresenta um comportamento quase perfeitamente plástico a alta temperatura, foi registada uma soldabilidade muito reduzida sob as mesmas condições de soldadura da liga AA6082. Este comportamento foi atribuído à forte influência das propriedades plásticas dos materiais base, a altas temperaturas e velocidades de deformação, no fluxo do material durante a soldadura, bem como nas condições de contacto na interface ferramenta-peça. De acordo com os autores, o aumento do binário com o aumento das dimensões da ferramenta tem de estar relacionado com o aumento da quantidade de material arrastado pela mesma[41][35].

Todos os trabalhos apresentados, à exceção do que foi guiado por Leitão et al. [40], foram realizados sob controlo de posição, portanto, há uma falta de dados sobre as condições termomecânicas desenvolvidas durante a ligação de ligas de alumínio em controlo de força.

2.3. Macroestrutura e Microestrutura

Na Figura 2.5 mostra-se um exemplo da macroestrutura de uma soldadura produzida por FSSW, utilizando uma ferramenta convencional, ou seja, com pino. Tal como mostra a

figura, as soldaduras produzidas com ferramentas convencionais, podem ser subdivididas em várias regiões, tais como a *stir zone* (SZ), a *thermomechanically affected zone* (TMAZ) e a *heat-affected zone* (HAZ). A SZ resulta da intensa deformação plástica, a temperaturas e velocidades de deformação elevadas, do material base, sendo caracterizada por uma microestrutura de grão fino e equiaxial, resultante da ocorrência de recristalização dinâmica durante o processo de soldadura. A TMAZ, por outro lado, é uma região que sofre os efeitos da deformação e da temperatura, mas com menor intensidade do que a SZ, pelo que não apresenta grão recristalizado. Como resultado, esta zona é constituída por grãos distorcidos e alinhados com a direcção de atuação da ferramenta. Por fim, a ZTA, é constituída pela porção de material base que não foi deformada plasticamente, mas atinge temperaturas suficientemente elevadas para aí ocorrerem transformações microestruturais importantes.

Geralmente, nas ligas de alumínio tratáveis termicamente, o ciclo térmico durante o processo pode levar a perdas importantes de resistência na HAZ em comparação com outras regiões da soldadura. A perda de resistência mecânica ocorre devido ao engrossamento ou dissolução dos precipitados de reforço durante o ciclo térmico. As soldaduras em ligas não tratáveis-termicamente, que são endurecidas através de trabalho mecânico a frio, na maioria dos casos, apresentam um aumento de dureza na SZ e na TMAZ, em resultado da intensa deformação plástica imposta pelo processo. Por outro lado, nestas ligas, a HAZ é geralmente recozida pelo calor gerado no processo, o que pode conduzir a uma perda de resistência mecânica nesta região em relação ao material base. Por esta razão, o estudo dos ciclos térmicos durante o processo FSSW é importante.

Yazdi et al.[42] conduziram um estudo comparando a utilização de ferramentas com e sem pino, com bases estriadas com diferentes geometrias, para a ligação por FSSW da liga de alumínio AA6061-T6. As soldaduras foram produzidas em controlo de posição, com velocidade de rotação de 1400 rpm e *dwell time* de 6 segundos. Na Figura 2.5 e na Figura 2.6 mostram-se as secções transversais das soldaduras obtidas.

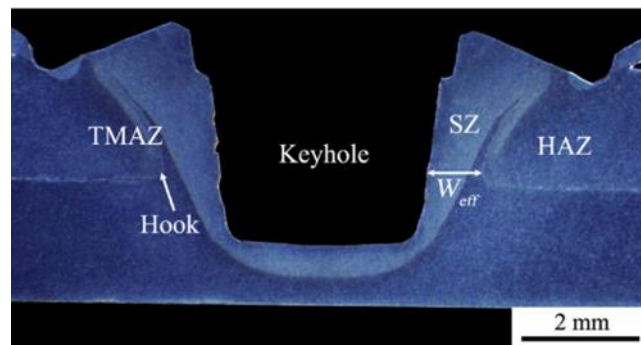


Figura 2.5. Macroestrutura FSSW [42].

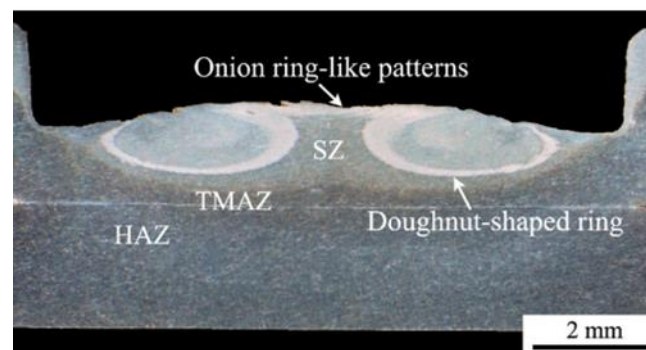


Figura 2.6. Macroestrutura FSSW sem pino [42].

Na Figura 2.5 e na Figura 2.6 mostram-se as secções transversais das soldaduras obtidas. Várias conclusões foram retiradas do trabalho. Os valores de resistência à tracção mais elevados foram registados para as soldaduras efectuadas com ferramentas sem pino, que foram aquelas para as quais foram registadas superfícies de ligação mais amplas. A soldadura realizada com a ferramenta sem pino, com base estriada em forma de L, revelou ser ligeiramente mais larga e profunda. Nas soldaduras realizadas com ferramenta com pino, conclui-se que quanto maior o tamanho do pino, maior o volume do orifício deixado, assim como o volume de material arrastado pela ferramenta e a largura efetiva da soldadura. Na presente dissertação é estudada a macroestrutura de soldaduras realizadas em controlo de força, com uma ampla diversidade de parâmetros de soldadura, em 4 ligas de alumínio diferentes.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Base

As ligas de alumínio são cada vez mais utilizadas na indústria naval, devido às suas propriedades, como a elevada resistência mecânica e à corrosão, assim como a baixa densidade, que faz com que o peso dos componentes seja reduzido, promovendo assim um menor consumo de combustível, que permite colmatar os desafios ambientais associados a esta indústria.

Neste trabalho, foram utilizadas quatro ligas de alumínio como material base, três delas tratadas termicamente (AA2017-T451, AA6082-T651 e a AA7075-T651) e uma não tratada termicamente (AA5083-H111). Na Tabela 3.1 é apresentada a composição química destas ligas, e na Figura 3.1, algumas das suas propriedades mecânicas e térmicas. As diferenças na composição química e nos mecanismos de endurecimento, entre estas quatro ligas, têm um impacto importante sobre as suas propriedades mecânicas a alta temperatura e, deste modo, no fluxo de material durante o processo de soldadura

Tabela 3.1. Composição química das ligas de alumínio (% em peso)

| Material | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|-------------|---------|-----|---------|-------|---------|-----------|---------|------|------|
| AA2017-T451 | 0.2–0.8 | 0.7 | 3.5–4.5 | 0.4–1 | 0.4–1 | 0.1 | 0.25 | 0.25 | Rem. |
| AA5083-H111 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.4–1 | 4–4.9 | 0.05–0.25 | 0.25 | 0.15 | Rem. |
| AA6082-T651 | 0.7–1.3 | 0.5 | 0.1 | 0.4–1 | 0.6–1.2 | 0.25 | 0.2 | 0.1 | Rem. |
| AA7075-T651 | 0.4 | 0.5 | 1.2–2 | 0.3 | 2.1–2.9 | 0.18–0.28 | 5.1–6.1 | 0.2 | Rem. |

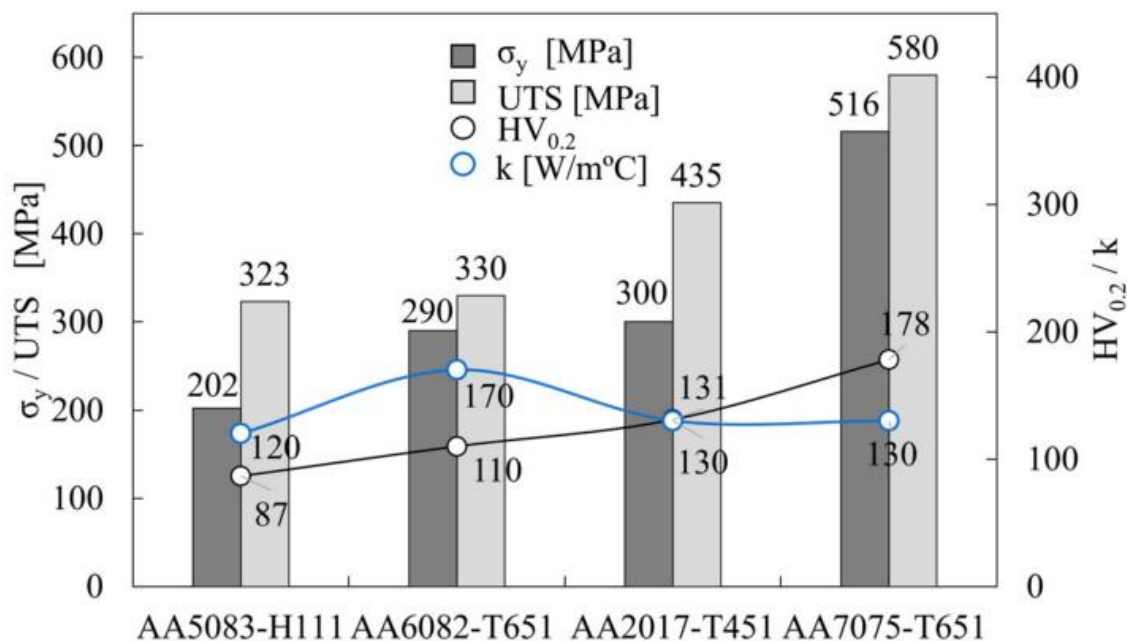


Figura 3.1. Propriedades do material base: tensão de cedência, resistência máxima à tração, dureza e condutividade térmica [38].

3.2. Produção das soldaduras

Neste trabalho, um total de 50 ensaios foram realizados com o objetivo de replicar as condições de soldadura do processo TAFSW. Os ensaios foram efetuados com recurso a uma máquina de FSW da marca MTS I-STIR PDS, utilizando placas com 10 mm de espessura, das quatro ligas de alumínio. As placas de espessura elevada foram utilizadas de modo a permitir a visualização, e análise comparativa, da região afetada pelo processo nas quatro ligas.

3.2.1. Ferramentas

De modo a replicar o processo TAFSW, foram utilizadas quatro ferramentas sem pino, todas com base plana. As ferramentas são fabricadas em carboneto de tungstênio, conhecido pela sua boa resistência ao desgaste a altas temperaturas. Foram testadas 4 ferramentas, com diâmetros de 10, 12, 16 e 18 mm. Para facilitar a identificação, cada ferramenta foi denominada de acordo com o diâmetro da base, sendo identificadas como PL10, PL12, PL16 e PL18, respetivamente.

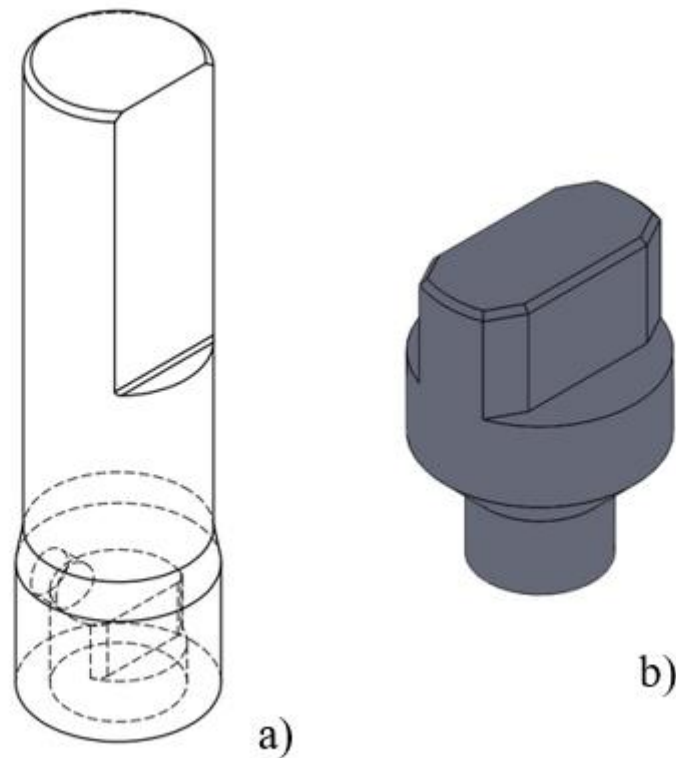


Figura 3.2. a) Ferramenta modular b) Módulo PL10

3.2.2. Parâmetros

De modo a possibilitar realizar uma análise abrangente da evolução do binário e da temperatura com as condições de soldadura, foram testadas várias combinações de parâmetros de processo, como se mostra na Tabela 3.2. Neste estudo foi dado maior ênfase à análise das condições de soldadura para as ligas AA5083 e a AA6082, atendendo ao facto de estas terem sido já alvo de estudos anteriores, por parte deste grupo de trabalho, e por este motivo, estarem já bem caracterizadas. Para as outras duas ligas (AA7075 e AA2017), foi efetuada uma gama mais limitada de ensaios, com o objetivo de permitir uma análise comparativa mais abrangente.

De acordo com a tabela foram produzidas soldaduras utilizando quatro diâmetros de ferramenta (10 mm, 12 mm, 16 mm e 18 mm) e quatro velocidades de rotação diferentes (660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm). As soldaduras foram realizadas em controlo de força, utilizando cinco valores distintos de força axial: 6 kN, 8kN, 9kN, 10kN e 12kN. Os

critérios de paragem do ensaio foram 60 segundos de duração do processo ou, em alternativa, 2 mm de profundidade de penetração da ferramenta.

Tabela 3.2. Parâmetros

| Material | Velocidade de rotação[rpm] | Diâmetro da base [mm] | Controlo de força [kN] | |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----|
| AA5083 | 660 | 10 | 6 | |
| | | | 9 | |
| | | | 12 | |
| | | 12 | 8 | |
| | | | 16 | 10 |
| | | | | 12 |
| | 870 | | 10 | 6 |
| | | 12 | 8 | |
| | | 16 | 10 | |
| | | 18 | 12 | |
| | 1140 | 10 | 6 | |
| | | 12 | 8 | |
| | | 16 | 10 | |
| | | 18 | 12 | |
| | 1500 | 10 | 6 | |
| | | 12 | 8 | |
| | | 16 | 10 | |
| | | 18 | 12 | |
| | | 660 | 10 | 6 |

| | | | |
|--------|------|----|----|
| AA6082 | | | 9 |
| | | 12 | 6 |
| | | | 8 |
| | | | 10 |
| | | 16 | 10 |
| | | 18 | 12 |
| | 870 | 10 | 6 |
| | | 12 | 6 |
| | | | 8 |
| | | | 10 |
| | | 16 | 10 |
| | | 18 | 12 |
| | 1140 | 10 | 6 |
| | | 12 | 6 |
| | | | 8 |
| | | | 10 |
| | | 16 | 10 |
| | | 18 | 12 |
| | 1500 | 10 | 6 |
| | | 12 | 6 |
| | | | 8 |
| 10 | | | |
| 16 | | 10 | |
| 18 | | 12 | |
| AA7075 | 660 | 12 | 8 |

| | | | |
|--------|------|----|---|
| | 1500 | 12 | 8 |
| AA2017 | 660 | 12 | 8 |
| | 1500 | 12 | 8 |

3.3. Aquisição da temperatura

As medições de temperatura foram efectuadas com uma câmara termográfica "FLIR A655sc", e a sua montagem foi efectuada como se mostra na Figura 3.3. A câmara foi montada a 0,5 m de distância do ponto de soldadura, com a óptica focada na interface de contacto entre a ferramenta e o material de base. A temperatura foi registada com uma frequência de 12,5 Hz, tendo sido utilizado o valor de emissividade de 0,95 para a análise dos ciclos térmicos.

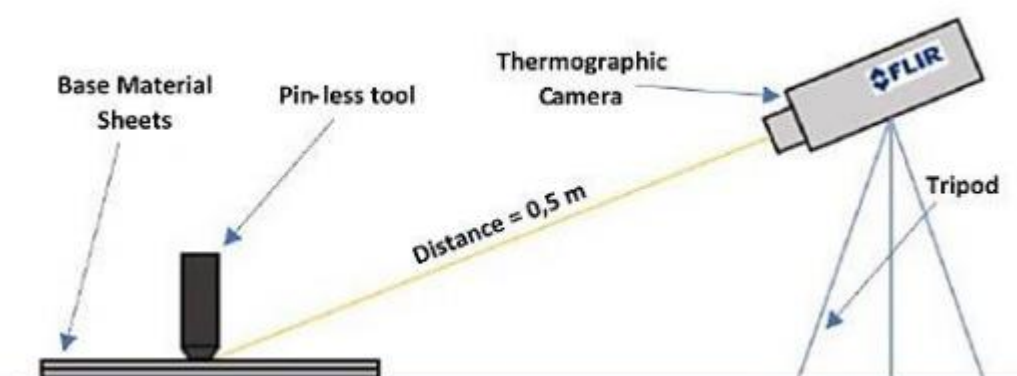


Figura 3.3. Disposição da câmara termográfica

3.4. Aquisição e tratamento do binário

A evolução do binário com o tempo, registada pela máquina de soldar, seguiu globalmente a mesma tendência da curva exemplificada na Figura 3.4, obtida durante a soldadura por TAFSW da liga de alumínio AA6082, com a ferramenta PL12, velocidade de rotação de 660 rpm e força axial igual a 10 kN. O sinal de saída do binário foi captado para cada soldadura com uma frequência de 20 Hz.

Como mostra a Figura 3.4, a curva do binário em função do tempo apresenta flutuações importantes, resultantes da elevada frequência de aquisição. Este ruído foi suprimido das

curvas, utilizando a funcionalidade “PTS LOESS Calculator” do Excel. A curva resultante desta operação é apresentada no gráfico a amarelo. No gráfico estão também identificadas os dois principais estágios do processo TAFSW, ou seja, o *plugin stage*, durante o qual o binário cresce até atingir o seu valor máximo, e o *dwell stage*, durante o qual o binário começa por sofrer uma diminuição, devido ao amaciamento do material, atingindo um valor que se mantém quase constante (período estável) até ao fim do processo de soldadura.

A duração do período estável foi determinada através do cálculo da derivada instantânea do binário (dM/dt), que também se encontra representada no gráfico. No trabalho atual, assumiu-se que o período estável corresponde a valores da derivada no intervalo $-0,2 \leq dM/dt \leq 0,2$ Nm/s. Após se determinar a duração do período estável, foi calculado o valor do binário de manutenção (M_{man}), através do cálculo da média dos valores do binário registado nesse intervalo de tempo. Também foi registado o binário máximo (M_{max}) utilizando a função “Máximo” do Excel. Este processo foi repetido para todas as soldaduras produzidas.

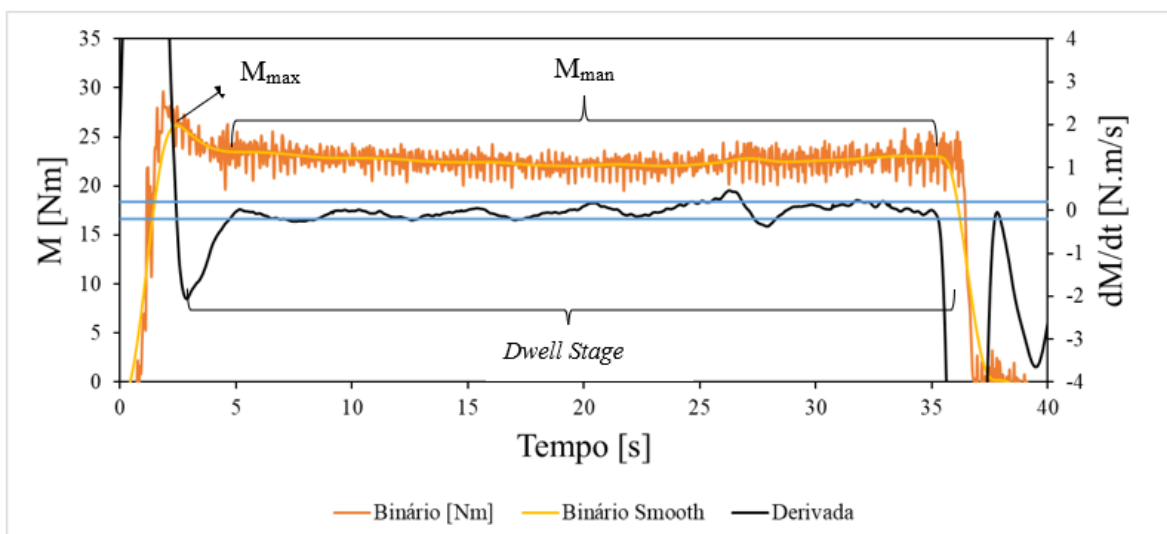


Figura 3.4. Exemplo de curva de binário durante o processo TAFSW

3.5. Metalografia

Tanto para a análise macroestrutural, como para a análise microestrutural, foi necessário proceder à preparação das amostras selecionadas para observação. Primeiramente, cortou-se a amostra em perfil, próximo do centro da soldadura, utilizando para este efeito uma serra. Em seguida, colocou-se a amostra cortada em resina. Após este processo foi executado o polimento das mesmas, utilizando numa primeira fase lixas de diferentes granulometrias

(180,320,600,1000 e 2500 grãos/cm²) e, por fim, o polimento com suspensões de diamante de 6µm, 3µm e 1µm. Posteriormente, efetuou-se o ataque químico, de modo a revelar a microestrutura dos materiais em análise. Para estas ligas de alumínio foi utilizado o reagente Poulton Modificado. Após revelada a microestrutura, procedeu-se à sua observação e registo de imagem, com recurso ao microscópio ótico Leica DM 4000 M LED, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados das penetrações atingidas pelas ferramentas nos ensaios são apresentados e analisados. Além disso, a evolução dos parâmetros de saída do processo e influência dos parâmetros do processo, da geometria da ferramenta e do material base na potência de soldadura também é discutida. Por fim, a macroestrutura de um conjunto de ensaios selecionados é apresentada para fornecer uma compreensão mais completa dos resultados.

4.1. Análise da penetração da ferramenta

A primeira subseção compara os resultados da penetração da ferramenta obtidos com diferentes velocidades de rotação nas quatro ligas de alumínio estudadas. Além disso, uma análise mais aprofundada é realizada nas ligas AA5083 e AA6082, complementando o estudo prévio realizado sobre essas ligas. Essa análise mais detalhada é justificada pelo fato de essas ligas já estarem bem caracterizadas, e também pela importância de entender a influência da força axial, do diâmetro da ferramenta e da pressão exercida pela ferramenta na peça, na velocidade de penetração da ferramenta.

4.1.1. Comparação de resultados das diferentes ligas

Durante os ensaios de simulação do processo TAFSW foi registrado, com recurso à máquina de soldadura, a posição da ferramenta em cada instante. A análise destes dados permitiu detectar diferenças importantes na evolução da penetração da ferramenta, aquando ensaios realizados para as diferentes ligas de alumínio. Estes resultados são exemplificados na Figura 4.1, na qual é comparada a evolução da penetração da ferramenta, com o tempo, para duas condições de ensaio distintas. Mais concretamente, a Figura 4.1 mostra os resultados obtidos para todas as ligas de alumínio (AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075), nos ensaios realizados com a ferramenta PL12 e força axial igual a 8kN. Foram testadas duas velocidades de rotação da ferramenta: 660 e 1500rpm.

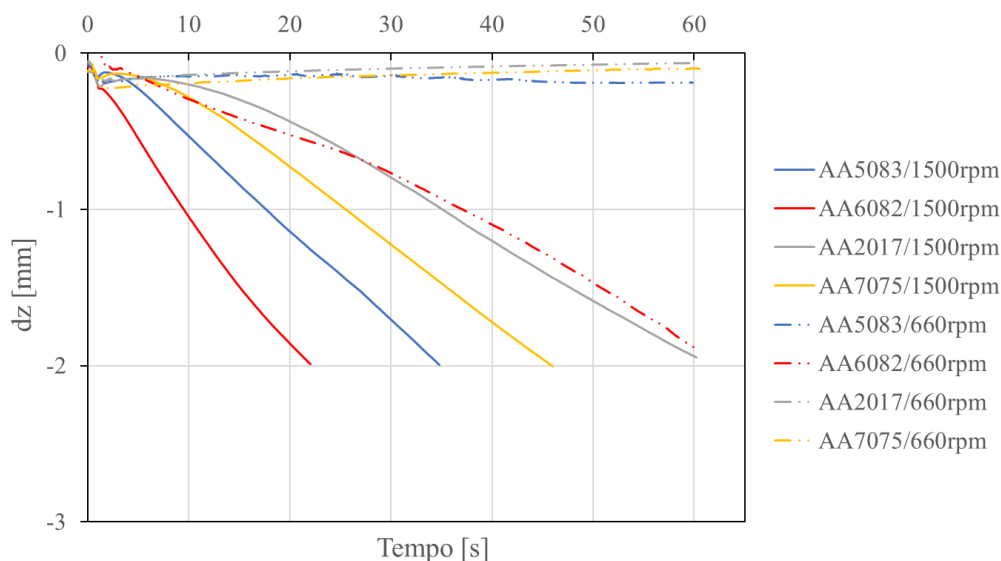


Figura 4.1. Comportamento dos difentes materias base.

Analisando a figura, a primeira conclusão que se pode retirar é que, para cada material base, ocorreu um aumento importante da velocidade de penetração da ferramenta quando se aumentou a velocidade de rotação.

A segunda conclusão que pode ser extraída dos dados é que as ferramentas nos ensaios que utilizaram como material base a liga AA6082, tanto para a velocidade de rotação de 660 rpm quanto para 1500 rpm, atingiram as velocidades de penetração superiores. Quando a velocidade de rotação foi de 660 rpm, os quatro ensaios foram interrompidos após 60 segundos, que foi um dos critérios de paragem do processo adotado. As penetrações atingidas foram aproximadamente 0,065 mm, 0,09 mm e 0,19 mm para as ligas AA2017, AA7075 e AA5083, respectivamente. O ensaio que utilizou como material base a liga AA6082, a ferramenta atingiu uma penetração significativamente maior, chegando perto de 1,9 mm. Estes resultados indicam um comportamento semelhante entre as ligas AA2017, AA7075 e AA5083, enquanto a liga AA6082 se destaca com uma maior penetração. Quando a velocidade de rotação foi aumentada para 1500 rpm, apenas o ensaio que utilizou como material base a liga AA2017, a ferramenta não alcançou a penetração de 2 mm, chegando a cerca de 1,94 mm após 60 segundos. Por outro lado, nas ligas AA6082, AA5083 e AA7075 a ferramenta foi capaz de atingir a penetração de 2 mm, sendo este outro critério de paragem do processo. Nestas ligas essa penetração foi alcançada em aproximadamente 22 segundos, 35 segundos e 46 segundos, respectivamente. Com a velocidade de rotação de 1500 rpm o

comportamento das ligas AA2017, AA7075 e AA5083 já não é tão similar como tinha acontecido na utilização da velocidade de rotação de 660 rpm.

4.1.2. Análise da influência da força axial na penetração da ferramenta

O estudo da influência da força axial na penetração da ferramenta usou como base os resultados obtidos a partir de ensaios realizados nas ligas AA5083 e AA6082. Na Figura 4.2 são comparadas as evoluções das penetrações das duas ligas em função do tempo. Esses resultados têm em comum o fato de terem sido obtidos a partir de ensaios realizados com a mesma ferramenta, a PL10, e a velocidade de rotação, de 660 rpm. Para a liga AA5083, são apresentados resultados provenientes de três ensaios, cada um deles realizado com um valor de força axial diferente, respetivamente: 6 kN, 9 kN e 12 kN. Já para a liga AA6082, estão presentes apenas resultados de dois ensaios, realizados com valores de força axial de 6 kN e 9 kN.

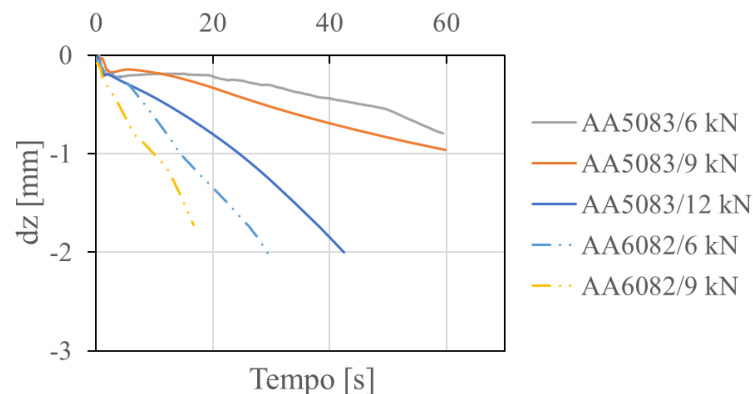


Figura 4.2. Influência da força na velocidade de penetração da ferramenta para AA5083 e AA6082.

Ao analisar a Figura 4.2, podemos chegar a algumas conclusões. A primeira delas é que, mantendo todos os parâmetros do processo constantes, observamos que a velocidade de penetração aumenta à medida que a força aumenta, independentemente da liga ensaiada. Para a liga AA5083, nos ensaios realizados com força axial de 6 kN e 9 kN a ferramenta atingiu apenas 0,8 mm e 0,95 mm de penetração em 60 segundos, respectivamente. No entanto, no ensaio com 12 kN alcançou já 2 mm de penetração em 43 segundos. Na liga AA6082, a ferramenta no ensaio produzido com força axial de 6 kN atinge 2 mm de penetração em 36 segundos, enquanto que no ensaio com 9 kN encontrava-se já com 1,72 mm de penetração, passados apenas 16,6 segundos.

A segunda conclusão que podemos tirar é que a velocidade de penetração da ferramenta no ensaio da liga AA5083, onde se utilizou 12 kN de força axial, é menor do que nos ensaios da liga AA6082, realizados com valores menores de forças axiais, especificamente 6 kN e 9 kN.

Essas conclusões demonstram a influência significativa da força axial na velocidade de penetração da ferramenta, com valores mais elevados de força resultando numa maior velocidade de penetração. Além disso, é evidente que a ferramenta em ensaios da liga AA6082 apresenta uma velocidade de penetração maior em comparação com a liga AA5083, mesmo com níveis de controlo de força mais baixos.

De modo a uma análise mais aprofundada da influência da força na penetração atingida, na Figura 4.3, podemos observar a evolução da penetração da ferramenta em ensaios que utilizaram somente a liga AA6082 como material base. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 660 rpm, sendo as únicas diferenças entre eles a ferramenta utilizada, PL10 ou PL12, e o valor da força axial, variando entre 6 kN, 8 kN, 9 kN ou 10 kN.

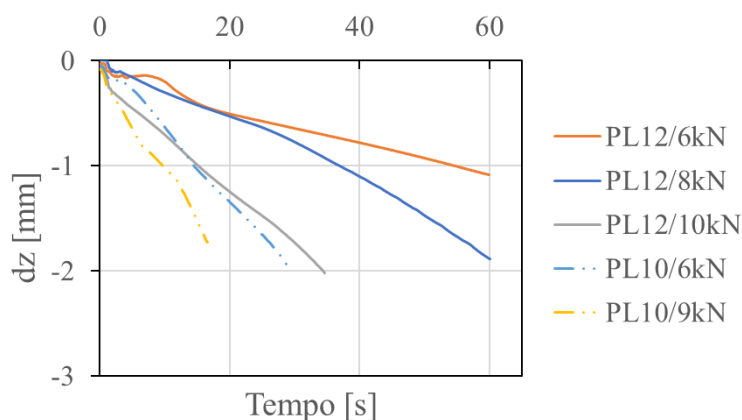


Figura 4.3. Evolução da penetração em função do diâmetro e da força para AA6082.

Conforme observado na figura anterior, para cada tipo de ferramenta, há um aumento na velocidade de penetração à medida que é aumentada a força utilizada.

A pressão exercida sobre a peça depende do diâmetro da ferramenta utilizado assim como da força axial. Nos resultados apresentados, para a ferramenta PL12, a pressão aumenta de 53 Mpa para 70 Mpa, quando se varia a força axial de 6 kN para 8 kN, e de 70 Mpa para 88 Mpa quando se eleva a força axial de 8 kN para 10 kN. Portanto, para estes casos, a velocidade de penetração da ferramenta e a pressão que ela exerce sobre a peça

partilham a mesma evolução, aumentando ou diminuindo em simultâneo. No entanto, como mostra a Figura 4.3, a velocidade de penetração da ferramenta no ensaio onde se utilizou a PL10 e força axial de 6 kN é superior a velocidade de penetração da ferramenta no ensaio produzido com a PL12 e força axial de 10 kN, mesmo possuindo uma menor pressão e sendo produzido com um menor valor de força axial. Portanto, há uma descontinuidade do comportamento, valores de força axial e pressões exercidas superiores podem não se traduzir em maiores velocidades de penetração.

4.1.3. Análise da influência do diâmetro

Na análise da influência do diâmetro da ferramenta na velocidade de penetração, foram construídos dois gráficos que apresentam resultados de ensaios realizados nas ligas AA6082 e AA5083.

Na Figura 4.4 a), são apresentados os resultados para a liga AA6082. Neste gráfico, são mostrados os dados da evolução da penetração ao longo do tempo para diferentes combinações de velocidade de rotação e diâmetros da ferramenta. Os ensaios foram realizados com uma força axial de 10 kN e as velocidades de rotação utilizadas foram: 660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm. Os dois diâmetros da ferramenta considerados são PL12 e PL16. Na Figura 4.4 b), são apresentados os resultados para a liga AA5083. Neste gráfico, são mostrados os dados da evolução da penetração ao longo do tempo, de ensaios realizados com força axial de 12 kN e uma velocidade de rotação da ferramenta de 660 rpm. Os diâmetros da ferramenta considerados são PL10 e PL18.

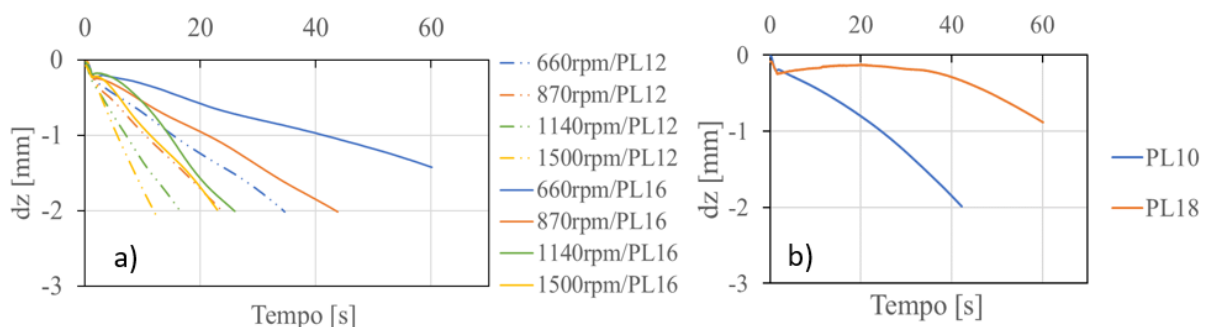


Figura 4.4. Evoluções das penetrações com o diâmetro para a) AA6082 e b) AA5083.

Ao observar os gráficos, podemos constatar que tanto na liga AA6082 quanto na liga AA5083, a velocidade de penetração é influenciada pelo diâmetro da ferramenta. Os resultados mostram que a velocidade de penetração aumenta com a diminuição do diâmetro da ferramenta, para todas as velocidades de rotação avaliadas.

Na liga AA6082, por exemplo, com uma velocidade de rotação da ferramenta de 870 rpm, podemos observar que a ferramenta com diâmetro PL16 atingiu uma penetração de 2 mm em 43 segundos, enquanto a ferramenta com diâmetro PL12 alcançou a mesma penetração em apenas 24,3 segundos. Isso indica que um diâmetro menor da ferramenta resulta em uma velocidade de penetração mais rápida em comparação com um diâmetro maior, nas mesmas condições de ensaio. De forma similar, na liga AA5083, ao analisar os resultados, podemos constatar que o uso da ferramenta de diâmetro PL10 resultou em uma penetração mais rápida em comparação com a ferramenta de diâmetro PL18, para as mesmas condições de ensaio. No ensaio com a ferramenta PL18, a penetração atingiu apenas 0,88 mm em 60 segundos. Por outro lado, no ensaio com a ferramenta PL10, a penetração chegou a 2 mm em 43 segundos. Esses resultados reforçam a conclusão de que um diâmetro menor da ferramenta resulta em uma velocidade de penetração mais rápida, considerando as mesmas condições de ensaio na liga AA5083.

4.1.4. Pressão diferente

A pressão que a ferramenta exerce na peça depende da seleção do diâmetro da ferramenta e da força axial para a realização do ensaio. Com o objetivo de entender a sua influência sobre a velocidade de penetração da ferramenta selecionou-se para cada liga (AA5083, AA6082) duas condições de ensaio distintas, resultando em valores de pressão bastante diferentes.

Na Figura 4.5, que é subdividida nas partes a) e b), são apresentados os resultados de ensaios realizados, sendo a liga AA6082 representada na parte a) e a liga AA5083 na parte b). Em cada uma destes gráficos, os resultados de dois conjuntos de ensaios estão representados. O primeiro conjunto de ensaios foi realizado utilizando a ferramenta PL10 com uma força axial de 6 kN, enquanto o segundo conjunto utilizou a ferramenta PL18 com uma força axial de 12 kN. Para ambos os conjuntos de ensaios e em cada uma das ligas, foram adotadas quatro velocidades de rotação distintas, nomeadamente 660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm.

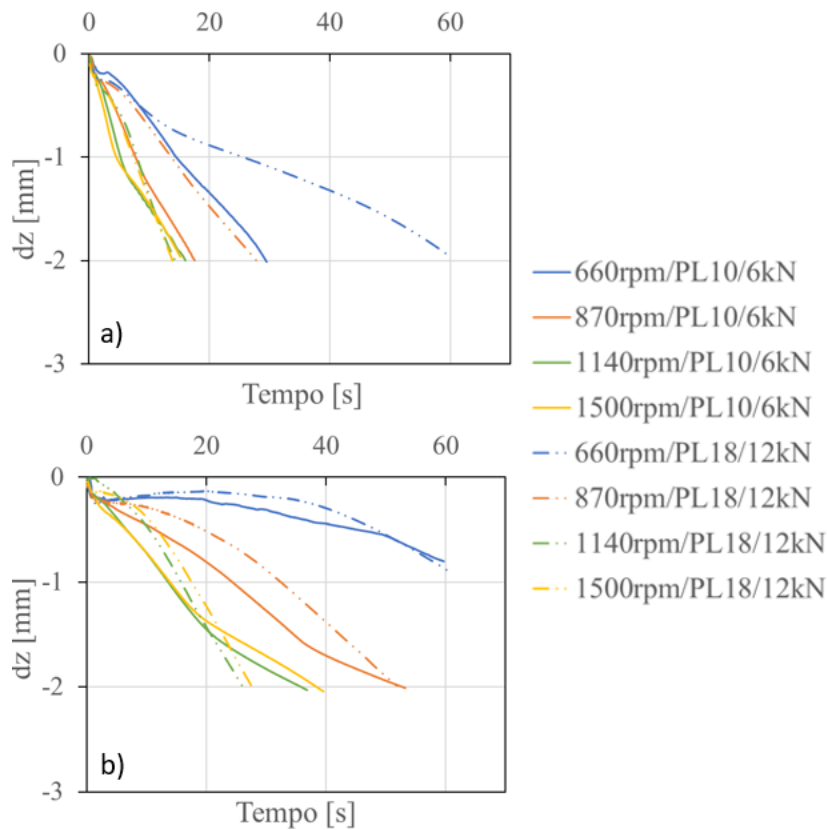


Figura 4.5. Evolução da penetração com pressões diferentes para a) AA6082 e b) AA5083

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de pressão que foram obtidos através destas diferentes combinações entre a ferramenta utilizada e o valor da força axial aplicada, conforme representado na Figura 4.5.

Tabela 4.1. Pressões Resultantes

| Ferramenta | Controlo de força [kN] | Pressão[MPa] |
|------------|------------------------|--------------|
| PL10 | 6 | 76 |
| PL18 | 12 | 47 |

A análise dos dados apresentados na Figura 4.5 permite-nos retirar várias conclusões relevantes. A primeira, que se encontra em concordância com o que já havia sido observado nas figuras anteriormente analisadas, é que a velocidade de penetração aumenta com a velocidade de rotação da ferramenta. Contudo, à medida que se incrementa a velocidade de rotação, mantendo os outros parâmetros constantes, o impacto adicional na penetração vai diminuindo até tornar-se praticamente nulo. Isto pode ser exemplificado através dos dados da liga AA5083, utilizando a ferramenta PL10 e uma força axial de 6 kN. Com a velocidade

de rotação da ferramenta a 660 rpm, a ferramenta atinge 0,8 mm de penetração. Aumentando a velocidade de rotação para 870 rpm, verifica-se que passa a atingir os 2 mm de penetração em 53 segundos. Contudo, nota-se que entre as velocidades de rotação de 1140 rpm e 1500 rpm, a diferença é quase inexistente, com a ferramenta em ambos os ensaios a atingir os 2 mm em 36 e 38 segundos, respectivamente. Esta tendência é ainda mais pronunciada na liga AA6082. Nos ensaios realizados com a ferramenta PL10 e um controlo de força de 6 kN, os tempos para atingir 2 mm de penetração são de 29,5 segundos, 17,6 segundos, 16 segundos e 15,7 segundos, por ordem crescente da velocidade de rotação da ferramenta.

Uma segunda conclusão que podemos retirar da figura é que, em ambas as ligas, as curvas de penetração dos ensaios onde se registaram pressões mais elevadas (PL10 e 6 kN) encontram-se mais próximas entre si, comparativamente com os conjuntos onde se verificaram pressões mais baixas. Isto sugere que pressões mais elevadas diminuem a discrepância entre as velocidades de penetração resultantes de diferentes velocidades de rotação da ferramenta.

Na liga de alumínio AA5083, observou-se que as penetrações obtidas mediante uma velocidade de rotação de 660 rpm foram diferentes para ambas as ferramentas: PL10 alcançou uma penetração de 0,8 mm, enquanto a PL18 registou 0,88 mm. Com uma velocidade de rotação de 870 rpm, ambas as ferramentas alcançaram penetrações de 2 mm, com a PL10 a requerer 53 segundos e a PL18 ligeiramente menos, com 52 segundos. Contudo, ao incrementar-se a velocidade de rotação para 1140 rpm e 1500 rpm, surgiram resultados diferentes. Os ensaios que empregaram a ferramenta de maior diâmetro, PL18, e maior força axial (resultando em menor pressão) exibiram velocidades de penetração superiores, atingindo os 2 mm em 26,2 segundos e 27,6 segundos, em contraste com os 36 segundos e 38 segundos observados para a ferramenta PL10. Relativamente à liga AA6082, identificou-se um comportamento similar, particularmente para velocidades de rotação mais elevadas. Os ensaios que utilizaram a ferramenta PL18 e uma força axial de 12 kN manifestaram velocidades de penetração similares, porém um pouco superiores, alcançando os 2 mm em 14,6 segundos e 14 segundos, respectivamente. Em contrapartida, os ensaios que empregaram a ferramenta PL10 e 6 kN de força axial atingiram os 2 mm em 16 segundos e 15,7 segundos. No entanto, para as velocidades de rotação mais baixas, a liga AA6082 divergiu do comportamento observado na liga AA5083. Os ensaios que utilizaram a ferramenta PL18 e 12 kN de força axial, as ferramentas apresentaram velocidades de

penetração inferiores, necessitando de 60 segundos e 28 segundos para atingir os 2 mm, comparativamente aos 29,5 segundos e 17,6 segundos dos ensaios com a ferramenta PL10 e 6 kN de controlo de força.

Com base nos dados expostos, pode-se concluir que, até aproximadamente 870 rpm de velocidade de rotação, ensaios com pressões mais elevadas exibem velocidades de penetração superiores. Este fenómeno é mais acentuado na liga AA6082, uma vez que na liga AA5083 as curvas de penetração são bastante semelhantes. No entanto, para velocidades de rotação iguais ou superiores a 1140 rpm, ensaios com pressões mais baixas exibem velocidades de penetração ligeiramente mais elevadas. Este comportamento pode ser atribuído à conjugação de elevadas velocidades de rotação com valores superiores de controlo de força e uma maior área de contacto entre a ferramenta e o material, induzindo um amolecimento mais pronunciado do material, o que facilita a penetração.

4.1.5. Pressão semelhante

Neste subcapítulo, foi adotada uma abordagem diferente em comparação com o capítulo anterior, focando especificamente na análise das velocidades de penetração sob condições de pressões semelhantes. Para alcançar este objetivo, foram selecionados resultados de ensaios conduzidos sob pressões similares.

Na Figura 4.6, estão apresentados os resultados de ensaios realizados em duas ligas distintas de alumínio, nomeadamente AA5083 e AA6082, representadas nas partes a) e b), respectivamente. Para cada uma destas ligas, foram conduzidos ensaios em duas diferentes configurações. A primeira configuração recorreu ao uso da ferramenta PL10, aplicando uma força axial de 6 kN, enquanto a segunda utilizou a ferramenta PL12, com uma força axial de 8 kN. É relevante destacar que para cada uma destas configurações, e em ambas as ligas, foram testadas quatro velocidades de rotação diferentes, concretamente 660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm.

Prosseguindo para as partes c) e d) da Figura 4.6, observamos a continuação da apresentação de resultados de ensaios para as ligas AA5083 e AA6082, respectivamente. Similarmente às partes a) e b), nas partes c) e d) são apresentadas duas configurações de ensaio, mas desta feita com diferentes ferramentas e forças axiais. Na configuração inicial, a ferramenta PL16 foi utilizada juntamente com uma força axial de 10 kN, enquanto na segunda configuração foi feito uso da ferramenta PL18 e uma força axial de 12 kN. Tal como

anteriormente, estas configurações também incorporaram as quatro velocidades de rotação mencionadas acima.

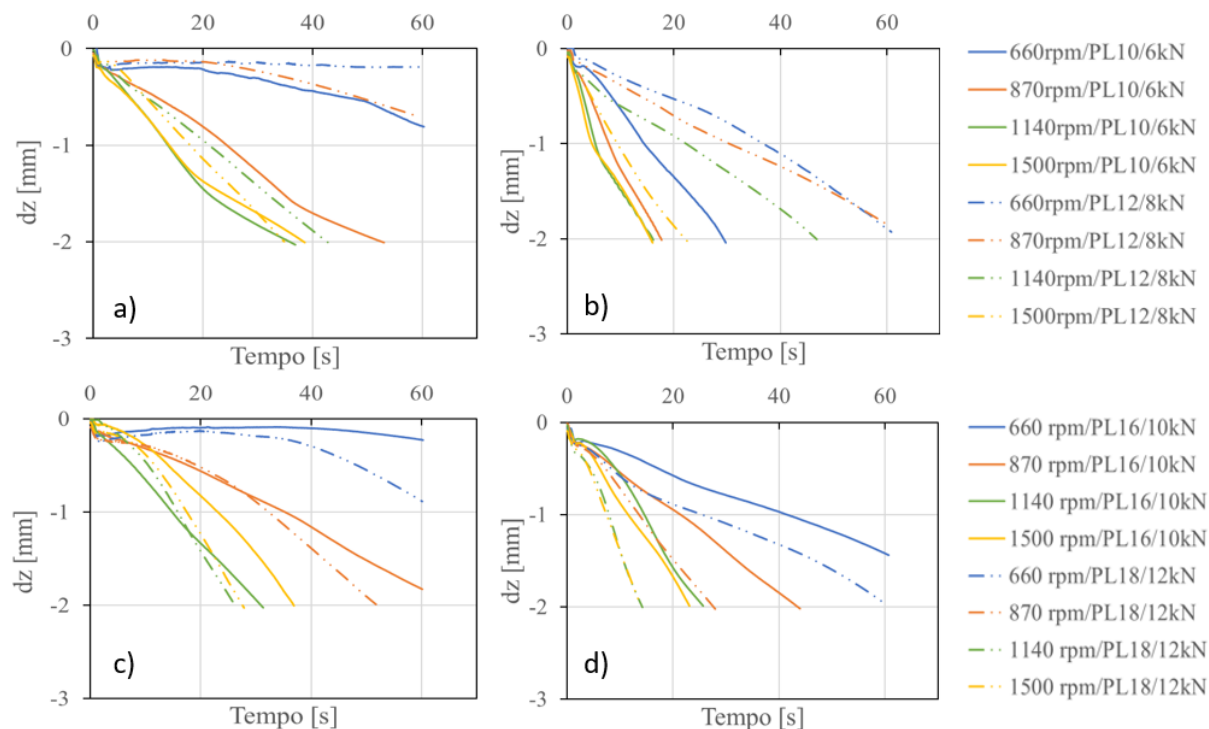


Figura 4.6. Evolução das penetrações com pressões semelhantes a) e c) AA5083 e b) e d) AA6082.

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as pressões resultantes das combinações das forças e das ferramentas utilizadas.

Tabela 4.2. Pressões resultantes

| Ferramenta | Controlo de força [kN] | Pressão[MPa] |
|------------|------------------------|--------------|
| PL10 | 6 | 76 |
| PL12 | 8 | 71 |
| PL16 | 10 | 50 |
| PL18 | 12 | 47 |

Semelhante ao que foi previamente observado nas figuras anteriores, verifica-se nas quatro configurações de ensaio distintas, e em ambas as ligas, que a velocidade de penetração da ferramenta aumenta com a velocidade de rotação. Além disso, quando submetida às mesmas condições de ensaio, a liga AA6082 exibe velocidades de penetração superiores em comparação com a liga AA5083.

Na Figura 4.6 a), observa-se que a redução da pressão de 76 MPa para 71 MPa ocorre em simultâneo com o decréscimo da velocidade de penetração da ferramenta em ensaios onde se empregaram velocidades de rotação de 660 rpm e 870 rpm. Contudo, para 1140 rpm e 1500 rpm, essa diferença foi quase imperceptível. A Figura 4.6 b) apresenta dados relativos à liga AA6082, onde a mesma diminuição de pressão também se traduz em uma redução da velocidade de penetração, sendo este efeito mais evidente em todas as velocidades de rotação. No que diz respeito às Figura 4.6 c) e d), os dados revelam uma tendência oposta. Paralelamente à redução da pressão de 50 MPa para 47 MPa a velocidade de penetração da ferramenta para ambas as ligas e em todas as velocidades de rotação da ferramenta, aumenta.

Adicionalmente, a liga AA6082 manifestou um comportamento mais homogêneo sob elevadas pressões, ou seja, as curvas obtidas com uma pressão de 76 Mpa, Figura 4.6 b), são significativamente mais próximas entre si.

Com base nestes dados, é possível afirmar que, sob pressões mais elevadas, a velocidade de penetração da ferramenta é mais susceptível a alterações no diâmetro da ferramenta do que a variações na força axial. Este fenómeno é particularmente acentuado na liga AA6082. Constatou-se que o aumento da força axial proporciona o aumento da velocidade de penetração da ferramenta, ao passo que o alargamento do diâmetro da ferramenta provoca uma redução da mesma. No contexto de pressões mais reduzidas, a dinâmica inverte-se e a influência da força axial utilizada torna-se mais preponderante em relação ao diâmetro da ferramenta. Portanto, um acréscimo na pressão não necessariamente resulta em um aumento da velocidade de penetração.

4.2. Análise da evolução dos parâmetros de saída

Na Figura 4.7 são comparadas as evoluções do binário e da temperatura, com o tempo, para os diferentes materiais base. A fim de mostrar as semelhanças nas evoluções do binário e da temperatura observadas para as diferentes condições de soldadura, os resultados apresentados em cada gráfico, para além de corresponderem a diferentes materiais de base, são também relativos a diferentes ferramentas, velocidades de rotação e controlos de força.

Desta forma, a Figura 4.7 a) apresenta os resultados da liga AA2017, obtidos com a ferramenta PL12, velocidade de rotação de 660 rpm e 8 kN de força axial, a Figura 4.7 b) mostra os resultados da liga AA7075, obtidos com a ferramenta PL12, velocidade de rotação

de 1500 rpm e 8 kN de força axial, a Figura 4.7 c) exhibe os resultados da liga AA5083, obtidos com a ferramenta PL12, velocidade de rotação de 870 rpm e 8 kN de força axial e, finalmente, a Figura 4.7 d) contém os resultados da liga AA6082, obtidos com a ferramenta PL12, velocidade de rotação de 870 rpm e força axial de 8 kN. As curvas das evoluções da temperatura, do binário e da força axial estão, respetivamente, coloridas a cinzento, laranja e azul.

Comparando os resultados apresentados em cada gráfico da Figura 4.2, é possível concluir que as diferentes curvas apresentam evoluções semelhantes ao longo do tempo, apesar das variações dos parâmetros do processo e dos materiais de base. Um aumento acentuado do binário e da temperatura ocorre nos primeiros segundos do processo, o que resulta das transições rápidas das condições termomecânicas associadas à *plugin stage*. O contacto inicial entre a ferramenta e o material promove a geração de calor por atrito, que posteriormente facilita a deformação plástica, estabelecendo outra fonte de geração de calor.

A *Plugin Stage* termina quando a ferramenta atinge a força axial pré-definida, esta mantendo-se estável ao longo do processo como revelam os gráficos, ao mesmo tempo o binário atinge o seu valor máximo (M_{max}). Começa então a *dwell stage*, durante a qual os valores da temperatura aumentam constantemente, em contraste do que acontece em soldaduras realizadas em controlo de posição onde estes valores estabilizam, conforme observado por Costa Gaspar em [28]. Paralelamente, o binário começa por diminuir até alcançar um valor de manutenção (M_{man}), tal como acontece em solduras realizadas em controlo de posição, conforme observado por Costa Gaspar em [28]. Dito isto, este constante aumento da temperatura ao longo do processo, pode levar a incoerências na análise das T_{max} e T_{man} , tal como aconteceu no presente trabalho, especialmente porque, em controlo de força os critérios de paragem são um tempo pré-definido ou uma penetração atingida. Isso pode resultar em durações de ensaios significativamente diferentes e impedir a estabilização da temperatura. Em vista disto, optou-se por analisar o comportamento da potência utilizada na produção das soldagens, uma vez que existe uma relação linear entre a potência e a temperatura para as ligas estudadas neste trabalho, tal como observou David Andrade em [38], análise essa mais detalhada no subcapítulo 4.3.

Concluindo, dado que o binário apresenta uma rápida estabilização dos seus valores, pode ser mais confiável utilizá-lo, em vez da temperatura, como um meio de monitorização

em tempo real. Isso pode permitir um maior controle sobre a tecnologia de soldagem TAFSW e melhor prevenção e detecção de defeitos.

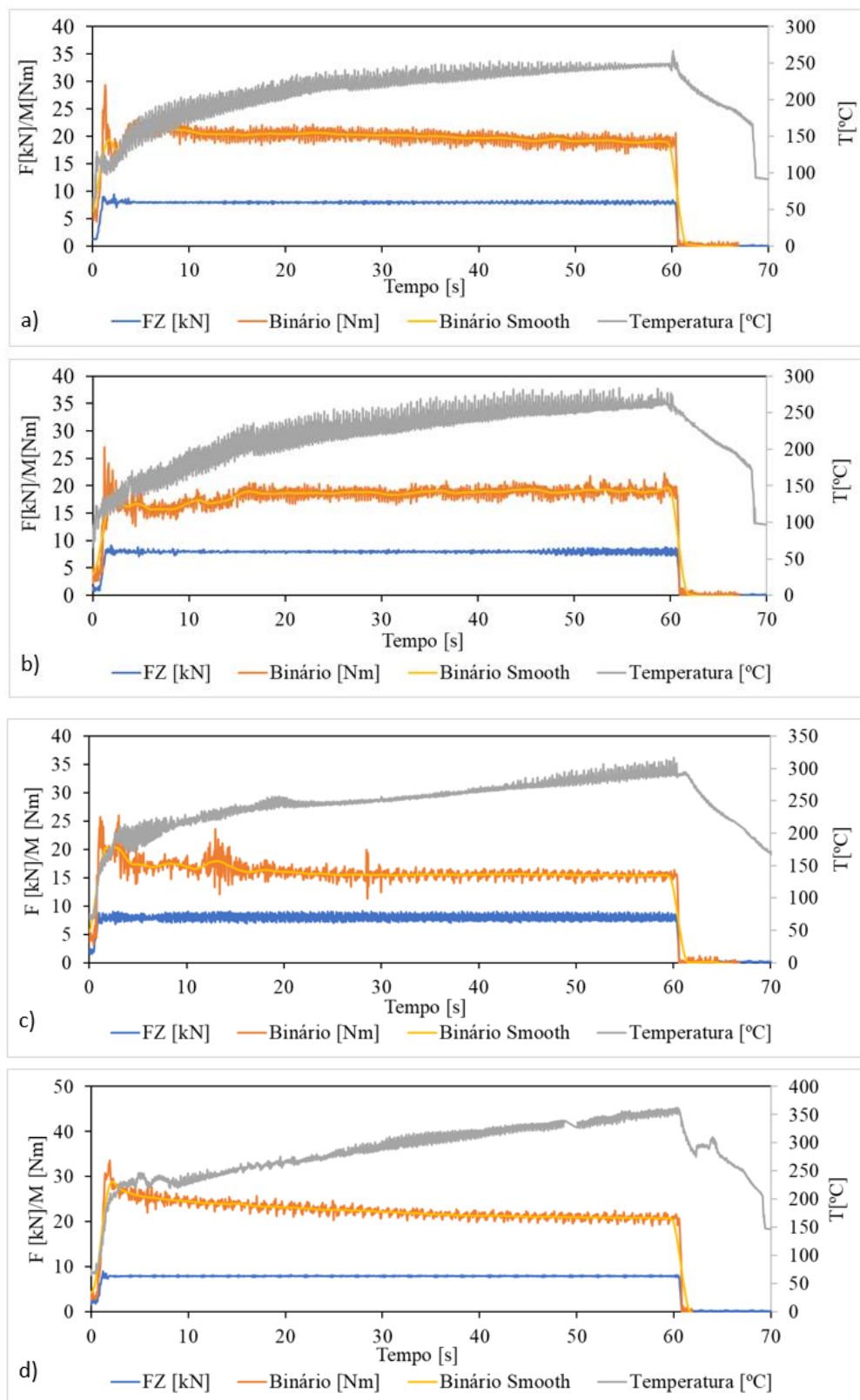


Figura 4.7. Evolução da temperatura, Binário e Força com o tempo para a) AA2017/660rpm/PL12/8 kN, b) AA7075/660rpm/PL12/8 kN, c) AA5083/870rpm/PL12/8 kN, d) AA6082/870rpm/PL12/8 kN.

4.2.1. Análise de dados do binário de manutenção

Neste subcapítulo, realiza-se uma análise acerca da forma como os vários parâmetros do processo, geometria da ferramenta, juntamente com o material de base e a pressão exercida pela ferramenta sobre a peça, afetam os binários de manutenção obtidos.

Na Figura 4.8, é exibido um gráfico que ilustra as variações nos binários de manutenção (M_{man}) em função da velocidade de rotação para variados materiais base. Para a elaboração deste gráfico, recorreu-se aos dados obtidos em ensaios com quatro ligas de alumínio distintas, designadamente AA2017, AA5083, AA6082 e AA7075. Os ensaios foram realizados empregando a ferramenta PL12 e uma força axial de 8 kN. Foi igualmente considerada uma gama de velocidades de rotação, compreendendo 660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm, com o objectivo de examinar a influência da velocidade de rotação nos binários de manutenção para os materiais analisados.

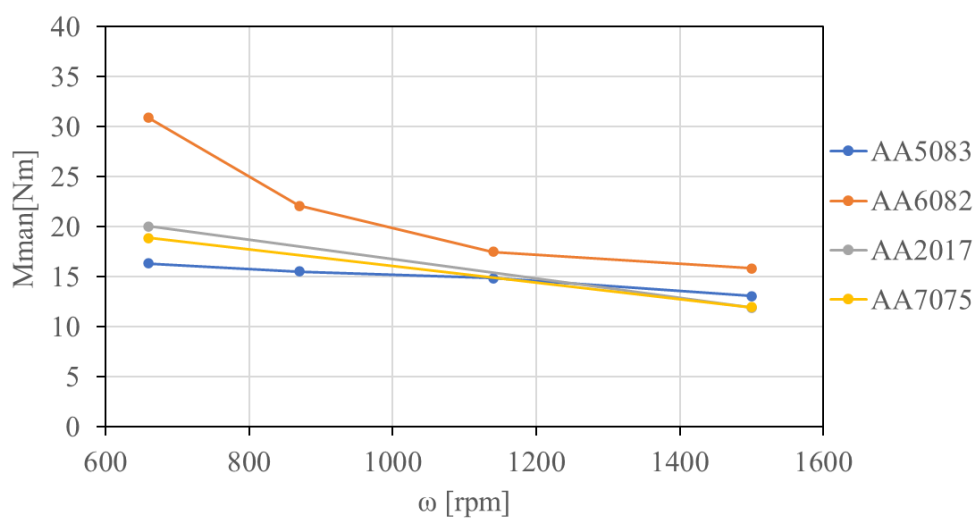


Figura 4.8. Evolução do M_{man} com a velocidade de rotação para AA5083, AA6082, AA2017 e AA7075.

A primeira conclusão que pode ser tirada do gráfico é que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta diminui o M_{man} , independentemente da liga, tal como também observou Costa Gaspar [28]. O aumento da velocidade de rotação induz uma maior quantidade de calor, amolecendo o material e reduzindo o esforço necessário para deformá-lo.

Relativamente aos valores de M_{man} atingidos por cada liga, para condições de ensaio iguais, ao contrário do que aconteceu no estudo guiado por Costa Gaspar [28], no presente, diferentes materiais base atingiram valores de M_{man} distintos. Ao observar o gráfico, é

evidente que a liga AA6082 atinge os valores mais altos de M_{man} para qualquer velocidade de rotação da ferramenta. Essa diferença de valores é especialmente notável para a velocidade de rotação de 660 rpm, onde atinge 30,92 N.m, enquanto as ligas AA2017, AA7075 e AA5083 atingem apenas 20,03 N.m, 18,86 N.m e 16,32 N.m, respectivamente. Essa diferença diminui à medida que a velocidade de rotação aumenta. Por exemplo, para uma velocidade de rotação da ferramenta de 1500 rpm, a M_{Man} da liga AA6083 foi de 15,84 N.m, enquanto as demais ligas AA2017, AA7075 e AA5083 ficaram em torno de 11,9 N.m, 11,96 N.m e 13,05 N.m, respetivamente.

Na Figura 4.9, é apresentada a variação do M_{man} para a liga AA6082 em função da velocidade de rotação da ferramenta. Com o propósito de analisar o impacto do diâmetro da ferramenta nos valores de M_{man} alcançados, comparam-se resultados adquiridos utilizando parâmetros idênticos, alterando somente o diâmetro. Deste modo, recorreu-se aos resultados provenientes da utilização das ferramentas PL10 e PL12, em conjunto com uma força axial de 6 kN, e das ferramentas PL12 e PL16 com uma força axial de 10 kN. Adicionalmente, a velocidade de rotação da ferramenta oscilou entre 660 rpm e 1500 rpm.

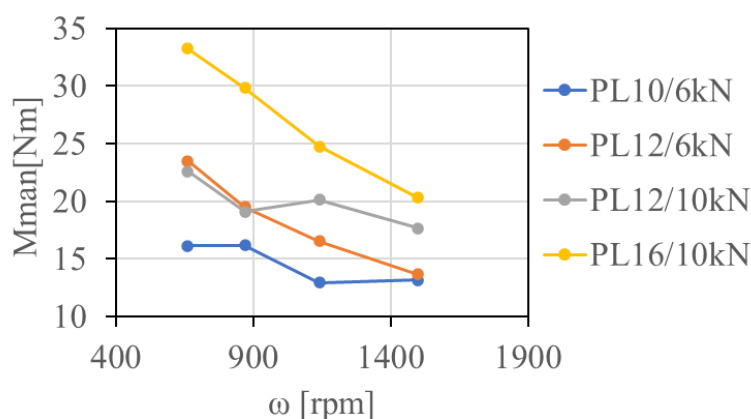


Figura 4.9. Evolução M_{man} com o diâmetro para AA6082

Tal como observou Costa Gaspar [28], o aumento do diâmetro da ferramenta resulta no aumento do M_{man} . Por exemplo, para a velocidade de rotação de 870rpm e força axial de 10 kN, o M_{man} aumentou de 19,10 N.m para 29,83 N.m, respetivamente da ferramenta PL12 para a PL16.

Com o intuito de comparar os valores de binário de manutenção atingidos nas ligas AA5083 e AA6082, na Figura 4.10, são reunidos resultados obtidos em condições de ensaio iguais para ambas as ligas. Para a construção do gráfico foram utilizados os resultados

provenientes do uso da ferramenta PL10 com uma força axial de 6 kN, bem como da ferramenta PL18 com uma força axial de 12 kN. Para ambas as ligas, foram testadas as mesmas velocidades de rotação, especificamente 660 rpm, 870 rpm, 1140 rpm e 1500 rpm.

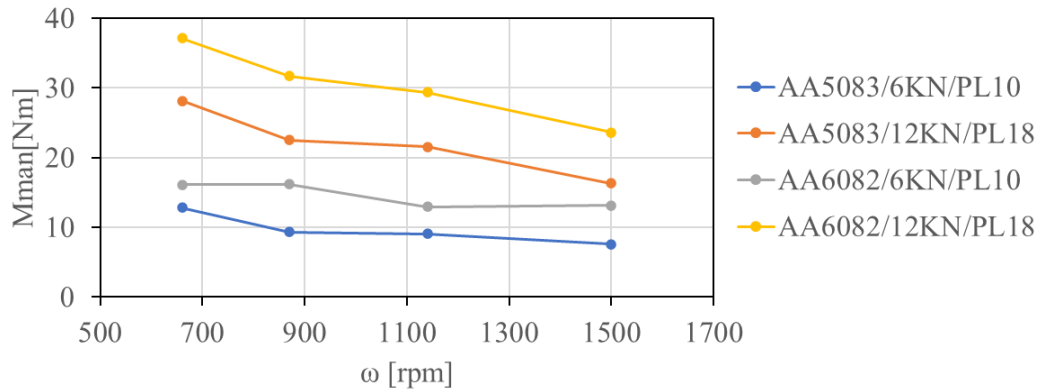


Figura 4.10. Evolução Mman com o controlo de força, diâmetro e velocidade da ferramenta para AA5083 e AA6082.

Observando o gráfico, percebemos que o Mman diminui com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta, para ambas as ligas.

No que toca à liga AA5083, os ensaios que utilizaram menor pressão, 12kN de força axial e ferramenta PL18, alcançaram valores de Mman mais elevados em todas as velocidades de rotação. Por exemplo, nos ensaios realizados a 1500 rpm para a liga AA5083, os valores de Mman alcançados foram de 16,33 N.m e 7,6 N.m, respectivamente. Esta variação tem impacto na velocidade de penetração, dado que, no ensaio com o Mman mais alto, a ferramenta necessita somente de 27,6 segundos para atingir 2 mm de penetração, em comparação aos 38 segundos no ensaio com o Mman mais baixo. Este padrão manteve-se consistente para as restantes velocidades de rotação no caso da liga AA5083. Contudo, em relação à liga AA6082, a mesma tendência só foi observada nas velocidades de rotação de 1140 rpm e 1500 rpm, uma vez que, nas velocidades de 660 rpm e 870 rpm, os ensaios que sofrem maiores pressões e atingem Mman mais baixos apresentaram velocidades de penetração superiores.

Tal como se observou na Figura 4.8, diferentes materias base atingiram valores de M_{man} distintos. Analisando os resultados correspondentes à utilização da ferramenta PL10 e controlo de força de 6 kN, para uma velocidade de rotação de 870 rpm, a liga AA6082 atingiu os 16,20 N.m enquanto que a liga AA5083 apenas 9,32 N.m.

4.3. Análise da Potência de soldadura

A potência é obtida ao multiplicar o binário de manutenção pela velocidade angular correspondente utilizada na execução do ensaio. Isto serve como uma boa alternativa para a análise das temperaturas, uma vez que existe uma correlação linear entre as duas. A potência em questão representa a energia mecânica introduzida durante a realização do ensaio. Inicialmente, proceder-se-á a uma comparação da evolução da potência de soldadura para todas as ligas abordadas neste trabalho. Com esse propósito, no gráfico da Figura 4.11 foram reunidos os resultados oriundos de ensaios realizados sob as mesmas condições para todas as ligas.

Na Figura 4.11, estão representadas as evoluções da potência, em função da velocidade de rotação da ferramenta, das ligas de alumínio estudadas no presente trabalho, nomeadamente AA6082, AA5083, AA7075 e AA2017. Os ensaios presentes no gráfico foram obtidos com a ferramenta PL12, força axial de 8 kN e velocidades de rotação de 660rpm, 870rpm, 1140rpm e 1500rpm.

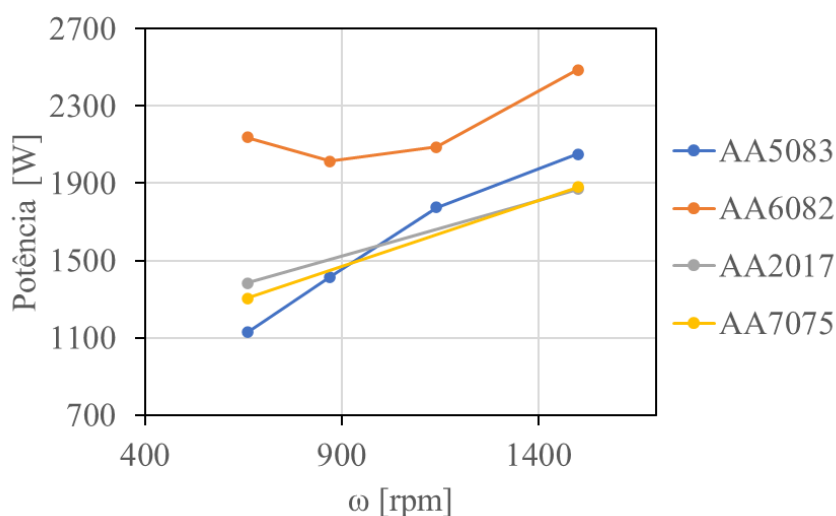


Figura 4.11. Evolução da potência para as diferentes ligas.

Ao analisar o gráfico, é facilmente perceptível que a liga AA6082 exibe valores de potência de soldadura mais elevados à medida que a velocidade de rotação aumenta, em comparação com as outras ligas representadas no gráfico, as quais apresentam evoluções bastante similares entre si. Esta superioridade é mais pronunciada para a velocidade de rotação de 660 rpm, onde a liga AA6082 alcança uma potência de 2137W, em contraste com

as ligas AA5083, AA7075 e AA2017, que atingem apenas 1128W, 1304W e 1384W, respectivamente.

Permitindo assim analisar a influência da velocidade de rotação e do diâmetro da ferramenta na potência de soldadura, na Figura 4.12 a) e b) estão ilustradas, para a liga AA6022 e AA5083, respectivamente, as evoluções da potência de soldadura em função da velocidade de rotação da ferramenta. Para ambas as ligas, são representados os resultados de ensaios que foram realizados com diferentes diâmetros de ferramenta, nomeadamente: PL10, PL12, PL16 e PL18.

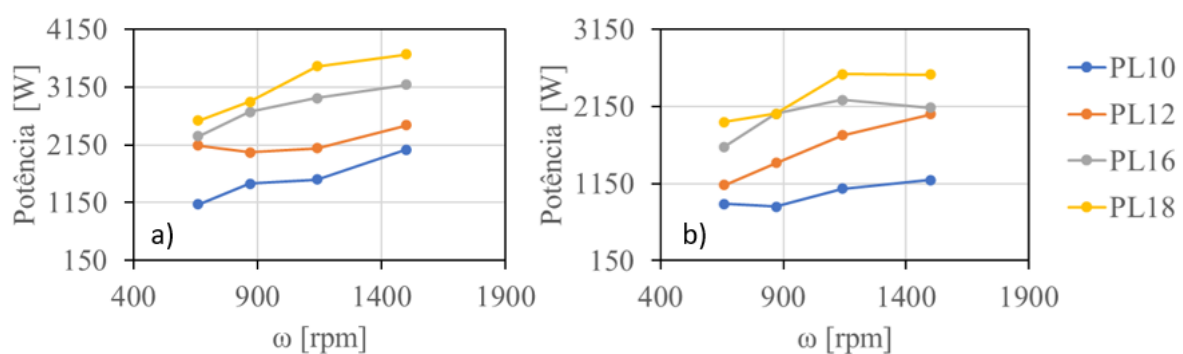


Figura 4.12. Evolução da potência com a velocidade de rotação da ferramenta e diâmetro da ferramenta para a) AA6082 e b) AA5083

As duas ligas exibem comportamentos semelhantes. A elevação da velocidade de rotação da ferramenta resulta em um aumento da potência de soldadura. A título de exemplo, na Figura 4.12 a), observa-se que para a ferramenta PL10, entre as velocidades de rotação de 660 rpm e 1500 rpm, ocorre um aumento de 951W na potência de soldadura. Além disso, o aumento do diâmetro da ferramenta também influencia o crescimento da potência de soldadura, como pode ser visto na Figura 4.12 b), onde, para a velocidade de rotação de 1140 rpm, o incremento do diâmetro de 10 mm para 18 mm resulta em um aumento de 1484W na potência de soldadura.

4.4. Macroestrutura

No presente subcapítulo a macroestrutura de um conjunto de ensaios selecionados é apresentada, de modo a interligar todo o estudo antecedente, permitindo uma análise mais detalhada dos resultados.

Na Figura 4.13, estão representadas as macroestruturas dos ensaios realizados com a ferramenta PL12, força axial de 8 kN e velocidade de rotação da ferramenta de 660rpm, para diversas ligas de alumínio, neste caso na Figura 4.13 a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e por fim d) AA7075. Deste modo, analisando as imagens é possível perceber a profundidade atingida nos ensaios pelas ferramentas.

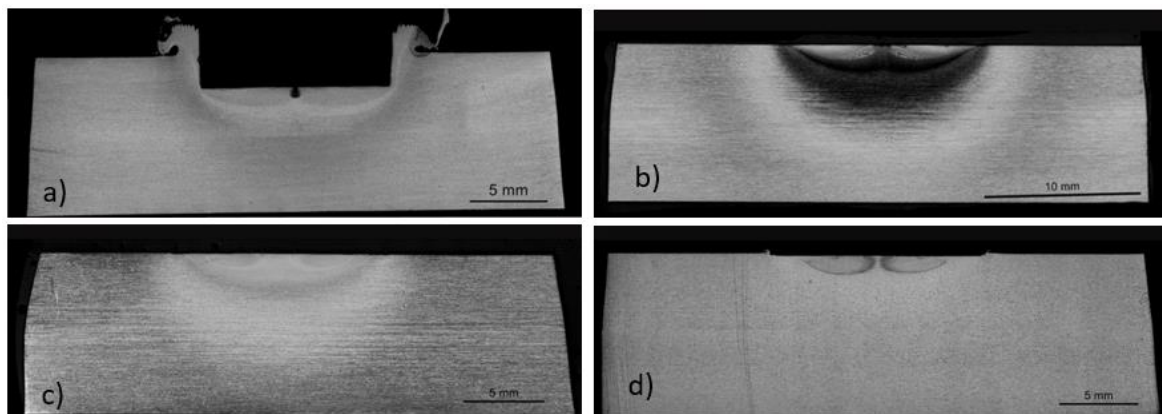


Figura 4.13. Macroestrutura resultante da ferramenta PL12, controlo de força de 8kn e velocidade de rotação de 660rpm para a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e d) AA7075.

Ao observar a figura, nota-se claramente a diferença na profundidade alcançada no ensaio da liga AA6083 em comparação com as demais. Isso já havia sido previamente observado na Figura 4.1, onde a superioridade da velocidade de penetração da liga AA6082 era evidente em relação às outras, que por sua vez, exibiam comportamentos semelhantes entre si. Isso é agora confirmado pela Figura 4.13, visto que quase não há penetração nas demais ligas, sendo o maior valor apenas 0,19 mm para a liga AA5083, o que é significativamente inferior quando comparado aos 1,9 mm alcançados pela liga AA6082, para o mesmo tempo de ensaio.

Quanto aos binários de manutenção alcançados, eles também refletem grande parte do que foi analisado nesta figura. Conforme indicado na Figura 4.8, a liga AA6082 atinge um valor consideravelmente mais alto, enquanto as demais ligas apresentam valores semelhantes entre si.

Além disso, a potência de soldadura utilizada na execução destes ensaios seguiu a mesma tendência do binário de manutenção, pois, como já demonstrado na Figura 4.11, a liga AA6082 possui um valor significativamente mais elevado em comparação com as outras ligas.

Em conclusão, sob estas condições de ensaio, a ferramenta na liga AA6082 alcançou valores de penetração muito superiores às outras ligas, bem como binários de manutenção e potências de soldadura mais elevadas.

Permite-se a análise da influência da velocidade de rotação da ferramenta na penetração alcançada através da Figura 4.14, onde estão representadas as macroestruturas de ensaios executados sob condições idênticas às apresentadas na Figura 4.13, ou seja, com o uso da ferramenta PL12 e uma força axial de 8 kN. No entanto, foi utilizada uma velocidade de rotação da ferramenta superior, especificamente 1500 rpm, nas mesmas ligas de alumínio. Na Figura 4.14 encontram-se representadas as seguintes ligas: a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e, finalmente, d) AA7075.

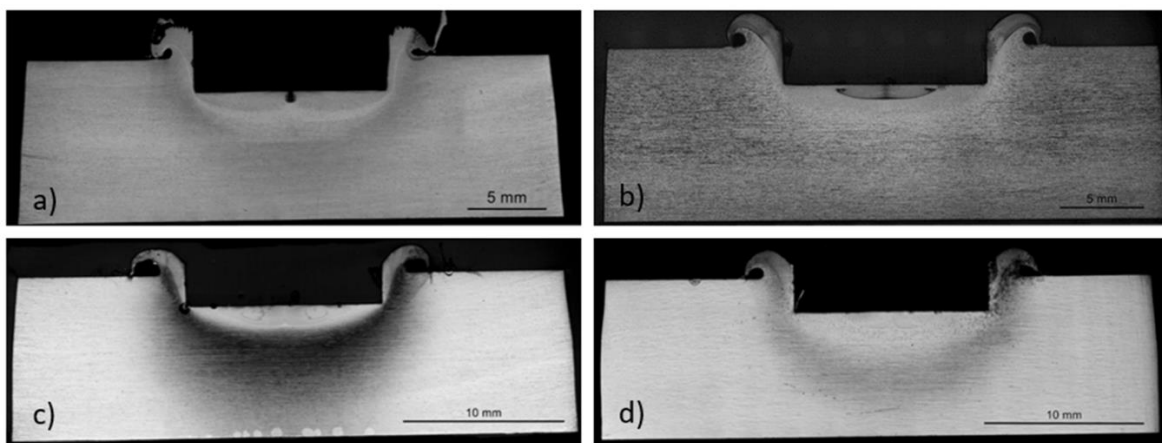


Figura 4.14. Macroestrutura resultante da ferramenta PL12, controlo de força de 8kn e velocidade de rotação de 1500rpm para a) AA6082, b) AA5083, c) AA2017 e d) AA7075.

Em contraste com o que é apresentado na Figura 4.13, na Figura 4.14 observa-se que as ferramentas em todos os ensaios alcançam aproximadamente 2mm de penetração. Tal ocorre devido à interrupção do processo quando este valor é alcançado. No entanto, o tempo necessário para atingir esta penetração variou. No ensaio com a liga AA6082, a ferramenta levou apenas 22 segundos, enquanto nas ligas AA5083, AA2017 e AA7075, foram necessários 35, 60 e 46 segundos, respetivamente.

Relativamente ao binário de manutenção e à potência, estes mantiveram um comportamento consistente com o observado nos ensaios da Figura 4.13. Os ensaios em que as ferramentas atingiram mais rapidamente os 2mm de penetração, também exibiram valores mais elevados de binário de manutenção e potência de soldadura. Por exemplo, no ensaio com a liga AA6082, registou-se um binário de manutenção de 15,84 N.m e foi utilizada uma potência de 2488,21 W. Em contraste, o ensaio com a liga AA2017 apresentou apenas 11,91

N.m de binário de manutenção e 1870 W de potência. Quanto às ligas AA5083 e AA2017, os valores foram novamente similares aos observados no ensaio com a liga AA2017.

Comparando agora as Figura 4.13 e Figura 4.14, concluímos que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta incentivou a uma maior velocidade de penetração e portanto como mostra a Figura 4.14, a penetrações mais elevadas, especialmente evidente para as ligas AA5083, A7075 e AA2017, uma vez que no caso da liga AA6082 a ferramenta nas duas condições de ensaio distintas alcançou aproximadamente os 2mm de penetração.

Em relação ao Mman e à potência de soldadura, os maiores valores alcançados, nas duas condições de ensaio apresentadas, pertencem aos ensaios realizados na liga AA6082.

Os ensaios realizados com maior velocidade de rotação, apresentam uma diminuição do Mman, mas em contrapartida a potência de soldadura aumenta, relativamente aos ensaios realizados com menor velocidade de rotação, para todas as ligas estudadas, como já tinha sido observado nas Figura 4.8 e Figura 4.11.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a evolução do binário e da temperatura em vários alumínios quando soldados com uma ferramenta sem pinos para diferentes velocidades de rotação, diâmetros e forças axiais, assim como perceber a influência dos diversos parâmetros do processo, do material base e da geometria da ferramenta na velocidade de penetração da ferramenta. Deste trabalho podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Considerando o conjunto selecionado de parâmetros do processo, somente o binário converge para uma condição de autoestabilização depois de a força axial atingir o valor imposto. A temperatura apresenta em todos os ensaios realizados um incremento constante ao longo de todo o processo.
- As diferentes propriedades mecânicas e térmicas, associadas às diferentes ligas tiveram impacto perceptível nos valores de binário de manutenção, potência de soldadura e velocidade de penetração da ferramenta.
- O diâmetro da ferramenta, a força axial e a velocidade de rotação da ferramenta têm uma forte influência nos valores de velocidade de penetração atingidas. Enquanto que o aumento da velocidade de rotação e da força axial provocam um aumento da velocidade de penetração, o aumento do diâmetro da ferramenta provoca o contrário.
- O impacto que a velocidade de rotação tem sobre a velocidade de penetração da ferramenta vai diminuído até se tornar praticamente nulo, à medida que se incrementa o seu valor.
- A pressão revelou um comportamento variado. Resultados provenientes da utilização de pressões muito diferentes revelam que até pelo menos à velocidade de rotação de 870 rpm, a ferramenta do ensaio onde se utiliza maior pressão apresenta maior velocidade de penetração. Em valores iguais ou superiores a 1140 rpm, o oposto acontece. Comparando agora pressões similares, no caso das duas serem elevadas, a ferramenta do ensaio onde atua a maior pressão, tem maior velocidade de rotação. Ambas baixas, o

comportamento inverte-se, a ferramenta do ensaio onde se utilizou menor pressão, tem maior velocidade de penetração.

- A velocidade de rotação da ferramenta e o diâmetro da ferramenta tem forte impacto nos valores de Potência de soldadura. O aumento de cada uma destas variáveis provoca o aumento da potência de soldadura.

5.1. Trabalhos futuros

Algumas sugestões de trabalhos futuros podem incluir:

- Caracterização mecânica dos materiais base a altas temperaturas.
- Desenvolver uma técnica mais precisa para a aquisição de temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. N. E. Thomas, W. M. Needham, J. C. Murch, M. G. Temple-Smith, P. Dawes, and C. J. US Patent, No., 1995.
2. Khaled Yousif Ali, B. *Friction Stir Welding between Similar and Dissimilar Materials*;
3. Singh, K.; Singh, G.; Singh, H. Review on Friction Stir Welding of Magnesium Alloys. *Journal of Magnesium and Alloys* 2018, 6, 399–416.
4. Galvão, I.; Loureiro, A.; Rodrigues, D.M. Critical Review on Friction Stir Welding of Aluminium to Copper. *Science and Technology of Welding and Joining* **2016**, 21, 523–546, doi:10.1080/13621718.2015.1118813.
5. Magalhães, V.M.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Friction Stir Welding Industrialisation and Research Status. *Science and Technology of Welding and Joining* 2018, 23, 400–409.
6. Zhang, Y.N.; Cao, X.; Larose, S.; Wanjara, P. Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012, 51, 250–261.
7. Leitão, C.; Louro, R.; Rodrigues, D.M. Using Torque Sensitivity Analysis in Accessing Friction Stir Welding/Processing Conditions. *J Mater Process Technol* **2012**, 212, 2051–2057, doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.05.009.
8. Zhang, Y.N.; Cao, X.; Larose, S.; Wanjara, P. Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing. *Canadian Metallurgical Quarterly* 2012, 51, 250–261.
9. Mira-Aguiar, T.; Verdera, D.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Tool Assisted Friction Welding: A FSW Related Technique for the Linear Lap Welding of Very Thin Steel Plates. *J Mater Process Technol* **2016**, 238, 73–80, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.07.006.
10. Li, K.; Liu, X.; Zhao, Y. Research Status and Prospect of Friction Stir Processing Technology. *Coatings* 2019, 9.
11. Rai, R.; De, A.; Bhadeshia, H.K.D.H.; DebRoy, T. Review: Friction Stir Welding Tools. *Science and Technology of Welding and Joining* **2011**, 16, 325–342, doi:10.1179/1362171811Y.0000000023.
12. Tozaki, Y.; Uematsu, Y.; Tokaji, K. A Newly Developed Tool without Probe for Friction Stir Spot Welding and Its Performance. *J Mater Process Technol* **2010**, 210, 844–851, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.01.015.
13. Shen, Z.; Ding, Y.; Gerlich, A.P. Advances in Friction Stir Spot Welding. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 2020, 45, 457–534.
14. US6601751.
15. Sun, Y.F.; Fujii, H.; Takaki, N.; Okitsu, Y. Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy/Steel Joints Prepared by a Flat Spot Friction Stir Welding Technique. *Mater Des* **2013**, 47, 350–357, doi:10.1016/j.matdes.2012.12.007.
16. Smith, C.B.; Hinrichs, J.F.; Ruehl, P.C. *Friction Stir and Friction Stir Spot Welding-Lean, Mean and Green*;
17. Yazdi, S.R.; Beidokhti, B.; Haddad-Sabzevar, M. Pinless Tool for FSSW of AA 6061-T6 Aluminum Alloy. *J Mater Process Technol* **2019**, 267, 44–51, doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.12.005.

18. Mousavizade, S.M.; Pouranvari, M. Projection Friction Stir Spot Welding: A Pathway to Produce Strong Keyhole-Free Welds. *Science and Technology of Welding and Joining* **2019**, *24*, 256–262, doi:10.1080/13621718.2018.1521068.
19. Cox, C.D.; Gibson, B.T.; Strauss, A.M.; Cook, G.E. Effect of Pin Length and Rotation Rate on the Tensile Strength of a Friction Stir Spot-Welded Al Alloy: A Contribution to Automated Production. In Proceedings of the Materials and Manufacturing Processes; April 1 2012; Vol. 27, pp. 472–478.
20. Tier, M.D.; Rosendo, T.S.; Dos Santos, J.F.; Huber, N.; Mazzaferro, J.A.; Mazzaferro, C.P.; Strohaecker, T.R. The Influence of Refill FSSW Parameters on the Microstructure and Shear Strength of 5042 Aluminium Welds. *J Mater Process Technol* **2013**, *213*, 997–1005, doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.12.009.
21. Andrade, D.G.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Properties of Lap Welds in Low Carbon Galvanized Steel Produced by Tool Assisted Friction Welding. *J Mater Process Technol* **2018**, *260*, 77–86, doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.05.018.
22. Yazdi, S.R.; Beidokhti, B.; Haddad-Sabzevar, M. Pinless Tool for FSSW of AA 6061-T6 Aluminum Alloy. *J Mater Process Technol* **2019**, *267*, 44–51, doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.12.005.
23. Lakshminarayanan, A.K.; Annamalai, V.E.; Elangovan, K. Identification of Optimum Friction Stir Spot Welding Process Parameters Controlling the Properties of Low Carbon Automotive Steel Joints. *Journal of Materials Research and Technology* **2015**, *4*, 262–272, doi:10.1016/j.jmrt.2015.01.001.
24. Andrade, D.G.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Influence of Base Material Characteristics and Process Parameters on Frictional Heat Generation during Friction Stir Spot Welding of Steels. *J Manuf Process* **2019**, *43*, 98–104, doi:10.1016/j.jmapro.2019.05.015.
25. De Leon, M.; Shin, H.S. Material Flow Behaviours during Friction Stir Spot Welding of Lightweight Alloys Using Pin and Pinless Tools. *Science and Technology of Welding and Joining* **2016**, *21*, 140–146, doi:10.1179/1362171815Y.0000000075.
26. Badarinarayan, H.; Shi, Y.; Li, X.; Okamoto, K. Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets. *Int J Mach Tools Manuf* **2009**, *49*, 814–823, doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.06.001.
27. Bakavos, D.; Chen, Y.; Babout, L.; Prangnell, P. Material Interactions in a Novel Pinless Tool Approach to Friction Stir Spot Welding Thin Aluminum Sheet. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* **2011**, *42*, 1266–1282, doi:10.1007/s11661-010-0514-x.
28. Da Costa Gaspar, R. *TORQUE AND TEMPERATURE ANALYSIS IN FSSW OF ALUMINIUM ALLOYS*;
29. Gerlich, A.; Yamamoto, M.; North, T.H. Local Melting and Tool Slippage during Friction Stir Spot Welding of Al-Alloys. *J Mater Sci* **2008**, *43*, 2–11, doi:10.1007/s10853-007-1791-7.
30. Andrade, D.G.; Sabari, S.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Shoulder Related Temperature Thresholds in Fssw of Aluminium Alloys. *Materials* **2021**, *14*, doi:10.3390/ma14164375.

31. Awang, M.; Mucino, V.H. Energy Generation during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Al 6061-T6 Plates. *Materials and Manufacturing Processes* **2010**, *25*, 167–174, doi:10.1080/10426910903206758.
32. Simar, A.; Lecomte-Beckers, J.; Pardoën, T.; De Meester, B. Effect of Boundary Conditions and Heat Source Distribution on Temperature Distribution in Friction Stir Welding. *Science and Technology of Welding and Joining* **2006**, *11*, 170–177, doi:10.1179/174329306X84409.
33. Colligan, K.J.; Mishra, R.S. A Conceptual Model for the Process Variables Related to Heat Generation in Friction Stir Welding of Aluminum. *Scr Mater* **2008**, *58*, 327–331, doi:10.1016/j.scriptamat.2007.10.015.
34. Longhurst, W.R.; Strauss, A.M.; Cook, G.E.; Fleming, P.A. Torque Control of Friction Stir Welding for Manufacturing and Automation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2010**, *51*, 905–913, doi:10.1007/s00170-010-2678-3.
35. Andrade, D.G.; Leitão, C.; Dialami, N.; Chiumenti, M.; Rodrigues, D.M. Modelling Torque and Temperature in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *Int J Mech Sci* **2020**, *182*, doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.105725.
36. Freeney, T.A.; Sharma, S.R.; Mishra, R.S. *Effect of Welding Parameters on Properties of 5052 Al Friction Stir Spot Welds*;
37. Bakavos, D.; Chen, Y.; Babout, L.; Prangnell, P. Material Interactions in a Novel Pinless Tool Approach to Friction Stir Spot Welding Thin Aluminum Sheet. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* **2011**, *42*, 1266–1282, doi:10.1007/s11661-010-0514-x.
38. Andrade, D.G.; Sabari, S.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M. Shoulder Related Temperature Thresholds in Fssw of Aluminium Alloys. *Materials* **2021**, *14*, doi:10.3390/ma14164375.
39. Cox, C.D.; Aguilar, J.R.; Ballun, M.C.; Strauss, A.M.; Cook, G.E. The Application of a Pinless Tool in Friction Stir Spot Welding: An Experimental and Numerical Study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* **2014**, *228*, 1359–1370, doi:10.1177/0954407013517374.
40. Leitão, C.; Louro, R.; Rodrigues, D.M. 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* **2012**, *37*, 402–409, doi:10.1016/j.matdes.2012.01.031.
41. Andrade, D.G.; Leitão, C.; Dialami, N.; Chiumenti, M.; Rodrigues, D.M. Analysis of Contact Conditions and Its Influence on Strain Rate and Temperature in Friction Stir Welding. *Int J Mech Sci* **2021**, *191*, doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.106095.
42. Yazdi, S.R.; Beidokhti, B.; Haddad-Sabzevar, M. Pinless Tool for FSSW of AA 6061-T6 Aluminum Alloy. *J Mater Process Technol* **2019**, *267*, 44–51, doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.12.005.

ANEXO A

Tabela A. 1 Binário de manutenção, potência de soldadura.

| Material | Velocidade de rotação[rpm] | Diâmetro da base [mm] | Controlo de força [kN] | Potência de soldadura [W] | Mman[N.m] |
|----------|----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|------------|
| AA5083 | 660 | 10 | 6 | 887,43 | 12,84 |
| | | | 9 | 1255,75 | 18,17 |
| | | | 12 | 1232,00 | 17,83 |
| | | 12 | 8 | 1128,47 | 16,33 |
| | | 16 | 10 | 1626,06 | 23,53 |
| | | 18 | 12 | 1946,11 | 28,16 |
| | 870 | 10 | 6 | 849,31 | 9,32 |
| | | | 8 | 1415,32 | 15,53 |
| | | | 10 | 2055,18 | 22,56 |
| | | | 12 | 2053,00 | 22,53 |
| | 1140 | 10 | 6 | 1085,44 | 9,09 |
| | | | 8 | 1775,92 | 14,88 |
| | | | 10 | 2231,83 | 18,70 |
| | | | 12 | 2569,48 | 21,52 |
| | 1500 | 10 | 6 | 1193,88 | 7,60 |
| | | | 8 | 2050,93 | 13,06 |
| | | | 10 | 2130,54 | 13,56 |
| | | | 12 | 2564,79 | 16,33 |

| | | | | | |
|--------|------|----|----|---------|-------|
| AA6082 | 660 | 10 | 6 | 1115,51 | 16,14 |
| | | | 9 | 1315,37 | 19,03 |
| | | 12 | 6 | 1624,46 | 23,50 |
| | | | 8 | 2136,91 | 30,92 |
| | | | 10 | 1561,04 | 22,59 |
| | | 16 | 10 | 2296,74 | 33,23 |
| | | 18 | 12 | 2565,89 | 37,12 |
| | 870 | 10 | 6 | 1475,49 | 16,20 |
| | | 12 | 6 | 1775,94 | 19,49 |
| | | | 8 | 2015,12 | 22,12 |
| | | | 10 | 1740,03 | 19,10 |
| | | 16 | 10 | 2717,42 | 29,83 |
| | | 18 | 12 | 2890,70 | 31,73 |
| | 1140 | 10 | 6 | 1547,04 | 12,96 |
| | | 12 | 6 | 1972,85 | 16,53 |
| | | | 8 | 2088,21 | 17,49 |
| | | | 10 | 2403,68 | 20,13 |
| | | 16 | 10 | 2955,90 | 24,76 |
| | | 18 | 12 | 3507,73 | 29,38 |
| | 1500 | 10 | 6 | 2066,48 | 13,16 |
| | | 12 | 6 | 2146,20 | 13,66 |
| | | | 8 | 2488,21 | 15,84 |
| | | | 10 | 2772,71 | 17,65 |
| | | 16 | 10 | 3192,14 | 20,32 |

| | | | | | |
|--------|------|----|----|---------|-------|
| | | 18 | 12 | 3713,63 | 23,64 |
| AA7075 | 660 | 12 | 8 | 1303,71 | 18,86 |
| | 1500 | 12 | 8 | 1879,24 | 11,96 |
| AA2017 | 660 | 12 | 8 | 1384,34 | 20,03 |
| | 1500 | 12 | 8 | 1870,53 | 11,91 |