



Fábio Silva Nogueira

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Processamento e reforço de materiais no estado sólido

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Doutor, FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado
Vogais: Prof. Doutor João Pedro de Sousa Oliveira
Prof. Doutora Catarina Isabel Silva Vidal
Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2019

Processamento e reforço de materiais no estado sólido

Copyright © Fábio Silva Nogueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização da dissertação, o meu profundo agradecimento, em especial:

Ao professor Telmo Santos, um sincero obrigado pela preocupação, disponibilidade, apoio e pela transmissão de conhecimentos, que contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos técnicos de laboratório Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, por toda a ajuda e conhecimento partilhado para realizar a parte experimental da presente dissertação

Aos meus colegas de laboratório: Patrick Inácio, Miguel Machado, Rui Tareco, Francisco Ferreira, Rui Santos e João Bento, pelas suas contribuições para a realização desta dissertação. Deixo também um agradecimento aos colegas do laboratório rival Valdemar Duarte, Tiago Rodrigues e Frederico Matos.

Aos meus grandes amigos Samuel Simões, Carlos Simão, Miguel Mousinho, Diogo Ferreira e Diogo Rodrigues, que me acompanharam durante o percurso académico.

Por fim, um destaque especial para os meus pais e para a minha irmã que tanto contribuíram e apoiaram nesta esta fase, incentivando-me a ultrapassar os obstáculos que foram surgindo ao longo desta caminhada.

RESUMO

O Processamento por Fricção Linear (PFL) é um processo no estado sólido baseado na Soldadura por Fricção Linear (SFL) para modificar as propriedades dos materiais. O PFL permite modificar a microestrutura do material, com ou sem a adição de partículas de reforço, promovendo o refinamento de grão e consequente melhoria das suas propriedades mecânicas, tais como a ductilidade, a resistência mecânica e a resistência à corrosão.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma nova técnica de reforço através do fluxo ascendente de material, com as partículas situadas entre duas chapas do material base.

Foram realizados ensaios com fluxo de material ascendente e descendente para comparação com os métodos convencionalmente utilizados, com variação do número de passagens sobrepostas e variação na direção de avanço lateral entre passagens.

Verifica-se que com o fluxo de material ascendente é possível incorporar o material de reforço no material base, obtendo-se uma distribuição mais uniforme quando são realizadas múltiplas passagens com avanço lateral entre passagens de 1,5 mm para o lado de retrocesso.

PALAVRAS-CHAVE

Processamento por Fricção Linear; Ligas de Alumínio; Modificação Microestrutura; Material de reforço; Propriedades mecânicas

ABSTRACT

The Friction Stir Process (FSP) is a solid state technology, based on Friction Stir Welding (FSW), used to modify the properties of the materials. FSP allows the modification of the materials microstructure, with or without the addition of reinforcing particles, promoting the refinement of the grain and therefore improving its mechanical properties, such as ductility, mechanical strength and corrosion resistance.

The objective of this work was the development of a new reinforcement technique through upward material flow, with the particles located between two plates of base material.

Tests were performed with up and downward material flow for comparison with the most common methods, with variation of the number of overlapped passes and variation in the direction between passes.

Best results were obtained with the upward material flow with greater uniform distribution of particles in the base material performing multiple overlapped passes spaced 1,5 mm advancing to the retracting side.

KEYWORDS

Friction Stir Process, Aluminium Alloys; Microstructure modification; Reinforcement Materials; Mechanical Properties.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
PALAVRAS-CHAVE	vii
ABSTRACT	ix
KEYWORDS	ix
ÍNDICE	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
NOMENCLATURA	xxi
1–INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Motivação e objetivos	1
1.2 – Trabalho Realizado.....	2
1.3 – Estrutura da Dissertação	2
2–REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 - Material Base.....	6
2.2.1 – Alumínio	6
2.2.2 – Magnésio.....	8
2.3 – Soldadura por fricção linear (SFL)	9
2.4 – Processamento por fricção linear (PFL).....	11
2.4.1 – Parâmetros de processo	14
2.4.2 – Tipo e geometria da ferramenta	14
2.4.3 – Velocidade de rotação, ω [rev/min] e de avanço, v [mm/min] ..	15
2.4.4 – Ângulo de ataque [°].....	16
2.4.5 – Força axial ou de forjamento.....	17
2.4.6 – Penetração da ferramenta.....	17
2.4.7 – Número de passagens	17
2.5 – Produção de compósitos	18
2.5.1 – Métodos de reforço	18
2.5.2 – Materiais de reforço.....	20
2.6 – Síntese do Capítulo	23
3– PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	25
3.1 – Introdução.....	25
3.2 – Caracterização dos materiais	25
3.3 – Equipamento utilizado.....	27
3.4 - Métodos de reforço.....	29

3.4.1	– Método convencional com rasgo longitudinal.....	29
3.4.2	– Método de espaçador entre chapas para efeito de <i>Sandwich</i> ..	31
3.5	– Parâmetros dos ensaios experimentais.....	34
3.6	– Análise metalográfica.....	34
4	– ANÁLISE DE RESULTADOS	37
4.1	– Introdução.....	37
4.2	- PFL com material de reforço – método com rasgo longitudinal.....	37
4.3	- Método <i>sandwich</i>	39
4.3.1	– PFL sem material de reforço	39
4.3.2	- PFL com material de reforço.....	41
5	– CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..	59
5.1	– Introdução.....	59
5.2	– Conclusões	59
5.3	– Propostas para Desenvolvimentos Futuros	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de ferramenta <i>Triflute™</i> de SFL desenvolvida pelo TWI.	10
Figura 2.2 - Esquema da realização da soldadura por fricção linear.....	10
Figura 2.3 – Diagrama esquemático das diferentes zonas do material processado por fricção linear: a) zona não afetada; b) zona termicamente afetada (ZTA); c) zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA); d) <i>Nugget</i>	12
Figura 2.4 – Exemplos de geometrias de pino utilizadas no PFL.....	15
Figura 2.5 - Exemplos de geometrias do <i>shoulder</i> utilizados no PFL.....	15
Figura 2.6 – Macrografias da secção do <i>nugget</i> resultante do PFL com diferentes geometrias e velocidade de rotação	16
Figura 2.7 – Macrografias de secções de superfícies processadas por fricção linear com sobreposição pelo lado de avanço (a) e lado de retrocesso (b)	18
Figura 2.8 – PFL com técnica de rasgo para adição de partículas.....	19
Figura 2.9 – PFL com técnica de furos para adição de partículas.....	20
Figura 2.10 – Micrografia ótica da distribuição de partículas na matriz de alumínio.....	21
Figura 2.11 – Microestrutura do a) material base, b) material processado sem adição de partículas, c) material processado com adição de SiC	22
Figura 2.12 – Microscopias eletrónica de varrimento de PFS com a) uma, b) duas, c) três e d) quatro passagens	23
Figura 3.1 – Fresadora no DEMI e equipamento de aquisição de dados.....	27
Figura 3.2 - Ferramenta de PFL utilizada nos ensaios experimentais.....	28
Figura 3.3 – Base instrumentada para colocação de chapas para PFL	29
Figura 3.4 – Rasgo de 2 mm de largura ao longo do comprimento da chapa de AA7075.....	30
Figura 3.5 – PFL em AA7075 com adição de material de reforço num rasgo ..	30
Figura 3.6 – Substrato inferior com espaçador para colocação de partículas de reforço	32
Figura 3.7 – Disposição do espaçador	32
Figura 3.8 – Adição do material de reforço no substrato inferior	33
Figura 3.9 – Esquema do método de <i>Sandwich</i>	33

Figura 4.1 – Resultado do ensaio do método do rasgo longitudinal.....	38
Figura 4.2 – Macrografias do ensaio do método do rasgo	39
Figura 4.3 – Resultado do ensaio do material base processado.....	40
Figura 4.4 – Microestrutura do material a) antes e b) depois do processamento.....	40
Figura 4.5 – Macrografia do defeito da amostra do ensaio do material base ...	41
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios a) E1, b) E2 e c) E3.....	44
Figura 4.7 – Macrografia da secção transversal da amostra 1 do ensaio E1 ...	45
Figura 4.8 - Macrografia da secção transversal da amostra 2 do ensaio E2....	45
Figura 4.9 - Macrografias da secção transversal das amostras 1 e 2 do ensaio E3.....	46
Figura 4.10 – Micrografia da amostra do ensaio E1	47
Figura 4.11 – Micrografias das amostras dos ensaios E2 e E3.....	48
Figura 4.12 – Resultado do ensaio E4	49
Figura 4.13 – Macro e micrografias da secção transversal das amostras M1 do ensaio E4 com a) passagem simples e b) passagem múltipla	50
Figura 4.14 – Resultados dos ensaios a) E5 e b) E6	51
Figura 4.15 – Repetição dos ensaios E5 e E6. Resultados obtidos com passagem simples a) E5_2 e b) E6_2.....	52
Figura 4.16 – Macro e micrografia da secção transversal da amostra do ensaio E5	53
Figura 4.17 – Macro e micrografia da secção transversal da amostra do ensaio E6	53
Figura 4.18 – Macro e micrografia da secção transversal das amostras dos ensaios E5 e E6 com passagens múltiplas.	54
Figura 4.19 – Resultados dos ensaios com 6 passagens com passo de 1,5 mm para o lado de a) avanço - E7 e de b) retrocesso - E8.....	55
Figura 4.20 – E7_2: Resultado obtido da repetição do ensaio E7.....	55
Figura 4.21 – Micrografia da secção transversal de amostras retiradas dos ensaios E7 e E8	57
Figura 4.22 – Micrografia da superfície de amostras retiradas dos ensaios E7 e E8.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição das diferentes séries dos alumínios.....	7
Tabela 2.2 – Tratamentos mecânicos e térmicos possíveis para as ligas de alumínio.....	7
Tabela 2.3 – Vantagens da PFL.....	13
Tabela 3.1- Composição química das ligas de alumínio	26
Tabela 3.2 – Composição química da liga de magnésio AZ31.....	26
Tabela 3.3 – Propriedades das ligas	26
Tabela 3.4 – Altura do pino usada [mm] para cada ensaio experimental	34
Tabela 4.1 – Macrografias das amostras processadas com adição de material de reforço	42

NOMENCLATURA

MB	Material base
MR	Material de reforço
PFL	Processamento por fricção linear
SFL	Soldadura por fricção linear
TWI	The Welding Institute
ZTA	Zona termicamente afetada
ZTMA	Zona termicamente e mecanicamente afetada
Hv	Dureza de <i>Vickers</i> [HV]
ω	Velocidade de rotação [rev/min]
v	Velocidade de avanço [mm/min]
RS	Rácio de sobreposição
l	Distância entre centros do pino em cada passagem [mm]
d_{pino}	Diâmetro do pino
LR	Lado de retrocesso
LA	Lado de avanço
SiC	Carboneto de silício
Al_2O_3	Alumina
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato de cálcio
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias
H_{pino}	Altura máxima do pino [mm]

1 -INTRODUÇÃO

1.1 – Motivação e objetivos

A indústria da atualidade, tais como a aeronáutica, automóvel e naval, procura obter produtos otimizados com a utilização de materiais leves que garantam a fiabilidade dos componentes produzidos. Existem vários materiais tais como ligas de alumínio, magnésio e titânio.

Destacam-se as ligas de alumínio devido à baixa densidade, elevado módulo de elasticidade, comparativamente aos polímeros, e boa resistência ao desgaste e corrosão [1], e as ligas de magnésio pela sua biocompatibilidade e possível aplicação na área da biomedicina.

A produção de compósitos de matriz metálica é realizada através de diversos processos como sinterização de pós-metálicos, fundição, técnicas de laser e pulverização. Como fator comum da maioria desses processos tem-se o facto de o processamento ocorrer acima da temperatura de fusão do material, levando a reações intermetálicas e fases indesejáveis entre o material base (MB) e o material de reforço (MR).

Surge a necessidade de desenvolver uma técnica de processamento no estado sólido de forma a evitar os problemas referidos, destacando-se o processamento por fricção linear (PFL) como uma técnica promissora, que permite processar o material em volume ou à superfície sem pôr em causa as propriedades inerentes, uma vez que não é atingida a temperatura de fusão. Este processo permite modificar a microestrutura do MB, sem ou com a adição de partículas de outros materiais na sua matriz, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas.

Neste estudo pretende-se desenvolver uma técnica inovadora de adição de MR através da sua colocação entre duas chapas de MB, utilizado o sentido anti-horário de rotação da ferramenta que, associado a rosca esquerda, promove o fluxo de material ascendente, distribuindo as partículas por todo o volume processado até à superfície.

1.2– Trabalho Realizado

Para realizar esta investigação foi efetuado um ensaio com base na pesquisa bibliográfica efetuada, onde se adiciona o MR num rasgo longitudinal maquinado no MB. De seguida, avalia-se a modificação da microestrutura do MB com e sem a adição de MR utilizando a nova técnica desenvolvida neste estudo. Por fim, realiza-se uma avaliação macro e microscópica da presença e da uniformidade da distribuição das partículas no MB, utilizando uma ou várias passagens sobrepostas de processamento.

1.3– Estrutura da Dissertação

A dissertação divide-se em 5 capítulos, nos quais são expostos os temas tratados para o processamento de matérias no estado sólido.

No capítulo 1, de carácter introdutório, é descrita a motivação, os objetivos e a metodologia aplicada na realização do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada a pesquisa bibliográfica, onde se aborda o estado da arte do processamento de materiais no estado sólido, com e sem adição de material de reforço.

No capítulo 3, é descrita a nova técnica de adição do material de reforço e a metodologia utilizada para a realização e avaliação dos ensaios experimentais.

No capítulo 4 são demonstrados os resultados adquiridos nos ensaios experimentais e é realizada a análise à microestrutura das amostras obtidas.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 -REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Introdução

Materiais funcionais e com elevada resistência mecânica têm sido alvo de grande interesse e têm assumido uma importância crescente em diversas aplicações de engenharia. Os materiais compósitos de matriz metálica, nomeadamente, substratos de alumínio ou magnésio reforçados com partículas são um exemplo onde é possível obter essas propriedades. Logo, surge a necessidade de desenvolver tecnologias de fabrico eficazes para a sua produção, e que acompanhem as necessidades da evolução tecnológica.

O processamento por fricção linear (PFL), baseado na soldadura por fricção linear (SFL) é uma técnica de modificação da microestrutura dos materiais que permite produzir compósitos através de adição de partículas com a função de reforço ou outras funções.

Neste capítulo é apresentada a pesquisa bibliográfica realizada para aquisição de conhecimentos relacionados com a técnica de PFL, as vantagens da utilização deste processo, a influência dos parâmetros do processo e exemplos de possíveis aplicações.

2.2- Material Base

2.2.1 – Alumínio

O alumínio destaca-se como um material bastante atrativo para a indústria devido às suas propriedades mecânicas. Possui cerca de 1/3 da densidade do aço ($2,69 \text{ g/cm}^3$) permitindo obter um rácio massa/volume interessante para as indústrias automóvel e aeronáutica. A substituição de componentes de aço por alumínio resulta na redução de peso do sistema e, associada à sua boa resistência mecânica permite um bom desempenho e redução no consumo de combustível. Tem também uma boa condutividade elétrica, ductilidade e resistência à corrosão, que o torna interessante também para a aplicação nas indústrias da eletrónica, civil e transmissão de energia.

Diferentes ligas de alumínio podem ser reforçadas através de trabalho a frio e/ou tratamentos térmicos, permitindo aumentar a sua resistência mecânica. No entanto, o módulo de elasticidade não é alterado (cerca de 70 GPa) sendo esta propriedade também inferior ao aço na mesma razão de 1/3 [2].

As ligas de alumínio são organizadas por um conjunto de quatro dígitos, onde:

- o primeiro dígito indica qual o principal elemento de liga, usualmente utilizado para descrever a série da liga de alumínio;
- o segundo dígito, caso seja diferente de 0, representa a modificação da liga específica;
- nas ligas da série 1 (alumínios puros), os últimos 2 dígitos correspondem à pureza do alumínio, enquanto que nas restantes séries apenas servem para identificar diferentes ligas;
- o prefixo X é utilizado para ligas no seu estado experimental de desenvolvimento.

Na Tabela 2.1 são apresentados os principais elementos de liga bem como outros elementos de adição que definem cada série das ligas de alumínio.

Tabela 2.1 – Composição das diferentes séries dos alumínios [2]

Série	Elementos principais de liga	Outros elementos de liga
1XXX	Alumínio Puro	-
2XXX	Cu	Mg, Li
3XXX	Mn	Mg
4XXX	Si	-
5XXX	Mg	-
6XXX	Mg, Si	-
7XXX	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8XXX	Li, Sn, Fe, Cu, Mn	-

Quanto a tratamentos posteriores, na Tabela 2.2 apresenta-se os tratamentos térmicos e mecânicos que as ligas podem ser sujeitas na tentativa de melhorar as suas propriedades mecânicas.

Tabela 2.2 – Tratamentos mecânicos e térmicos possíveis para as ligas de alumínio [2].

Designação do Tratamento	Especificação	Especificação do primeiro dígito
F	Sem tratamento	-
O	Recozimento	
H	Deformação a frio	H1x – Deformação a frio
		H2x – Com recozimento parcial
		H3x – Com estabilização
T	Tratamentos térmicos	T1 – Solubilização parcial e envelhecimento natural
		T2 – Recozimento
		T3 – Solubilização total e deformação a frio
		T4 – Solubilização total e envelhecimento natural
		T5 – Envelhecimento artificial
		T6 - Solubilização total e envelhecimento artificial
		T7 – Solubilização e estabilização
		T8 – Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
		T9 – Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

Devido ao elevado interesse no alumínio, várias técnicas focadas na melhoria das suas propriedades e no alargamento do campo de aplicabilidade são investigadas. Mishra et al.[3] (1999) realizaram pela primeira vez a modificação da microestrutura numa liga de alumínio no estado sólido e, mais tarde, Lim et al. [4] adicionam partículas de reforço de carboneto de silício, obtendo resultados favoráveis que motivaram a continuidade da investigação.

2.2.2 – Magnésio

O magnésio é um metal de construção 35% menos denso que o alumínio e 78% que o aço, tornando-se, pela mesma razão que no alumínio, interessante para os sectores automóvel e aeroespacial. No entanto, o magnésio apresenta valores de dureza, resistência à tração, ductilidade e resistência a corrosão menores quando comparado com o alumínio. A adição de partículas de reforço por fricção linear no magnésio é também uma solução viável para a melhoria das suas propriedades [5–9].

O uso de magnésio e suas ligas em implantes biodegradáveis é um tópico promissor na área dos biomateriais. O magnésio pode ser considerado como substituto do osso humano devido à sua biocompatibilidade associada às boas propriedades mecânicas. A grande desvantagem é o facto de se degradar rapidamente no ambiente fisiológico, logo o controlo da velocidade a que ocorre é a questão principal a ser resolvida.

A hidroxiapatite é um mineral de fosfato de cálcio semelhante à fase mineral óssea e emergiu nas últimas duas décadas como um biocerâmico promissor devido à excelente biocompatibilidade, bioatividade e capacidade de adesão celular [10]. A adição destes fosfatos na matriz de magnésio aparenta ser uma solução para o problema da degradação. No entanto, os métodos de fabrico correntes por metalurgia de pó e fundição não permitem controlar a distribuição das partículas resultando em aglomerações não uniformes. Uma vez que a corrosão se inicia à superfície, é igualmente importante que a dispersão de partículas também se encontre nessa região [11]. Estudos apontam que a adição da hidroxiapatite por fricção linear permite que esta seja distribuída

uniformemente na matriz de magnésio, reduzindo a velocidade de degradação do compósito produzido [10–14].

2.3– Soldadura por fricção linear (SFL)

Na indústria aeroespacial, surge a necessidade de obter soldaduras com elevada resistência mecânica, resistência à fadiga e tenacidade à fratura, nas ligas de alumínio da série 2000 e 7000. Estas são classificadas como ligas não soldáveis por fusão, pelo facto de possuírem baixa solidificação da microestrutura, isto é, o elevado gradiente de temperatura provoca fissuração, e porosidades na zona de fusão [15]. Além disso, outra desvantagem dos processos convencionais de soldadura por fusão é o facto do material base perder propriedades mecânicas importantes ao serem atingidas temperatura elevadas, acima da temperatura de fusão.

A soldadura por fricção linear (SFL) surgiu em 1991 no *TWI (The Welding Institute)* no Reino Unido[16]. Consiste numa técnica aplicável em vários materiais, tal como o alumínio, uma vez que esta se realiza no estado sólido, as temperaturas atingidas no processo evitam o surgimento de defeitos na zona termicamente afetada (ZTA) típicos dos processos de soldadura por fusão.

Utiliza-se uma ferramenta rotativa não consumível composta por um *shoulder* e um pino desenhados para o efeito. A Figura 2.1 ilustra o exemplo de uma ferramenta desenvolvida pelo TWI com a geometria *Triflute™* [17], sendo que diferentes geometrias do pino e do *shoulder* afetam o fluxo de material.

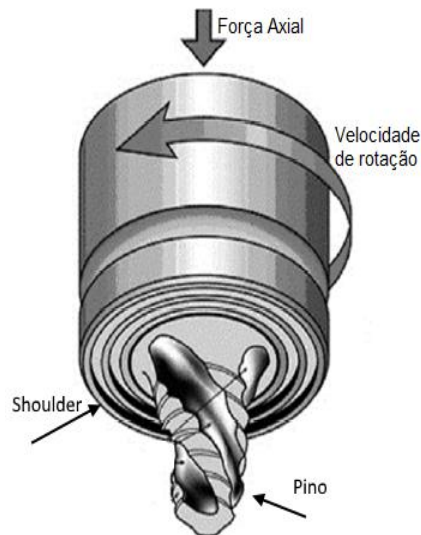


Figura 2.1 – Esquema de ferramenta *Triflute™* de SFL desenvolvida pelo TWI [17].

A ferramenta é colocada em rotação e inserida na peça de trabalho, provocando a deformação plástica no material. A temperatura aumenta devido à fricção do *shoulder* na superfície da peça e junto ao pino, suavizando o material adjacente. Atingindo-se as condições termo mecânicas desejadas, a ferramenta avança transversalmente ao longo da junta (Figura 2.2).

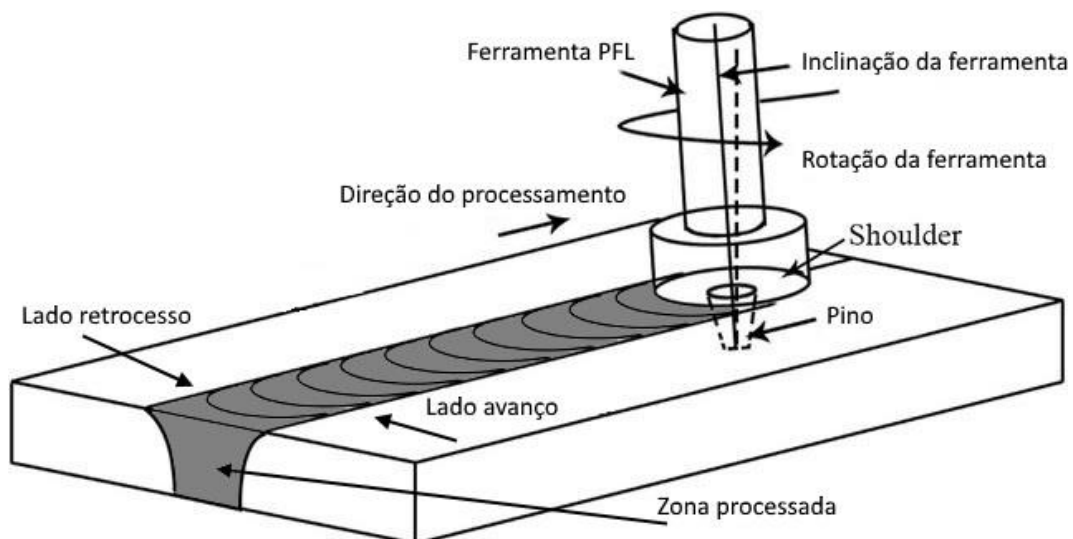


Figura 2.2 - Esquema da realização da soldadura por fricção linear – adaptado de [18]

A combinação entre o calor gerado e o movimento transversal da ferramenta provoca um fluxo visco-plástico de material, limitado superiormente pelo *shoulder*, da zona em avanço para a zona em retrocesso. O lado de avanço é identificado pelo lado onde a rotação e o movimento transversal têm a mesma direção e no de retrocesso, direções opostas.

2.4– Processamento por fricção linear (PFL)

O processamento por fricção linear (PFL) surge com base nos princípios básicos da SFL onde o objetivo passa a ser a modificação do material base. Este método permite que as suas propriedades sejam alteradas devido à intensa deformação plástica localizada. Permite obter um refinamento da microestrutura de grão, densificação e homogeneização da zona processada e eliminação de defeitos provenientes de matérias produzidos por forjamento ou fundição [15], [19]. Conseqüentemente, são melhoradas propriedades como a tensão de cedência, ductilidade e aumento das resistências mecânica, à corrosão e à fadiga.

Do PFL resultam regiões distintas na peça de trabalho. Na Figura 2.3 pode observar-se as zonas termicamente afetadas (ZTA) as térmica e mecanicamente afetadas (ZTMA) e o *nugget*.

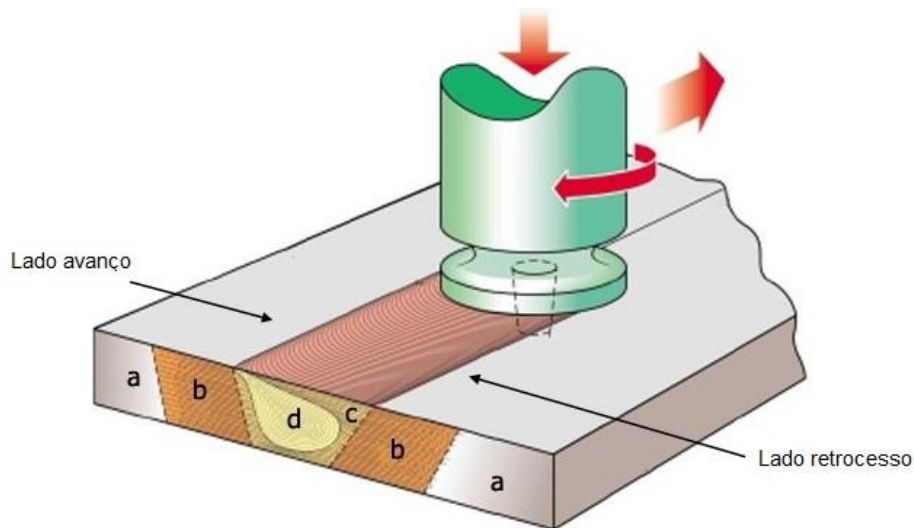


Figura 2.3 – Diagrama esquemático das diferentes zonas do material processado por fricção linear: a) zona não afetada; b) zona termicamente afetada (ZTA); c) zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA); d) *Nugget* - [20]

Na ZTA, não ocorre deformação plástica e o efeito do calor pode causar coalescimento de grão, no caso do material não encruado, transformações de fase dependendo do tipo de liga, precipitados, envelhecimento ou recozimento [21].

A ZTMA é caracterizada por atingir temperaturas superiores às da ZTA e inferiores às do *nugget*, onde o grão se encontra deformado e não recristalizado. No entanto, a dureza é superior à da ZTA devido à elevada densidade de deslocações e sub-límites causados pela deformação plástica.

No *Nugget* é onde ocorre elevada deformação plástica. O aumento da temperatura devido a fricção do pino e da superfície com o *shoulder*, juntamente com alta tensão, promove uma zona dinamicamente recristalizada, resultando na geração de grãos equiaxiais e homogêneos e dissolução de precipitados.

Mishra et al. [3] apresentam pela primeira vez (1999) os resultados obtidos da aplicação da técnica PFL. Em placas da liga de alumínio 7075-T651 efetuam uma única passagem com a ferramenta, onde verificam uma melhoria significativa na superplasticidade e no refinamento do tamanho de grão.

Posteriormente, Mishra et al.[16] produz o primeiro compósito onde coloca uma mistura de partículas de reforço em metanol diretamente na superfície da liga de alumínio Al-5083. Após o solvente evaporar, realizam o processamento e verificam um aumento na microdureza máxima de *Vickers* de 85 HV do material base para 173 HV do material compósito.

Estes resultados são um passo importante para o fabrico de compósitos através da fricção linear despertando um interesse da parte dos investigadores em desenvolver tanto a técnica como a seleção do material de reforço.

A Tabela 2.3 descreve as vantagens a nível técnico, mecânico, ambiental e energético do PFL.

Tabela 2.3 – Vantagens da PFL [21]

Vantagens	
Metalúrgicas	Processo no estado sólido Baixa distorção Preservados elementos de liga Refinamento de grão e homogeneização da microestrutura Excelentes propriedades mecânicas da zona processada Possibilidade de processar matérias sensíveis à temperatura
Técnicas	Profundidade do processamento controlada pela altura do pino Bom controlo dimensional Repetibilidade Automatizável
Energéticas	Baixo consumo energético – Calor necessário é gerado pela fricção Maior eficiência em relação aos processos por fusão Permite redução no peso de componentes para as indústrias e consequente redução do consumo de combustíveis e aumento do desempenho
Ambientais	Não emite fumos Baixo ruído Não requer solventes para limpeza e desengorduramento prévio

2.4.1 – Parâmetros de processo

O processamento do material por fricção linear é influenciado por diversos parâmetros que determinam o calor gerado essencial para o processo. Temperatura insuficiente devido a velocidade de rotação e/ou força axial reduzida e velocidade de avanço elevada resulta na baixa consolidação do material e conseqüente redução na dureza e ductilidade. Por outro lado, temperatura excessiva devido ao inverso dos parâmetros referidos resulta na degradação das propriedades do material.

2.4.2 – Tipo e geometria da ferramenta

A configuração, altura do pino, o padrão e diâmetro do *shoulder* são as características de maior importância quanto ao fluxo de material, determinando a microestrutura e as propriedades finais do material processado.

A investigação foca-se na influência da geometria do pino na distribuição de partículas, tamanho de grão e dureza. Na Figura 2.4 pode observar-se alguns exemplos de pinos utilizados no PFL [22]. Os autores referem que, dos pinos indicados, a utilização da geometria quadrada produziu uma região processada sem defeitos, independentemente da velocidade utilizada, com os valores de dureza mais elevados e maior refinamento de grão na zona processada.

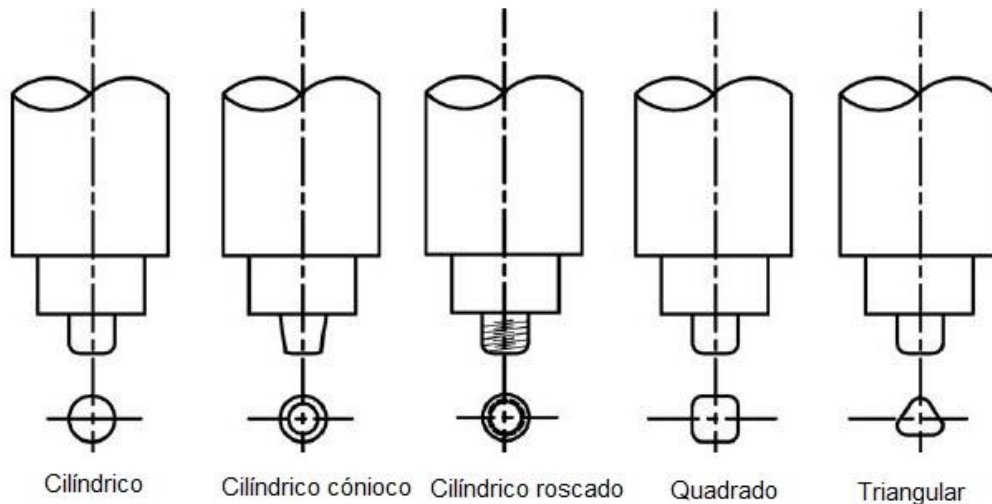


Figura 2.4 – Exemplos de geometrias de pino utilizadas no PFL [22].

Prakash et al. [23] verificou que se obtém distribuição máxima de tensão em pinos cônicos e mínima no caso dos pinos cilíndricos roscados.

O perfil do *shoulder* é igualmente importante uma vez que é responsável pelo aumento da temperatura devido à fricção com a superfície do material. Como pode ser observado na Figura 2.5, *shoulder* planos, com padrões, ranhuras ou círculos concêntricos, côncavos ou convexos são alguns exemplos de geometrias utilizadas.

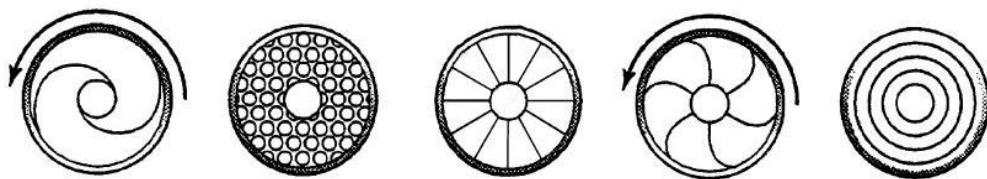


Figura 2.5 - Exemplos de geometrias do *shoulder* utilizados no PFL [23].

2.4.3– Velocidade de rotação, ω [rev/min] e de avanço, v [mm/min]

Estes parâmetros, quando combinados ou analisados individualmente, afetam diretamente a deformação plástica do material e conseqüentemente o calor gerado. Nos estudos efetuados, verifica-se que um rácio ω/v elevado origina uma área de zona processada maior e aumenta a deformação plástica e conseqüentemente a recristalização do tamanho de grão.

Mahmoud et al. [24] estudaram a influência da velocidade de rotação da ferramenta com diferentes geometrias de pino no processamento da liga de alumínio AA1050-H24 com adição de partículas de reforço de carboneto de silício. Observa-se pela Figura 2.6 que velocidade de rotação afeta a homogeneidade, a distribuição das partículas no *nugget* e a sua geometria.

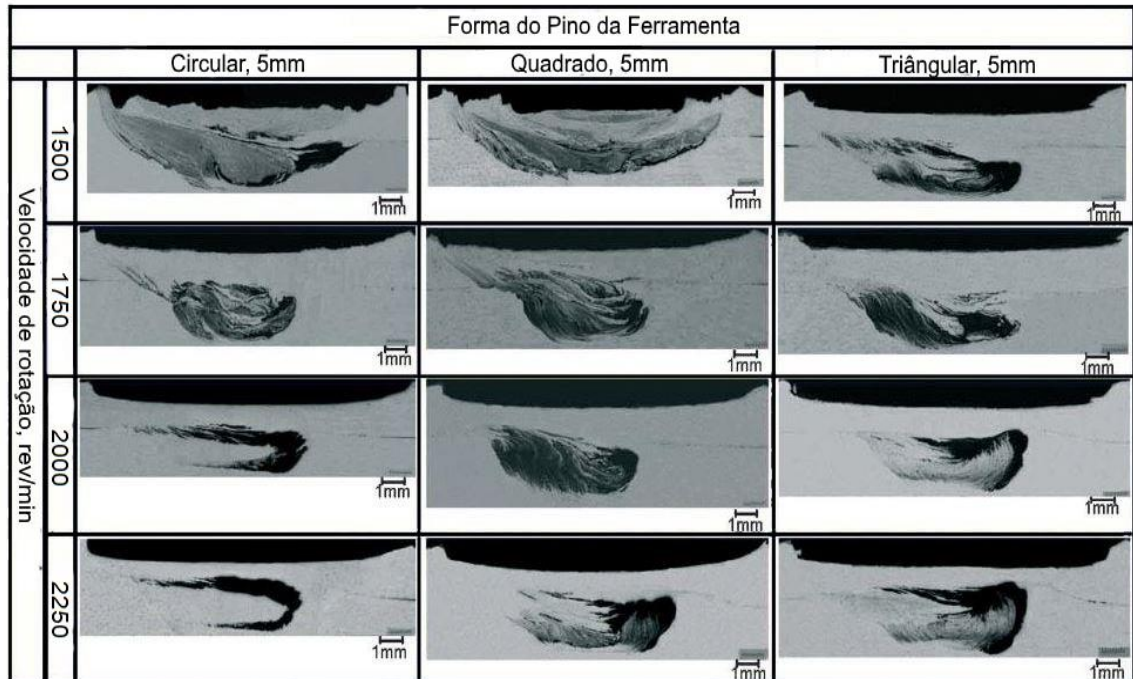


Figura 2.6 – Macrografias da secção do *nugget* resultante do PFL com diferentes geometrias e velocidade de rotação - [24].

2.4.4 – Ângulo de ataque [°]

Ângulo entre o eixo da ferramenta e a superfície do substrato. A escolha apropriada deste ângulo permite ao *shoulder* mover o material de forma mais eficiente. Estudos apontam para a utilização de um ângulo entre dois e quatro graus no sentido da velocidade de avanço[25].

2.4.5– Força axial ou de forjamento

Este parâmetro afeta a fricção entre o *shoulder* e a superfície do substrato em deformação plástica e garante que estes se mantenham em contacto permanente. Força axial elevada gera calor excessivo e pressão de forjamento promovendo um crescimento de grão grosseiro, caso contrário, baixa força axial leva a fraca consolidação do material.

2.4.6– Penetração da ferramenta

A altura do pino é definida conforme se pretenda realizar o processamento da superfície ou em volume do material.

2.4.7– Número de passagens

De forma a obter uma área maior de zona processada são realizadas múltiplas passagens. Define-se o rácio da sobreposição de passagens pela equação 2.1[19],

$$RS = 1 - \left[\frac{l}{d_{pino}} \right] \quad (2.1)$$

Onde a distância l [mm] corresponde à distância entre o centro do pino em cada passagem e o diâmetro d_{pino} [mm] corresponde ao diâmetro máximo do pino. $0 < RS \leq 1$ significa total sobreposição entre passagens e $RS = 0$ não existe sobreposição.

No caso das ligas de alumínio, os autores Nascimento, et Al. [19] verificam que, no alumínio AA5083-O foram necessária 3 passagens no mesmo local enquanto que no AA7022-T6 apenas uma para obter uma área processada homogénea, uma vez que esta última possui tratamento térmico. Observam também uma redução do tamanho de grão de 160 μm para 7,1 μm para a liga da série 7000 e de 106 μm para 5,9 μm na série 5000.

A direção na qual se efetua a sobreposição é também um fator que influencia as características da superfície do material processado. Gandra et Al. [26]

observam que efetuar a sobreposição para o lado do retrocesso (LR) produziu superfícies menos rugosas na liga AA5083, enquanto que para o lado de avanço (LA) origina uma distribuição mais uniforme da espessura da camada processada. Isto permite concluir que quando se pretende aumentar a profundidade da zona processada através de múltiplas passagens, a sobreposição deve ser feita do lado de avanço em relação ao passo anterior, Figura 2.7 a). Caso se pretenda um melhor acabamento superficial evitando processos posteriores, a sobreposição deve ser realizada do lado de retrocesso, Figura 2.7 b).

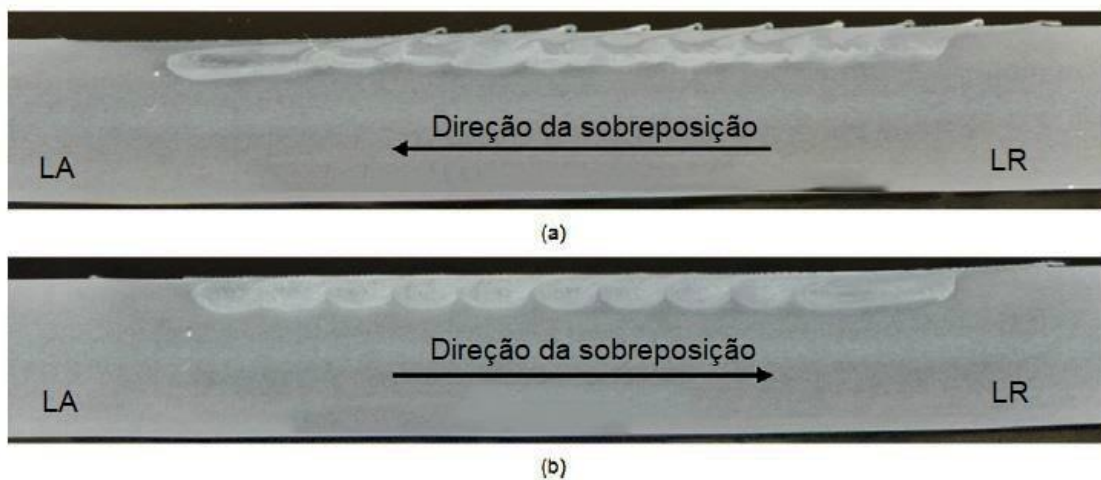


Figura 2.7 – Macrografias de secções de superfícies processadas por fricção linear com sobreposição pelo lado de avanço (a) e lado de retrocesso (b) [26].

2.5– Produção de compósitos

2.5.1 – Métodos de reforço

Alguns métodos de reforço são estudados onde se verifica que é prática comum a mistura das partículas, vulgarmente micro ou nanométricas, numa pequena quantidade de solvente volátil como o metanol, formando uma pasta. Esta técnica permite criar uma camada de partículas de espessura fina na superfície do material base [27].

Tipicamente, essa mistura é também colocada em placas ou chapas previamente maquinadas, onde é aberto um rasgo no material base com as

dimensões necessárias correspondentes ao volume de partículas que se pretende adicionar[1], [7], [28–30].

Na Figura 2.8 é possível observar que geralmente é realizada uma primeira passagem superficial com uma ferramenta sem pino para fechar o rasgo e impedir a expulsão das partículas no PFL. A segunda passagem é feita com o pino para distribuir as partículas no material base.

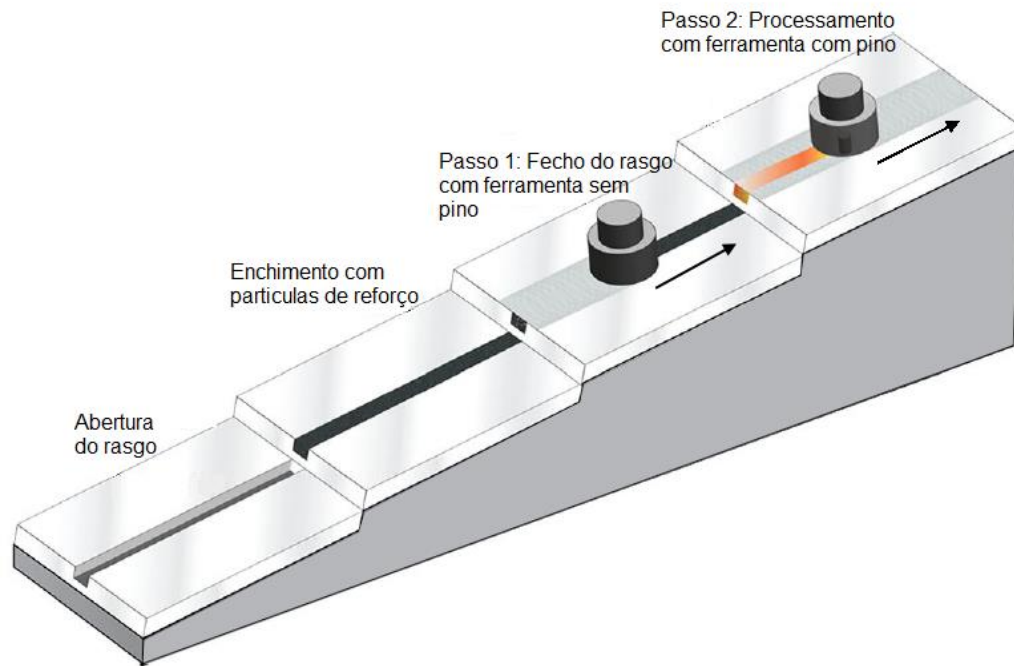


Figura 2.8 – PFL com técnica de rasgo para adição de partículas – adaptado de [1]

Outro método utilizado, onde à semelhança dos rasgos é realizada uma passagem prévia sem pino, consiste na abertura de pequenos furos (Figura 2.9). Esta variação permite obter uma distribuição uniforme das partículas numa maior área na superfície das chapas [1], [31–34].

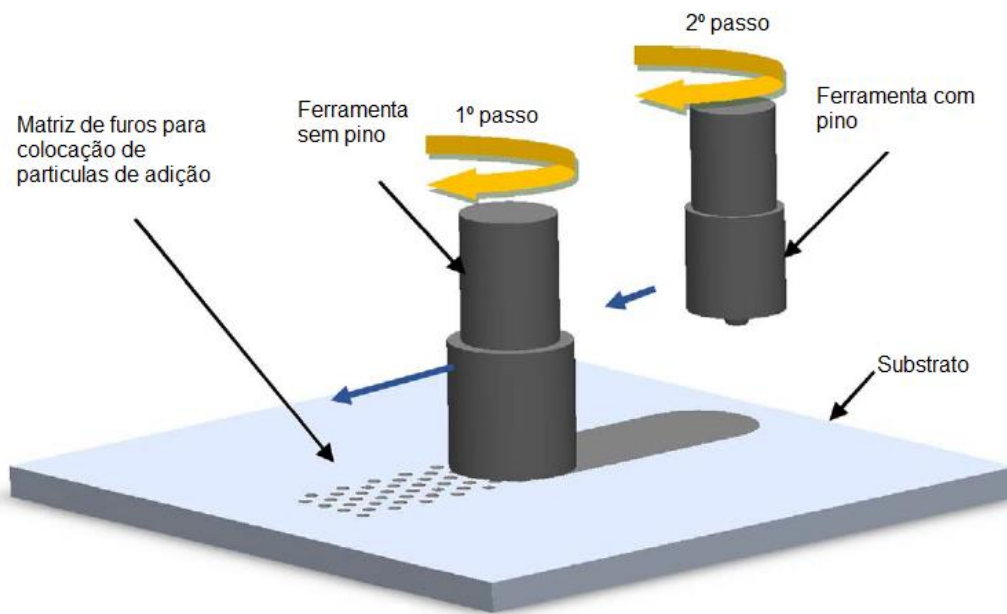


Figura 2.9 – PFL com técnica de furos para adição de partículas – adaptado de [33]

A utilização destes métodos sugerem ser uma prática intrusiva onde, no primeiro passo sem pino, o contacto direto do *shoulder* com as partículas pode resultar na fragmentação das mesmas, originando a redução das suas dimensões, enquanto parte destas podem ser expelidas dos respetivos furos ou rasgos. Por este motivo, é necessário procurar alternativas que permitam ultrapassar este inconveniente.

2.5.2 – Materiais de reforço

Apesar de existir um largo campo de materiais disponíveis, partículas de cerâmica de carboneto de silício (SiC) e alumina (Al₂O₃) são utilizadas frequentemente. Esta escolha deve-se principalmente ao facto de conferir melhorias ao nível de dureza e resistência ao desgaste quando adicionadas e processadas no material base. A adição das partículas retarda a taxa de crescimento de grão na recristalização dinâmica devido ao efeito de fixação originando maior refinamento de grão comparativamente ao processo sem reforço.

2.5.2.1 - Carboneto de Silício (SiC)

O carboneto de silício é o terceiro material mais duro, ficando apenas abaixo do diamante e do nitreto de boro, o que garante ao material excelentes propriedades, tais como estabilidade a alta temperatura e impermeabilidade a ataques químicos. Além disso é biocompatível, o que permite a sua aplicação na área da biomedicina.

Como referido anteriormente, Mishra et al. [16] observam que, a adição de partículas de SiC com 0,7 μm de dimensões médias resulta num aumento da dureza da liga de alumínio 5083 de aproximadamente o dobro do seu valor. Na Figura 2.10 pode observar-se a obtenção de uma distribuição uniforme das partículas na matriz de alumínio

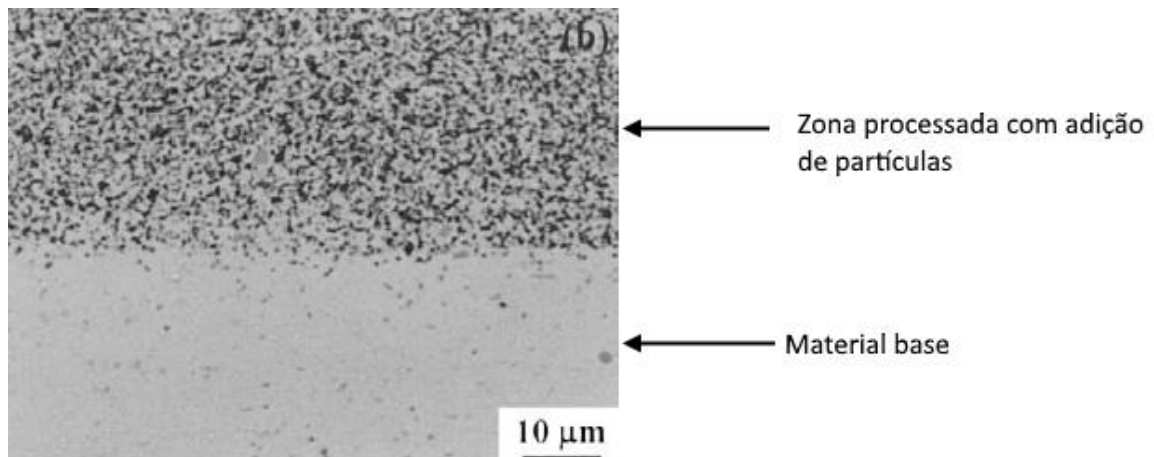


Figura 2.10 – Micrografia ótica da distribuição de partículas na matriz de alumínio - [16]

Dolatkah et al. [35] verificam que a adição de partículas SiC nanométricas intensifica o refinamento de grão comparativamente ao processamento sem o material de reforço. O PFL na liga AA 5052 transformou o tamanho de grão inicial de 243 μm para uma microestrutura ultrafina de 0,9 μm (Figura 2.11), acompanhada de uma redução da taxa de desgaste de cerca de 9,7 vezes e aumento da microdureza da liga de 55%.

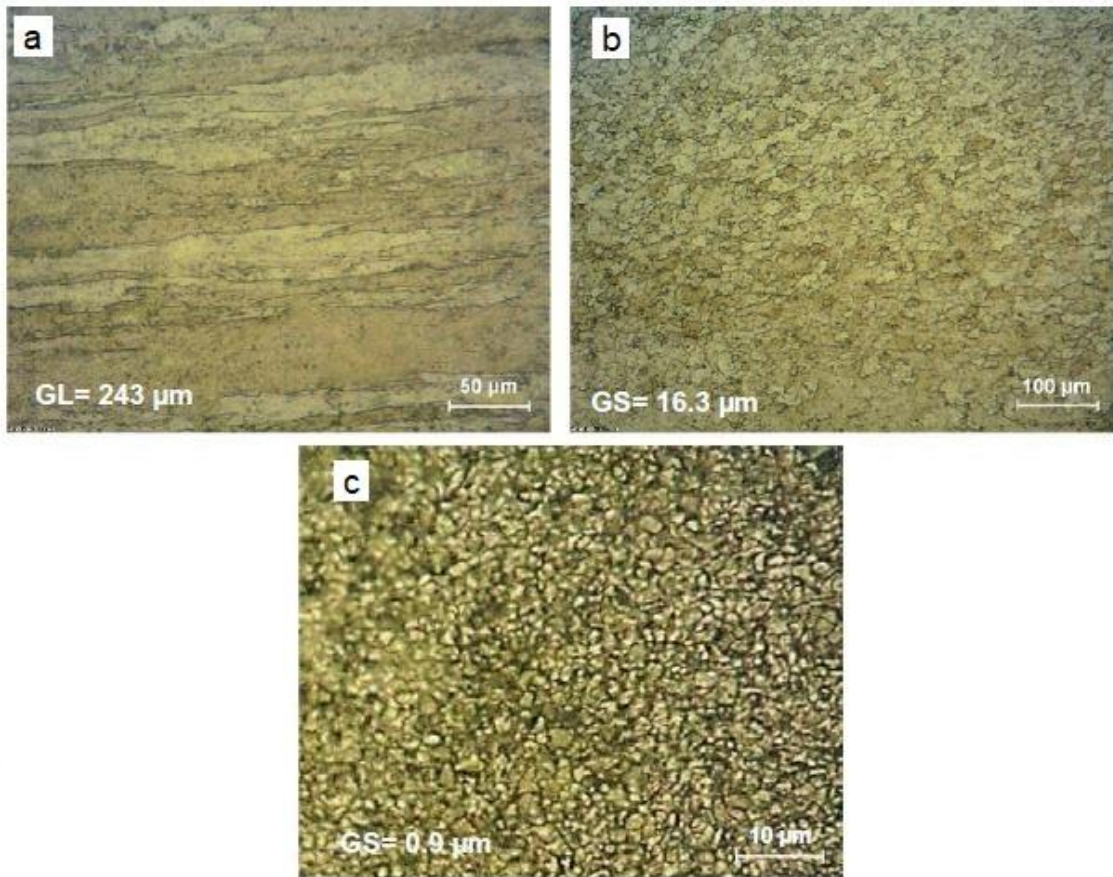


Figura 2.11 – Microestrutura do a) material base, b) material processado sem adição de partículas, c) material processado com adição de SiC

2.5.2.2– Alumina (Al_2O_3)

Zarghani et al. [36] mostram que a adição de partículas de alumina com 50 nm num rasgo na liga de alumínio 6082 aumentou aproximadamente três vezes o valor da micro dureza superficial do material base.

Os mesmos autores mostram também as diferenças obtidas quando o ensaio é realizado com uma ou múltiplas passagens.

Através das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varrimento (Figura 2.12), os autores verificam que, após uma passagem, as partículas surgem agregadas em algumas regiões. Na Figura 2.12 a) pode observar-se regiões escuras correspondentes a aglomerados de partículas e a branco precipitados da liga de alumínio dispersados na matriz. Verifica-se também na Figura 2.12 c) e d) que, o aumento do número de passagens promove a redução dos

aglomerados de partículas aumentando, a uniformidade da dispersão das mesmas. O tamanho de grão é igualmente afetado, sendo que o aumento do número de passagem promove o refinamento, reduzindo as suas dimensões.

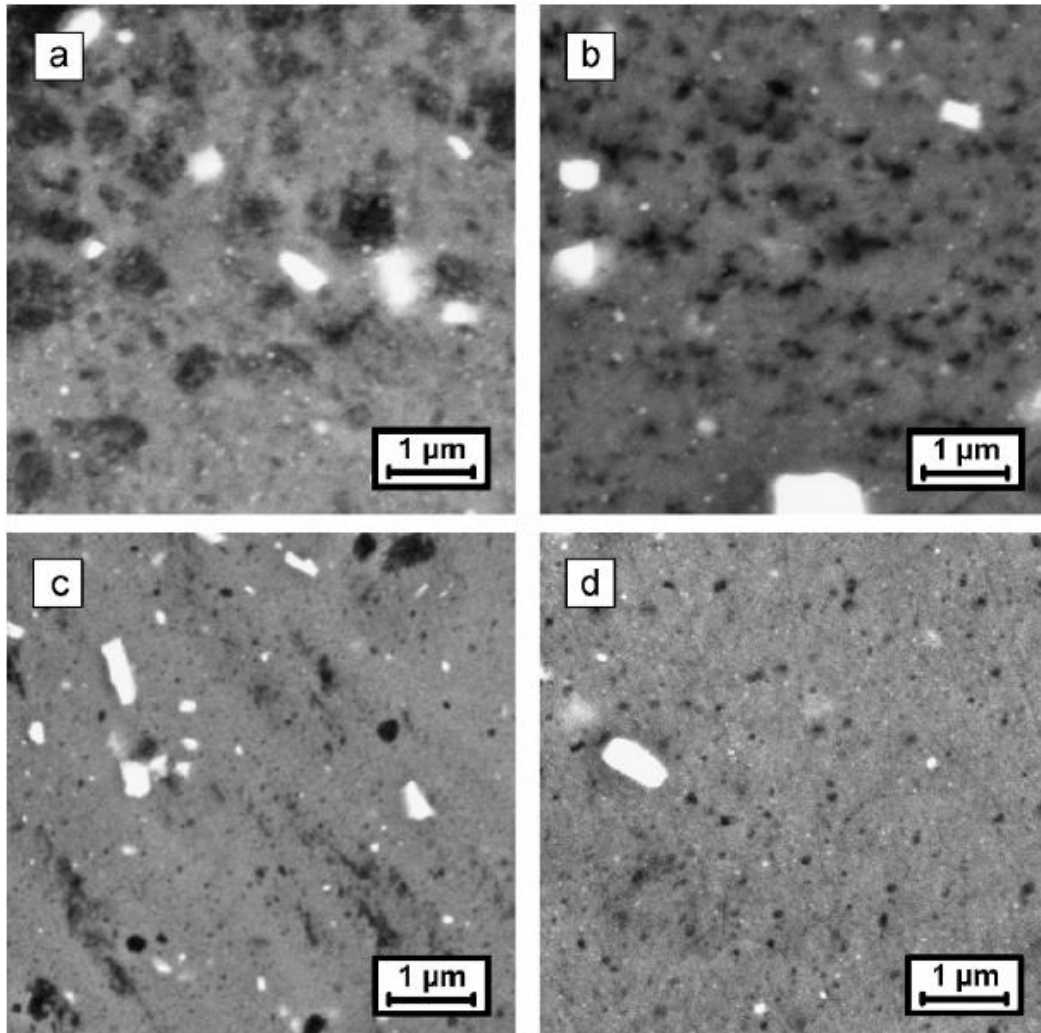


Figura 2.12 – Microscopias eletrônica de varrimento de PFS com a) uma, b) duas, c) três e d) quatro passagens

2.6– Síntese do Capítulo

O processamento por fricção linear é uma tecnologia atrativa para o processamento de materiais e produção de compósitos no estado sólido. Vários autores reportam obter sucesso em melhorar as propriedades do material base tais como dureza, resistência ao desgaste e resistência à corrosão. Logo, o PFL

é adequado para reforçar materiais como o alumínio e o magnésio ampliando a gama de aplicações destes materiais nas várias indústrias.

No entanto, alguma investigação deve ser realizada para otimizar os métodos de reforço com a adição de partículas, onde possa ser evitado o contato direto do *shoulder* com as partículas e se obtenha uma distribuição uniforme das mesmas em toda a área do substrato processado.

3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – Introdução

Neste capítulo é descrito o trabalho experimental realizado para a avaliação da viabilidade da técnica utilizada para o processamento do material. São apresentados os diferentes parâmetros dos ensaios experimentais, os materiais base e as partículas de adição utilizadas. São também apresentados os equipamentos utilizados para o processamento do material bem como o equipamento para a análise posterior.

3.2 – Caracterização dos materiais

Os materiais base utilizados neste estudo foram duas ligas de alumínio, AA6082-T6 e AA7075-T651 e uma liga de magnésio, AZ31, em forma de chapa, com dimensões 203 x 103 mm. No alumínio, as espessuras utilizadas foram de 3, 6 e 10 mm e no magnésio 4 mm. As suas composições químicas e propriedades são descritas nas tabelas 3.1 a 3.3.

Tabela 3.1- Composição química das ligas de alumínio [37], [38].

Composição Química (%)										
Liga	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Outros (Total)
AA6082-T6	95,2-98,3	<= 0,25	<=0,10	<=0,50	0,60-1,2	0,4-1,0	0,7-1,3	<=0,10	<=0,20	<=0,15
AA7075-T651	87,1-91,4	0,18-0,28	1,2-2,0	<=0,50	2,1-2,9	<=0,30	<=0,40	<=0,20	5,1-6,1	<=0,15

Tabela 3.2 – Composição química da liga de magnésio AZ31 [39].

Composição Química (%)										
Liga	Al	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ni	Zn	Outros (Total)
AZ31	2,5-3,5	<=0,04	<=0,05	<=0,005	96,0	>=0,2	<=0,005	<=0,005	0,60-1,40	-

Tabela 3.3 – Propriedades das ligas [37]–[39].

Liga	Densidade (g.cm ⁻³)	Tensão cedência (MPa)	Tensão rotura (MPa)	Dureza Vickers (Hv)
AA6082-T6	2,70	250	290	95
AA7075-T651	2,81	462	538	175
AZ31	1,77	190	275	82

Estes materiais são caracterizados por serem dúcteis, facilitando o fluxo viscoplástico durante o processamento e provocam menor desgaste na ferramenta. Além disso, o magnésio permite efetuar o estudo a viabilidade de aplicação de hidroxiapatite para fins biomédicos.

Como material de reforço foram utilizadas partículas de Al₂O₃ com 99,9% de pureza de dimensões médias de 45 µm, SiC com 7 µm de dimensão média e 99,5% de pureza e fosfato de cálcio Ca₃(PO₄)₂ de dimensões micrométricas.

3.3– Equipamento utilizado

Os ensaios de processamento por fricção linear desta investigação foram realizados numa fresadora convencional (Figura 3.1) existente no Laboratório de Processos Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT-NOVA.



Figura 3.1 – Fresadora no DEMI e equipamento de aquisição de dados

A ferramenta selecionada possui um *shoulder* côncavo com diâmetro de 19 mm e o pino de geometria cônica, com diâmetro médio de 6 mm, rosca esquerda e ranhuras, semelhante à ferramenta *Triflute* desenvolvida pelo TWI referida anteriormente.

Como se pode observar pela Figura 3.2, devido à conicidade do pino, o diâmetro máximo deste varia conforme a altura utilizada para os diferentes ensaios. Esta altura é definida consoante a espessura das chapas, garantido que o pino penetra até ao substrato inferior.

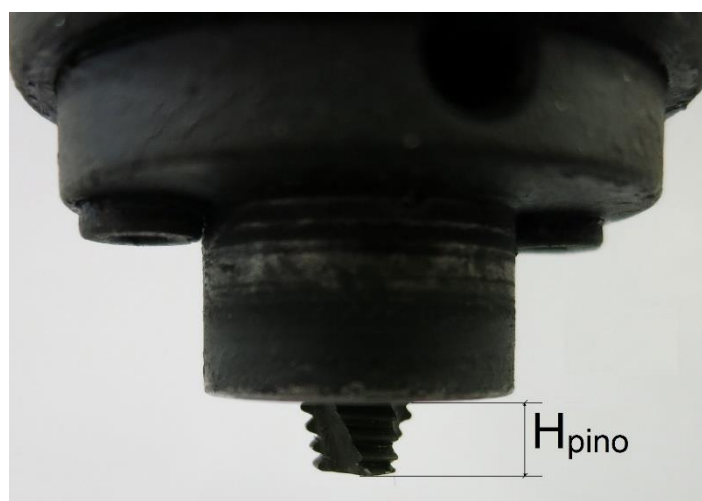


Figura 3.2 - Ferramenta de PFL utilizada nos ensaios experimentais

As chapas são furadas em quatro pontos de forma a serem colocadas e aparafusadas numa base instrumentada construída para os ensaios. Esta base é construída em *Teflon* e com uma placa de suporte traseira em aço ck45. Esta configuração permite, com recurso a termopares, obter valores das temperaturas envolvidas no processo para posterior análise da eficiência energética do processo. Adicionalmente, esta base assenta sobre um rolamento axial que permite a sua rotação provocada pela ferramenta durante o PFL e, em contacto com uma célula de carga, obtém se a leitura das forças envolvidas no processo (Figura 3.3).

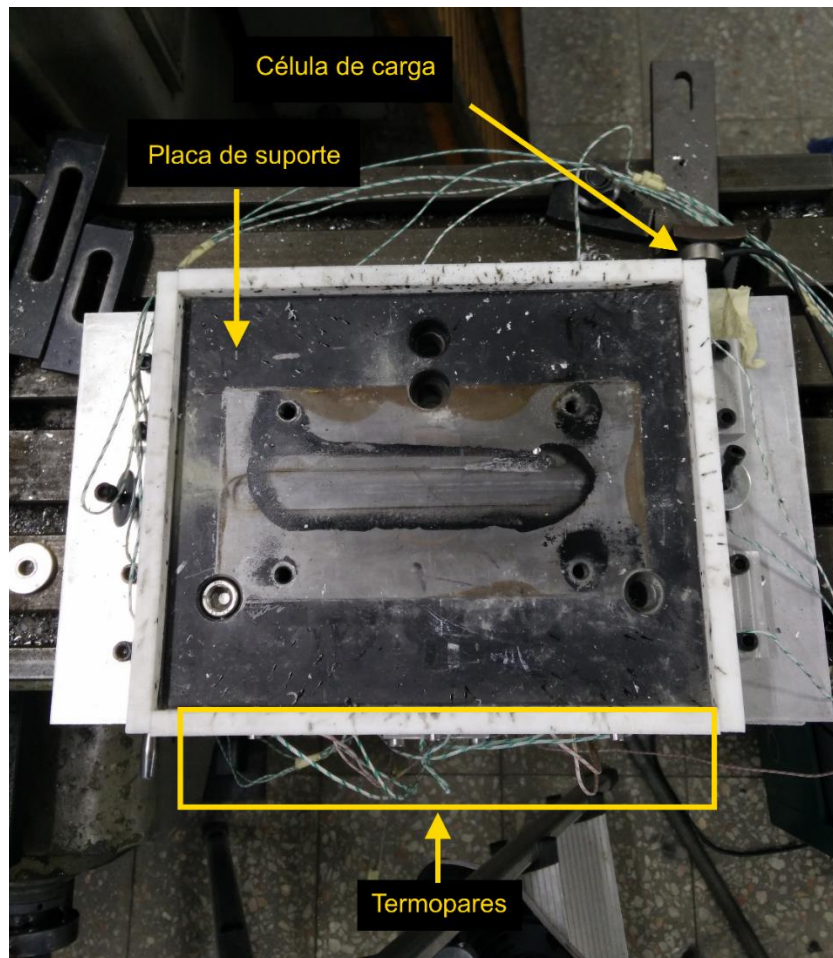


Figura 3.3 – Base instrumentada para colocação de chapas para PFL

Com recurso a uma câmara termográfica Fluke Ti400 é possível obter as temperaturas envolvidas no processo.

3.4- Métodos de reforço

3.4.1 – Método convencional com rasgo longitudinal

Com o objetivo de desenvolver uma nova técnica de adição de partículas de reforço ao material base, é realizado um primeiro ensaio com base na pesquisa bibliográfica dos métodos atuais.

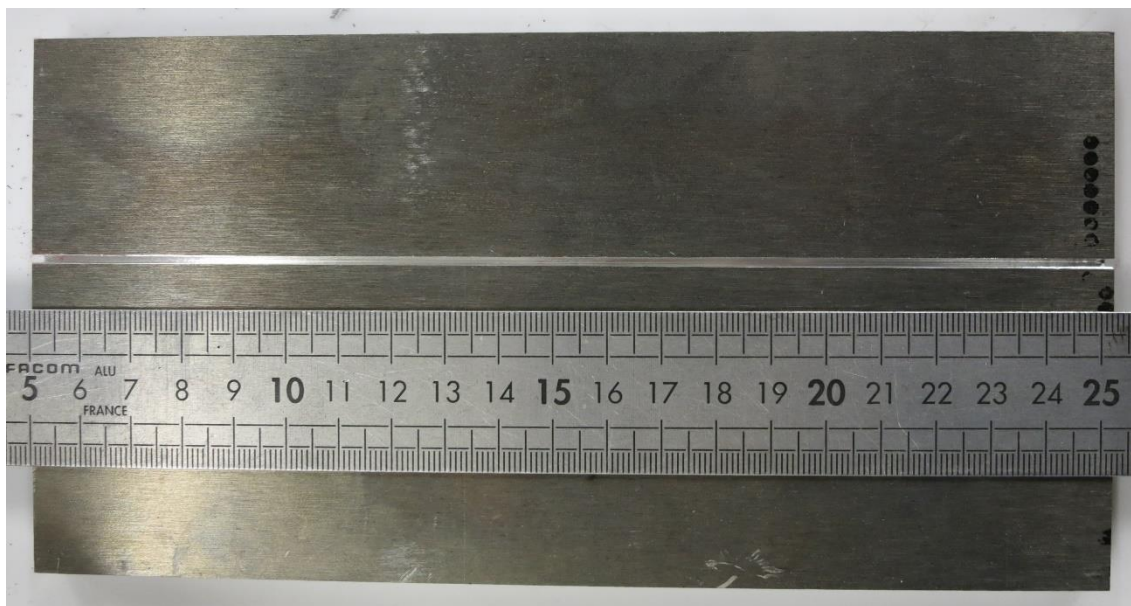


Figura 3.4 – Rasgo de 2 mm de largura ao longo do comprimento da chapa de AA7075

Este método consiste em maquinar um rasgo com 2 mm de largura e 4 mm de profundidade ao longo de uma chapa de AA7075, onde é colocado o material de reforço.

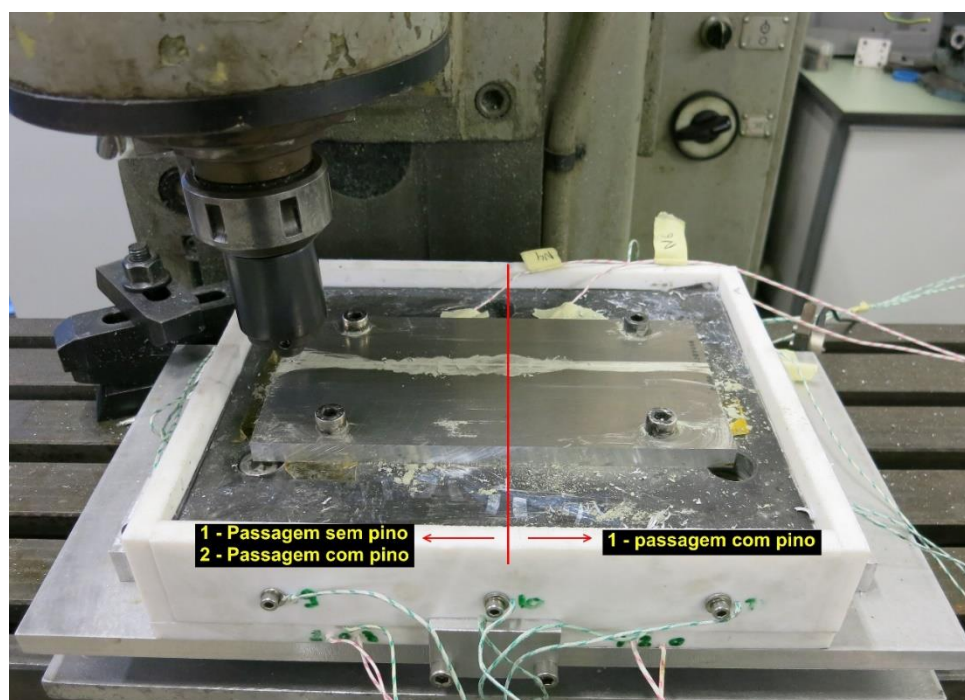


Figura 3.5 – PFL em AA7075 com adição de material de reforço num rasgo

Após adicionar as partículas, uma primeira passagem foi realizada apenas com o *shoulder* da ferramenta, até aproximadamente metade do comprimento da chapa, para fechar o rasgo. A outra metade permanece inalterada (Figura 3.5).

O processamento com a ferramenta com o pino foi realizado em 3 secções distintas na mesma chapa:

- A ferramenta em rotação no sentido horário na zona fechada do rasgo;
- Em rotação horária na zona aberta do rasgo;
- No sentido anti-horário na zona aberta do rasgo.

Com a variação do sentido de rotação da ferramenta pretende-se verificar a diferença da distribuição das partículas, sendo que o movimento no sentido horário promove o fluxo de material para o interior da chapa e o sentido anti-horário para a superfície da mesma.

Esta abordagem, já usada por outros autores, serve como base de comparação para o desenvolvimento do novo método.

3.4.2 – Método de espaçador entre chapas para efeito de *Sandwich*

A nova abordagem para evitar o contato direto do *shoulder* com as partículas consiste em criar o efeito de *sandwich*. Um espaçador é colocado entre duas chapas com uma área para a colocação das partículas.

Na Figura 3.6 pode observar-se o esquema da montagem usada, na qual, sobre o substrato inferior do material base é colocado o espaçador com a dimensões pretendidas, correspondente ao volume de partículas que se pretende adicionar. Neste estudo, para garantir que o espaçador não é destruído, e para evitar a dispersão do material de reforço, utilizou-se fita *Kapton* em poliamida, que suporta temperaturas até 400 °C. Esta fita é colocada em camadas sobrepostas até perfazer a espessura pretendia.

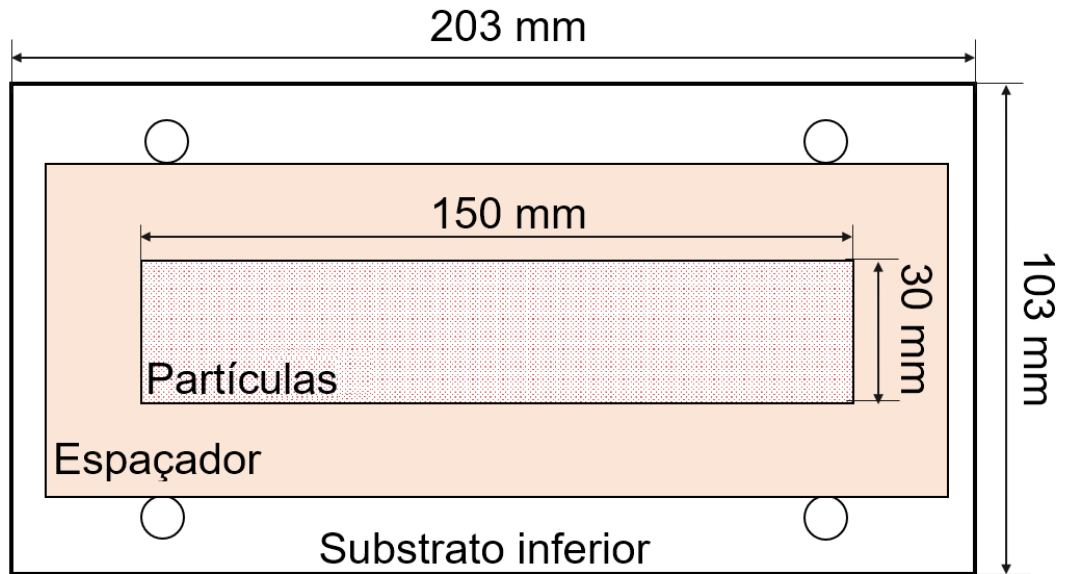


Figura 3.6 – Substrato inferior com espaçador para colocação de partículas de reforço

A Figura 3.7 ilustra o substrato inferior com o espaçador disposto de forma a criar duas áreas disponíveis para o PFL.

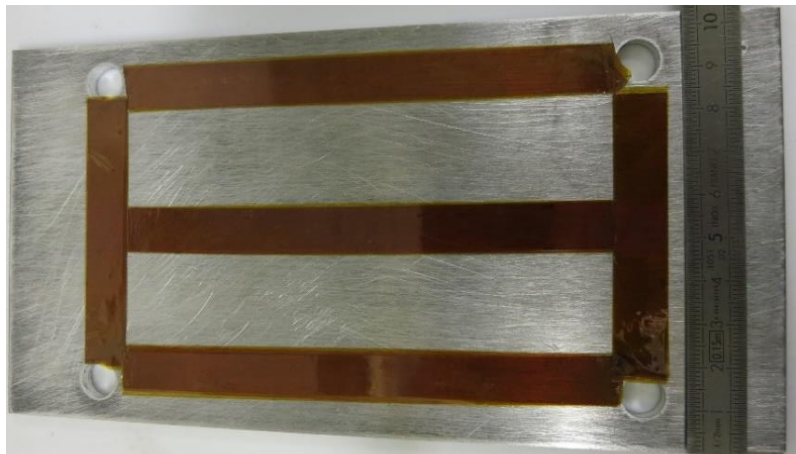


Figura 3.7 – Disposição do espaçador

Nessas áreas são colocadas e compactadas as partículas do material de reforço (Figura 3.8) e, sobre ele, é colocado o substrato superior do material a ser processado. Este sistema (Figura 3.9) é aparafusado na base anteriormente descrita.



Figura 3.8 – Adição do material de reforço no substrato inferior

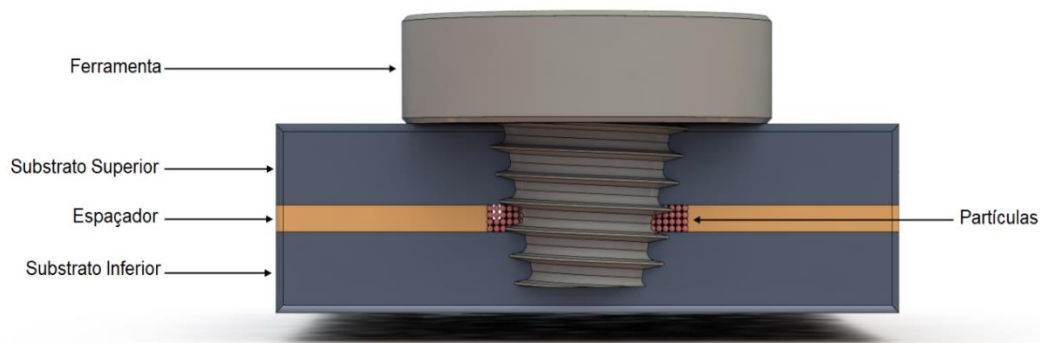


Figura 3.9 – Esquema do método de *Sandwich*

A ferramenta é colocada em rotação no sentido anti-horário que, associada a rosca esquerda, promove um fluxo de material ascendente, incorporando as partículas de reforço na chapa superior. Com esta abordagem pretende-se obter uma mistura material base-partículas mais uniforme em toda a espessura do substrato superior.

Uma variação do método de *sandwich* consiste em substituir o espaçador por uma caixa fresada com 10 mm de largura e 2 mm de profundidade no substrato inferior.

Neste caso, o pino penetra a chapa superior e atinge a caixa contendo o material de reforço, que através da rotação da ferramenta, é incorporado no substrato superior.

3.5– Parâmetros dos ensaios experimentais

A velocidade de avanço, v [mm/min], a velocidade de rotação, ω [rev/min] e a inclinação da cabeça da fresadora foram constantes para todos os ensaios com valores 180 mm/min, 900 rev/min e 2° , respectivamente. Uma vez que o objetivo desta dissertação é incorporar o material de reforço no substrato superior, os ensaios são realizados com a ferramenta em rotação no sentido anti-horário. No entanto, ensaios com rotação no sentido horário são realizados para efeitos de comparação.

A espessura do espaçador foi igual para todos os ensaios com 0,5 mm. Tendo em conta esta medida e a espessura dos substratos utilizados, a altura do pino (H_{pino}) é definida de forma a que este penetre até ao substrato inferior (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Altura do pino usada [mm] para cada ensaio experimental

Ensaio	H_{pino} (mm) usada
Caixa fresada	4,3
Substrato de magnésio	7
Restantes	5

Para perceber a influência do número de passagens e da direção de avanço entre elas, ensaios com passagem simples e múltiplas passagens foram realizadas, com variação da sobreposição entre o lado de avanço e o lado de retrocesso.

3.6– Análise metalográfica

Para avaliar a modificação realizada na microestrutura e da distribuição das partículas de reforço, foram realizadas análises metalográficas no Laboratório de

Caracterização de Materiais do DEMI. Para tal, são cortadas amostras das chapas do material processado.

Foi aplicado o procedimento padrão nas amostras, ou seja, foram embutidas em resina *epoxy* com endurecedor, polidas em lixas de carboneto de silício com diferentes granulometrias (da lixa mais grosseira-80P até a mais fina-2500P) e um polimento final com um pano *Microfloc* e alumina 1 μm até obter a superfície espelhada sem riscos visíveis com observação microscópica. O equipamento de polimento utilizado foi a polidora automática *Buehler AutoMet 250* e manual *Buehler Phoenix Alpha*.

Para revelar o tamanho de grão foi utilizado reagente de *Keller* 5,0 ml HF, 20 ml HNO₃, 20 ml HCl e 60 ml H₂O nas ligas de alumínio e um reagente para a liga de magnésio composto por 1 ml de ácido acético, 50 ml H₂O e 150 ml álcool etílico. As amostras são mergulhadas nos respetivos reagentes, num período de 3 a 6 segundos no caso do alumínio e entre 120 e 180 segundos para o magnésio.

A observação microscópica foi realizada no microscópio *Olympus CX40*, com uma câmara DP21 e fonte TH3 da mesma marca e no microscópio *Leica DMI5000 M* disponível no CENIMAT-I3N - Centro de Investigação de Materiais.

4 - ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente do processamento e reforço de materiais, tendo em conta o método de adição das partículas no material base, o sentido da rotação da ferramenta e a direção de avanço nos ensaios com passagens múltiplas.

Realiza-se uma análise a nível macro e microscópico para avaliar as modificações efetuadas nos materiais, a presença do material de reforço e a sua distribuição no material.

4.2 - PFL com material de reforço – método com rasgo longitudinal

A análise macroscópica ao material processado (Figura 4.1) permite verificar que se obtém uma superfície menos rugosa quando é efetuado um passo prévio para fechar o rasgo (amostras marcadas com a letra F) com o *shoulder* da ferramenta. As amostras com a letra A correspondem ao processamento com o rasgo aberto, isto é, sem a passagem prévia do *shoulder*.

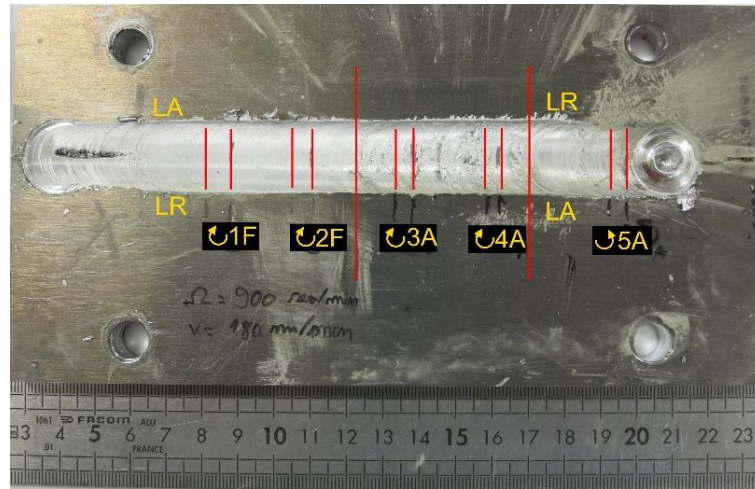


Figura 4.1 – Resultado do ensaio do método do rasgo longitudinal

Na Figura 4.1 é possível observar que na zona da amostra 5A, a mudança do sentido de rotação da ferramenta produziu melhor acabamento superficial e menor quantidade de rebarba, comparativamente a zona das amostras 3 e 4A.

A Figura 4.2 ilustra as secções transversais das amostras cortadas do material processado. As amostras 1F e 2F apresentam uma mistura de material predominante junto a base do pino, enquanto que se verifica uma maior uniformidade na distribuição das partículas na amostra 5A, desde a altura máxima do pino até a superfície. Assim, não é necessário realizar uma operação de desbaste na superfície do material até atingir a área processada. No entanto, verifica-se o aparecimento de um vazio, no lado de avanço (LA), devido ao movimento ascendente do fluxo de material.

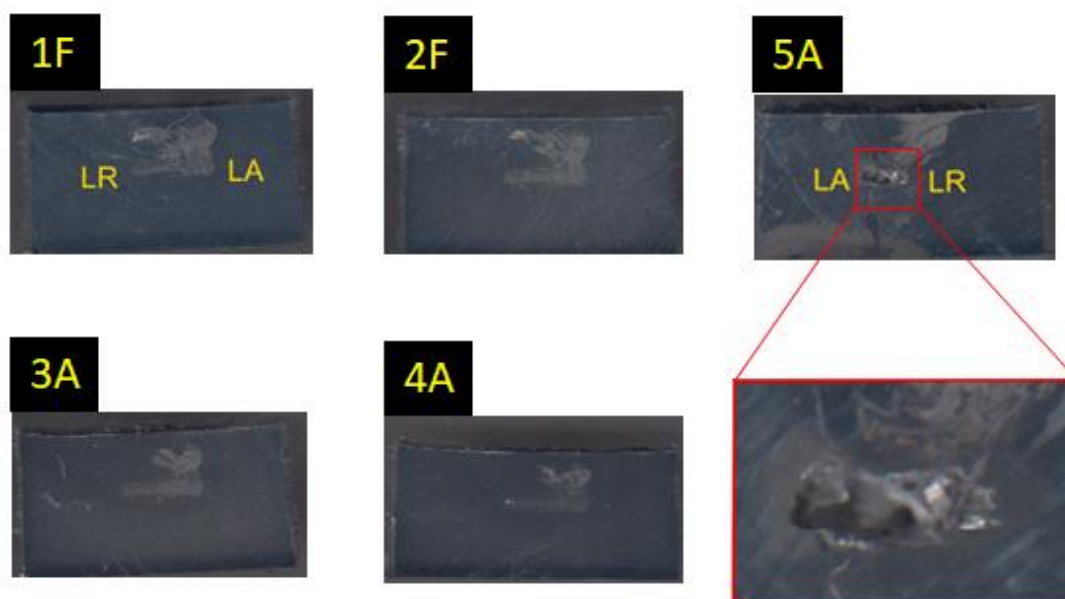


Figura 4.2 – Macrografias do ensaio do método do rasgo

4.3 - Método *sandwich*

4.3.1 – PFL sem material de reforço

De acordo com os parâmetros do procedimento experimental, é realizado um ensaio com 6 passagens com avanço lateral de 1,5 mm entre passagens no sentido do lado de avanço (LA), no material base AA7075 sem adição de material de reforço.

4.3.1.1 – Análise macrográfica

A caracterização macrográfica do cordão mostra que a superfície apresenta rugosidade reduzida e a existência de alguma rebarba na zona processada (Figura 4.3). Este ensaio teve como objetivo a comparação da microestrutura do material processado com e sem partículas de reforço



Figura 4.3 – Resultado do ensaio do material base processado

4.3.1.2 – Análise micrográfica

Amostras das secções transversais são atacadas quimicamente com o reagente de *Keller* para a observação da microestrutura.

Verifica-se com a observação microscópica da Figura 4.4 que ocorreu uma redução do tamanho de grão do material de 40-50 μm para 6-8 μm após 6 passagens.

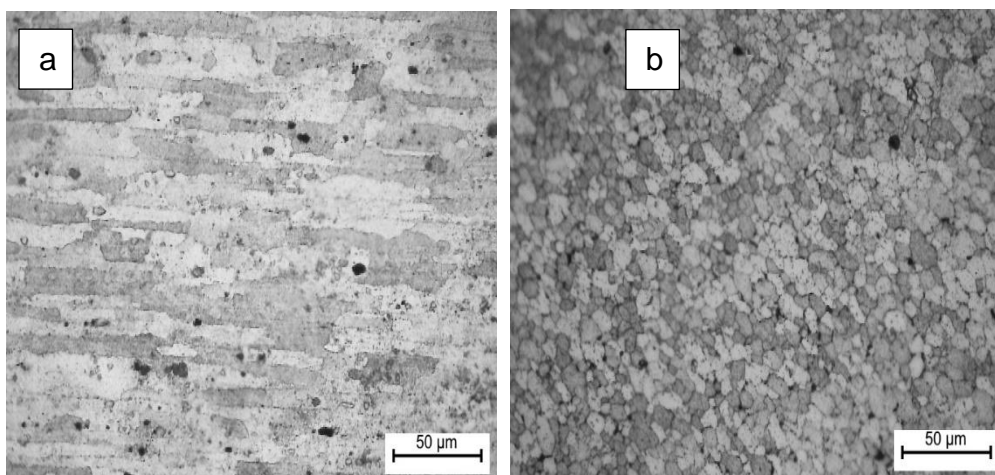


Figura 4.4 – Microestrutura do material a) antes e b) depois do processamento

Na mesma amostra, observa-se na Figura 4.5 que do no LA surge o defeito de vazio de material, um defeito típico do processamento no estado sólido resultante da deformação ineficiente do material devido a reduzida força axial e fricção insuficientes.

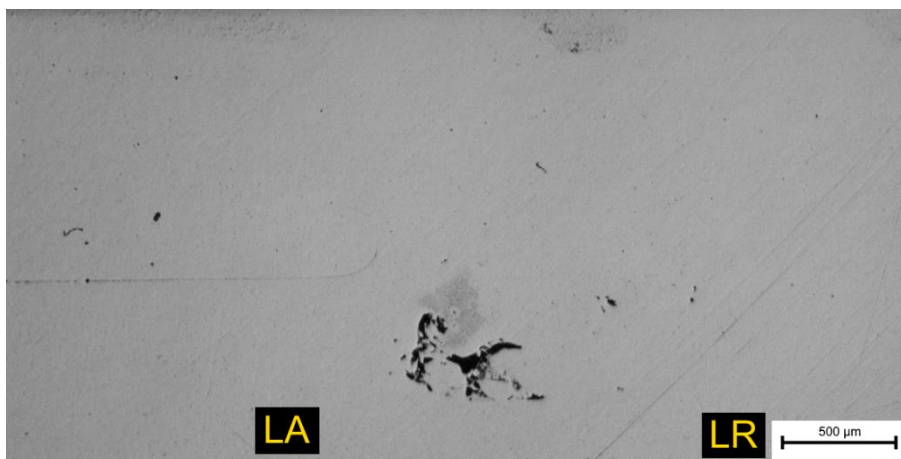










Figura 4.5 – Macrografia do defeito da amostra do ensaio do material base

4.3.2- PFL com material de reforço

Na Tabela 4.1 resume-se os resultados adquiridos dos ensaios realizados com adição de material de reforço, nas ligas de alumínio e magnésio, com passagens simples e múltiplas com sobreposição lateral para o lado de avanço e rotação da ferramenta no sentido horário e anti-horário. A análise destes resultados é realizada nos subcapítulos seguintes.

Tabela 4.1 – Macrografias das amostras processadas com adição de material de reforço

		Sentido Anti-horário / Fluxo Ascendente	
AA6082-T6 (Substrato) Al_2O_3 (Partículas)	E1 – 1 passagem		E2 – 8 passagens
	E3 – 3 passagens Caixa fresada		
AZ31 (Substrato) $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Partículas)	E4 – 1 passagem		E4 – 4 passagens
			
AA7075-T651 (Substrato) SiC (Partículas)	E5 – 1 passagem		E5 - 4 passagens
			
		Sentido horário / Fluxo descendente	
AA7075-T651 (Substrato) SiC (Partículas)	E6 – 1 passagem		E6 – 4 passagens
			

4.3.2.1 – Processamento da liga AA6802 com partículas de alumina

Na Figura 4.6 pode observar-se os vários provetes processados com reforço de alumina no material base AA6082 com:

- Duas passagens não sobrepostas com espaçador entre chapas (Figura 4.6-a)
- Oito passagens sobrepostas avançando lateralmente 1 mm entre cada passagem para o lado de avanço, com espaçador entre chapas (Figura 4.6-b)
- Três passagens com sobreposição total e o material de reforço colocado numa caixa fresada com 10 mm de largura (Figura 4.6-c).

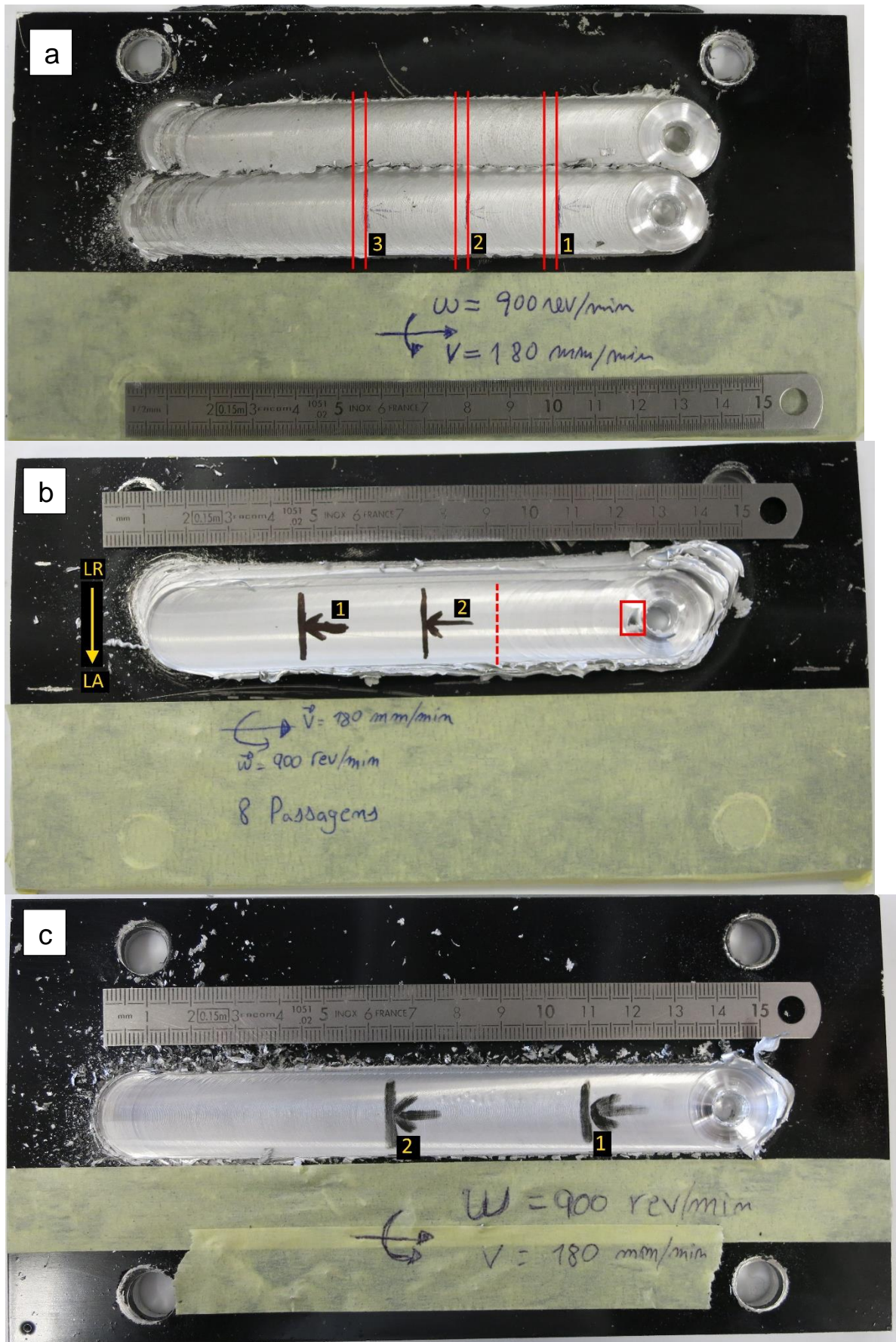


Figura 4.6 – Resultados dos ensaios a) E1, b) E2 e c) E3

Verifica-se que o aumento do número de passagens origina menor rugosidade superficial, eliminando a necessidade de realizar processos de acabamento na zona processada. No entanto, ao fim das 8 passagens, pode observar-se na Figura 4.6-b) uma zona com maior ondulação superficial (à direita do tracejado) e um pequeno defeito junto ao ponto de saída do pino.

A Figura 4.7 ilustra a observação macroscópica da secção transversal da amostra 1 retirada do ensaio E1.

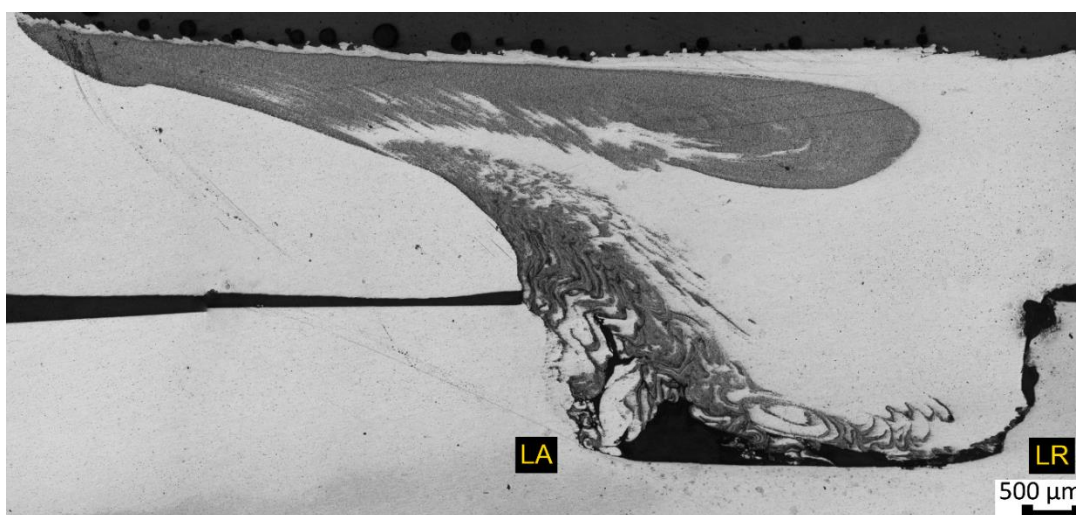


Figura 4.7 – Macrografia da secção transversal da amostra 1 do ensaio E1

Verifica-se que se obtém maior distribuição do material processado com partículas de reforço numa camada superficial fina uniforme. No LA, ao longo da altura do pino, observa-se uma distribuição não uniforme de material com o surgimento de um canal na profundidade máxima atingida pelo pino.

No entanto, como é possível observar pela

Figura 4.8, com o aumento do número de passagens obtém-se uma maior área de distribuição de material processado, desde a base do pino até a superfície do substrato superior.



Figura 4.8 - Macrografia da secção transversal da amostra 2 do ensaio E2

No ensaio E3, observa-se pela Figura 4.9 que a penetração não foi suficiente e que a largura da caixa foi excessiva para o diâmetro do pino. Consequentemente, não existiu ligação entre os substratos e a distribuição do material de reforço localiza-se na zona da base do pino e numa camada superficial do substrato superior, apresentando semelhanças ao ensaio E1.



Figura 4.9 - Macrografias da secção transversal das amostras 1 e 2 do ensaio E3

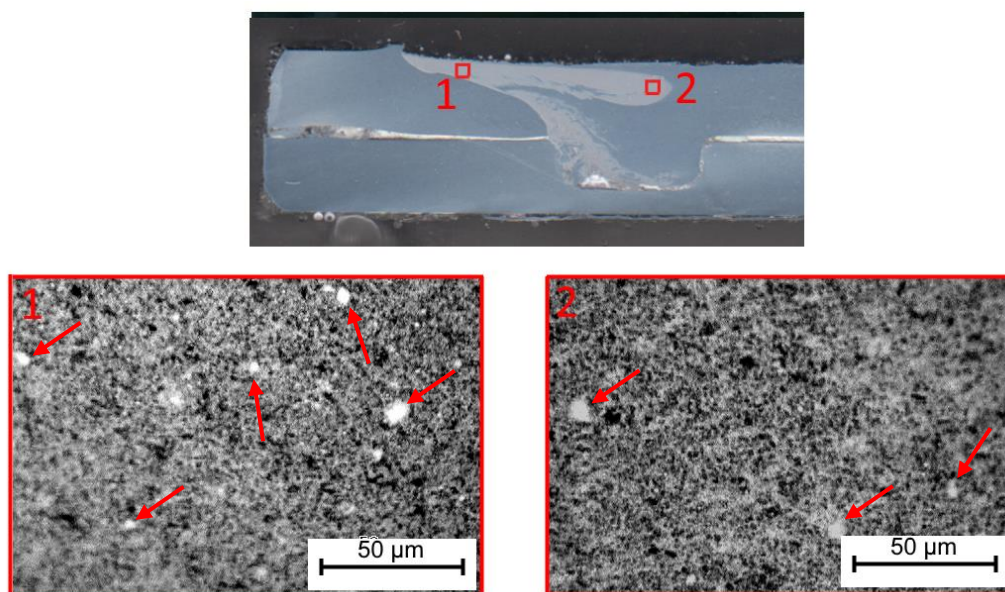


Figura 4.10 – Micrografia da amostra do ensaio E1

Na Figura 4.10 e na Figura 4.11 observa-se a presença das partículas de alumina distribuídas pela zona processada da matriz de alumínio. No entanto verifica-se uma grande redução no tamanho das mesmas (dimensões inferiores a $1\ \mu\text{m}$), sendo que o seu tamanho médio inicial era de $45\ \mu\text{m}$.

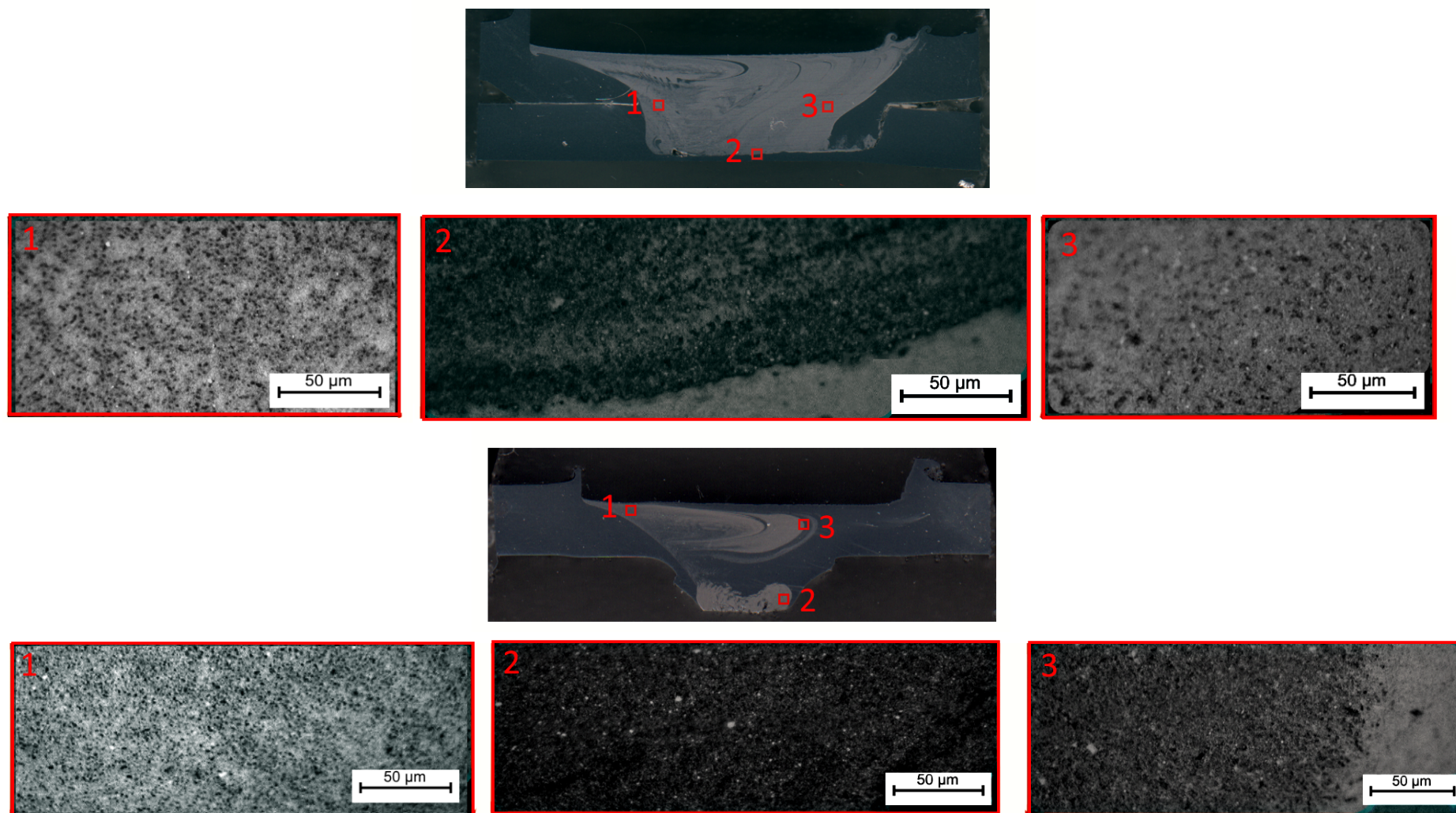


Figura 4.11 – Micrografias das amostras dos ensaios E2 e E3

4.3.2.2 - Processamento da liga AZ31 com partículas de hidroxiapatite

A Figura 4.12 ilustra o resultado obtido do reforço da liga AZ31 com partículas de hidroxiapatite no espaço entre chapas, com:

- Um cordão com uma passagem
- Um cordão com 4 passagens sobrepostas, avançando lateralmente 1 mm para o lado de avanço

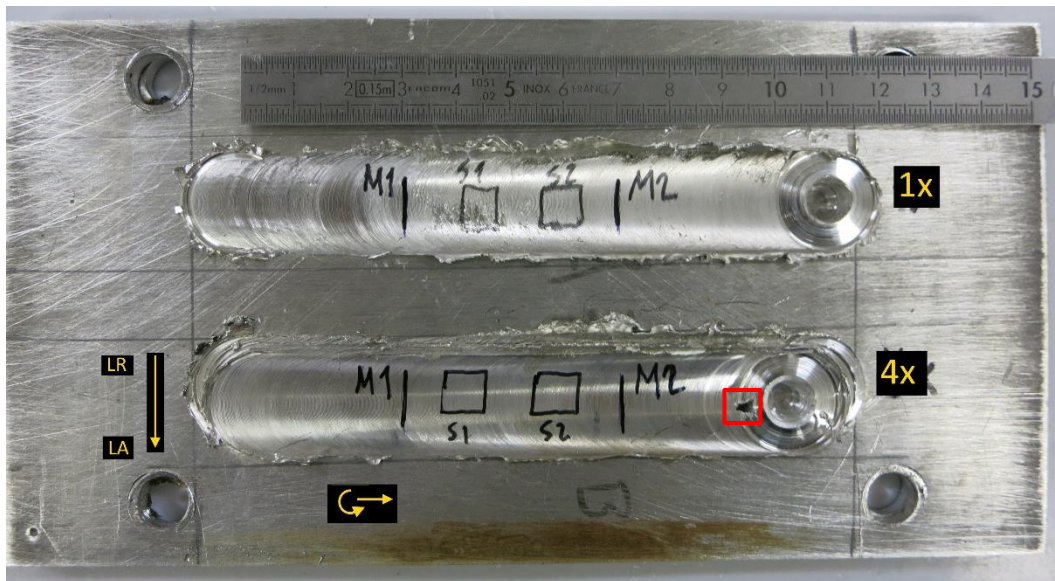


Figura 4.12 – Resultado do ensaio E4

Tal como nos resultados obtidos anteriormente, verifica-se que maior número de passagens promove melhor acabamento superficial e o surgimento de um defeito junto à zona da saída do pino.

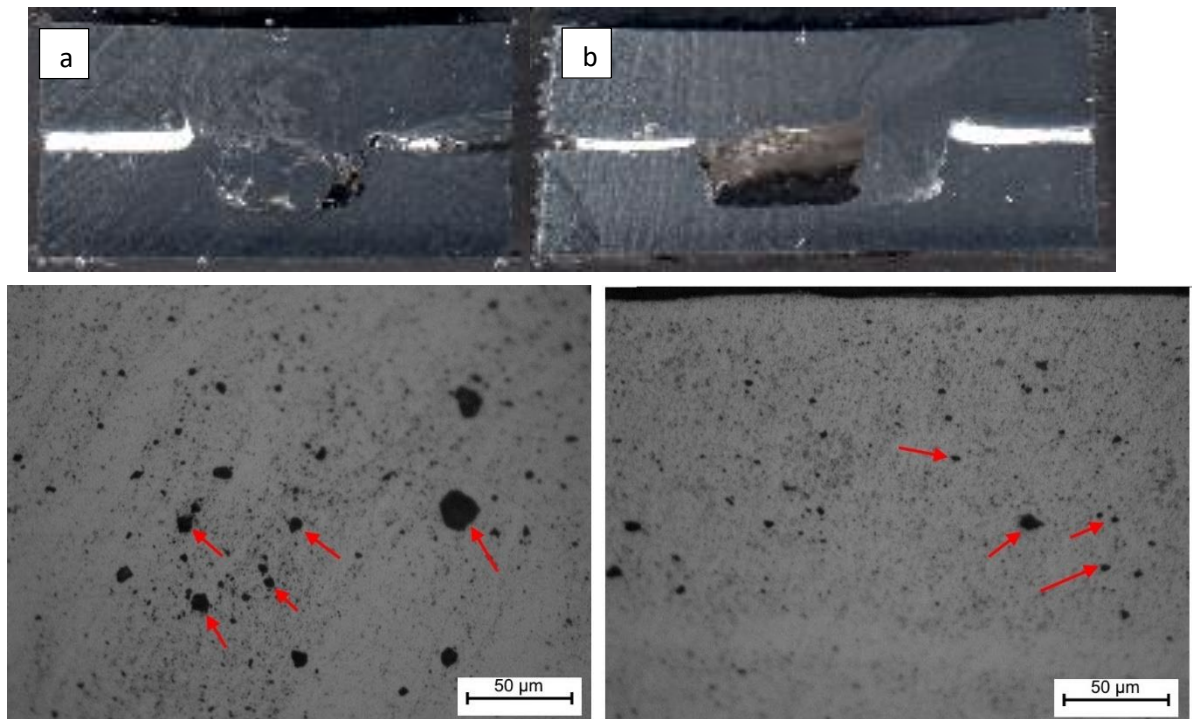


Figura 4.13 – Macro e micrografias da secção transversal das amostras M1 do ensaio E4 com a) passagem simples e b) passagem múltipla

A Figura 4.13 ilustra a presença do material de reforço na matriz de magnésio. No entanto, verifica-se uma redução no tamanho das partículas quando são efetuadas múltiplas passagens. Devido à elevada ductilidade do magnésio, observa-se o defeito de vazio de material na base do pino em ambas as situações, aumentando de dimensão à medida que se efetua maior número de passagens.

4.3.2.3 - Processamento da liga AA7075 com partículas de carboneto de silício

Na Figura 4.14 observa-se os resultados obtidos do reforço com carboneto de silício na liga AA7075 com:

- Rotação da ferramenta no sentido anti-horário, uma passagem e quatro passagens sobrepostas, avançando lateralmente 1 mm entre cada passagem para o lado de avanço, com espaçador entre chapas (Figura 4.14-a)

- Semelhante ao ponto anterior invertendo o sentido de rotação para o sentido horário, com avanço lateral entre cada passagem para o lado de retrocesso (Figura 4.14-b)

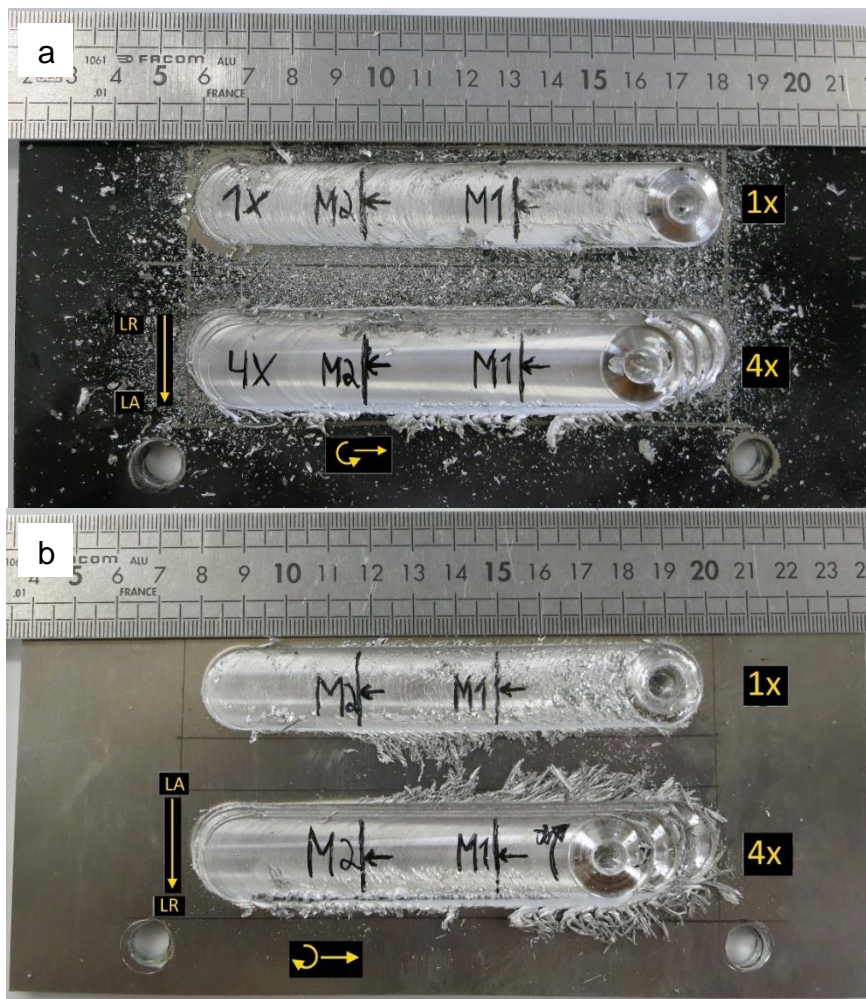


Figura 4.14 – Resultados dos ensaios a) E5 e b) E6

Em ambos os casos, verifica-se uma superfície mais rugosa quando é realizado apenas um passo e, no caso das passagens múltiplas, observa-se a presença de alguma rugosidade no lado de retrocesso.

A repetição dos ensaios E5 e E6 com passagem simples permitiu obter melhor acabamento numa pequena área junto à zona de saída do pino (Figura 4.15 a e b).

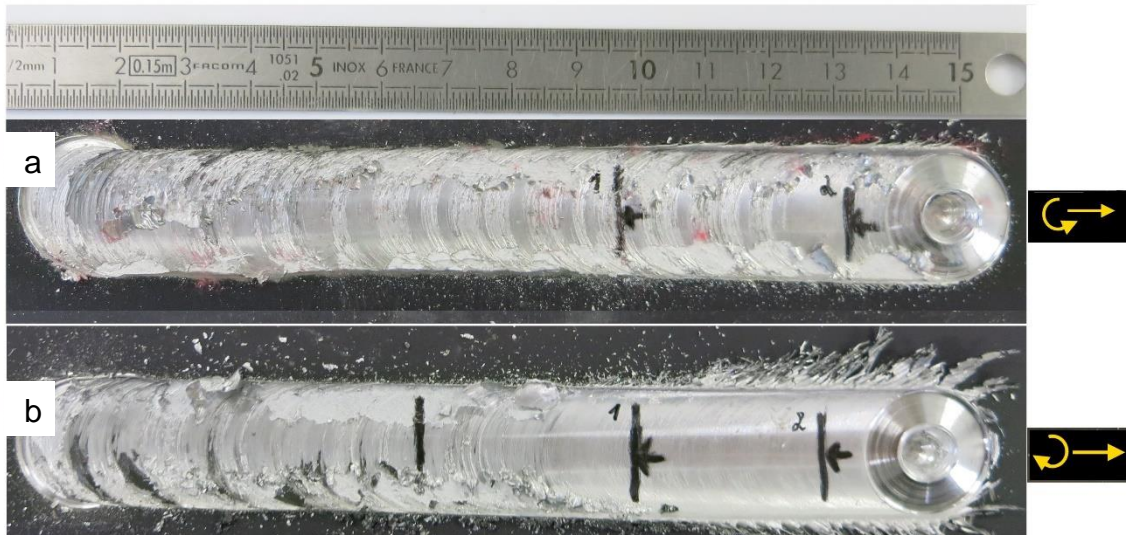


Figura 4.15 – Repetição dos ensaios E5 e E6. Resultados obtidos com passagem simples a) E5_2 e b) E6_2

Uma vez que foram utilizados os mesmo parâmetros em todos os ensaios, a justificação possível para este resultado é a força axial aplicada no processo. Visto que os ensaios são realizados numa fresadora convencional, o controlo da posição é feito manualmente, não havendo garantia que o seu valor é constante para todos os ensaios.

Com a ferramenta em rotação no sentido anti-horário e associada à sua rosca esquerda, verifica-se a ocorrência de fluxo de material em toda a altura do pino (Figura 4.16), enquanto que, a rotação no sentido horário provocou fluxo de material junto a base da passagem do pino.

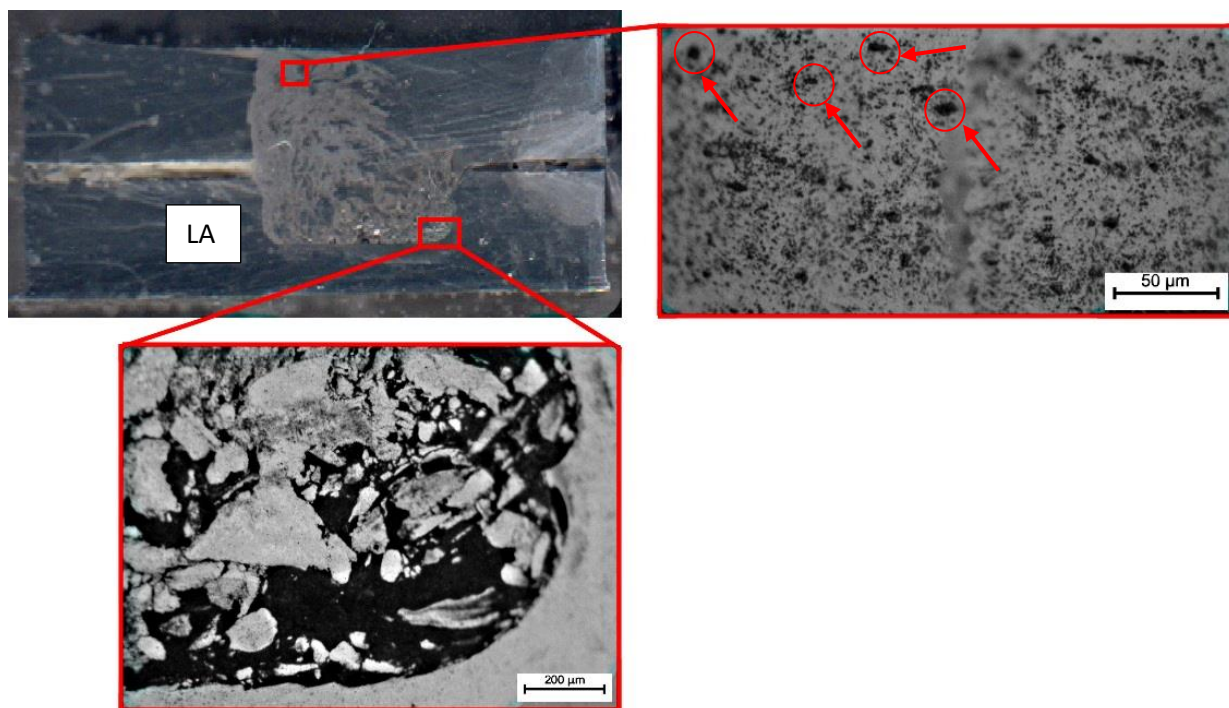


Figura 4.16 – Macro e micrografia da secção transversal da amostra do ensaio E5

No primeiro caso observa-se a presença de partículas de reforço em toda a área do material processado, com predominância no lado de avanço. No segundo caso (Figura 4.17), predomina a distribuição das partículas no lado de retrocesso, numa pequena área junto a base do pino. Em ambos os casos observa-se a presença do defeito vazio de material na zona de penetração máxima do pino.

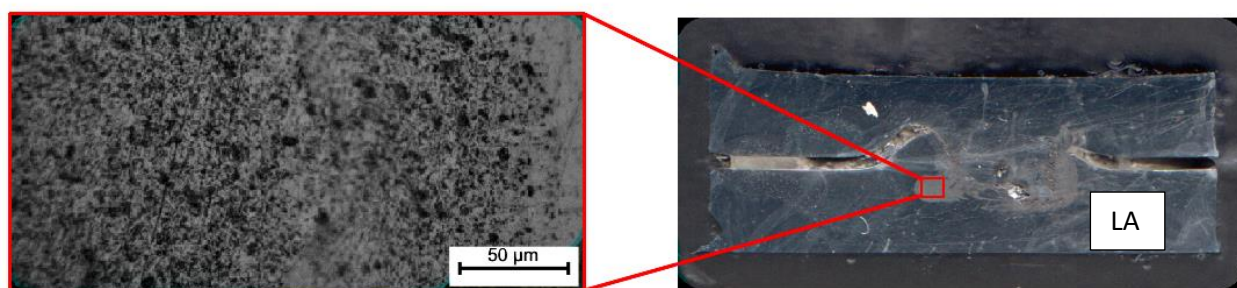


Figura 4.17 – Macro e micrografia da secção transversal da amostra do ensaio E6

Tal como pode ser observado na Figura 4.18, o aumento do número de passagens produz uma área de material processado maior e mais uniforme, comparativamente ao ensaio com passagem simples. As micrografias apresentam uma boa distribuição das partículas por toda a zona processada. Observa-se que o avanço efetuado para o lado do retrocesso (E6) origina a zona do *nugget* mais uniforme do que no avanço efetuado para o lado do avanço (E5). Para confirmar este aspeto, foram realizados os ensaios E7 e E8 da Figura 4.19.

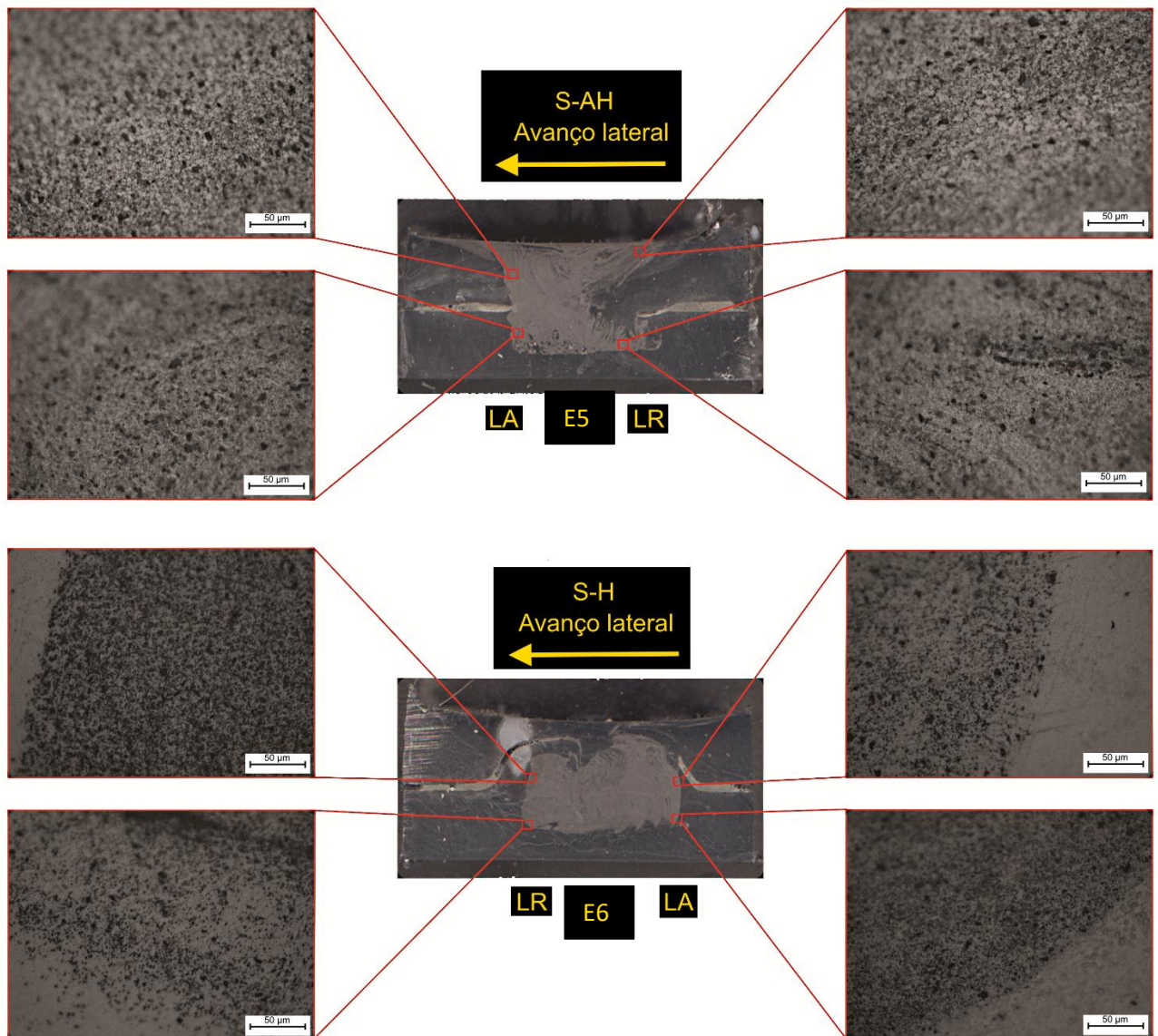


Figura 4.18 – Macro e micrografia da secção transversal das amostras dos ensaios E5 e E6 com passagens múltiplas.

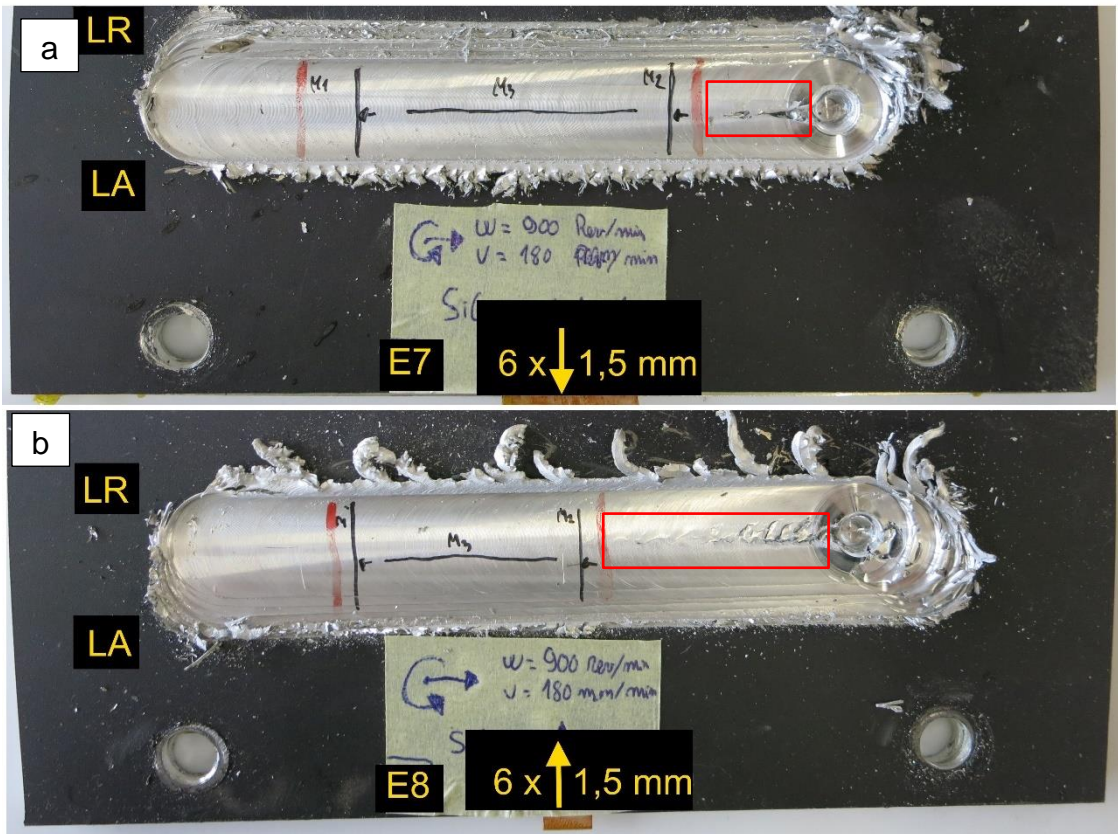


Figura 4.19 – Resultados dos ensaios com 6 passagens com passo de 1,5 mm para o lado de a) avanço - E7 e de b) retrocesso - E8.

Tal como pode ser observado na Figura 4.19, verifica-se a presença de um grande defeito na zona processada, junto ao ponto de saída do pino, de onde não são retiradas amostras para análise. No entanto, a repetição deste ensaio, nas mesmas condições, permitiu eliminar a presença do defeito (Figura 4.20).



Figura 4.20 – E7_2: Resultado obtido da repetição do ensaio E7

Na Figura 4.21 e Figura 4.22 observa-se a influencia da direção do avanço lateral entre passagens. No ensaio E7, é possível distinguir cada passo realizado

através do fluxo de material do lado de avanço para o de retrocesso. Assim, é produzida uma área não uniforme de distribuição de material, tanto ao longo da secção transversal como à superfície. Verifica-se que as condições do E8 são mais adequadas, isto é, a direção do avanço lateral entre passagens deve ser realizada para o lado de retrocesso. Este caso permite obter uma distribuição uniforme de material com partículas de reforço na secção lateral e à superfície. Contudo, é de notar que surge um defeito em forma de canal na base do pino, que acompanha a direção de avanço lateral da ferramenta.

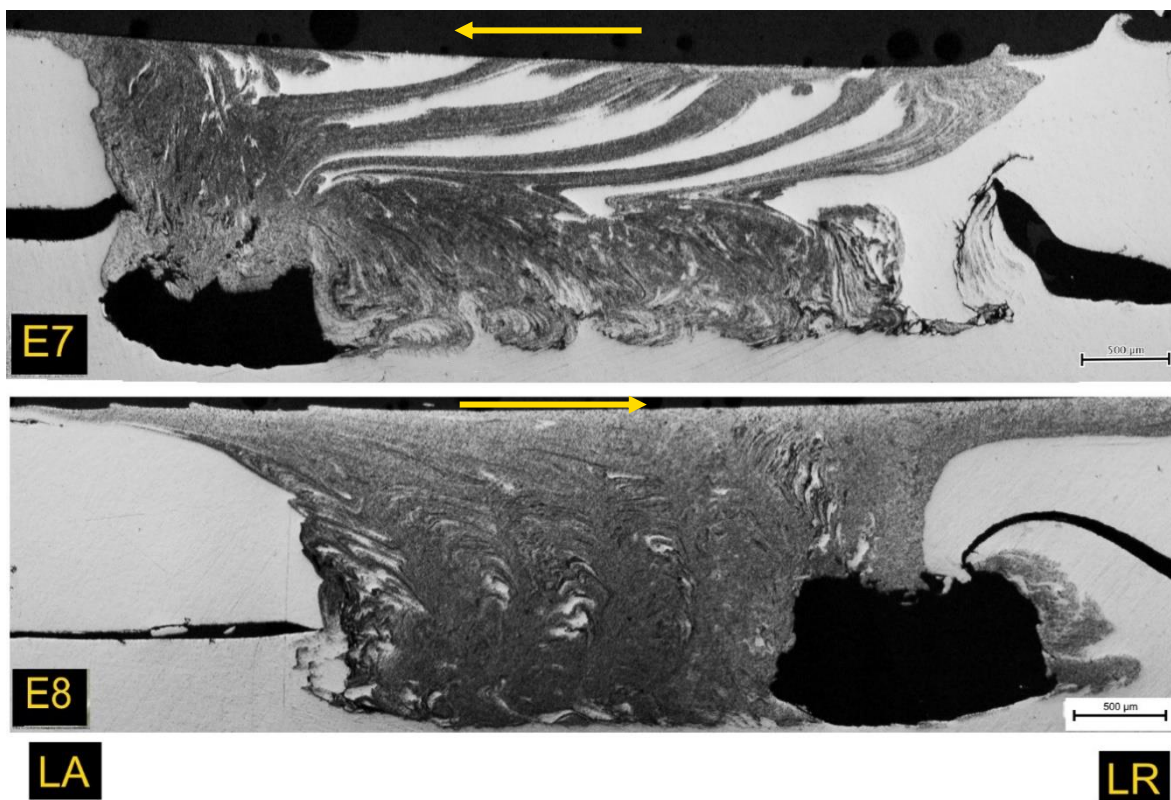


Figura 4.21 – Micrografia da secção transversal de amostras retiradas dos ensaios E7 e E8

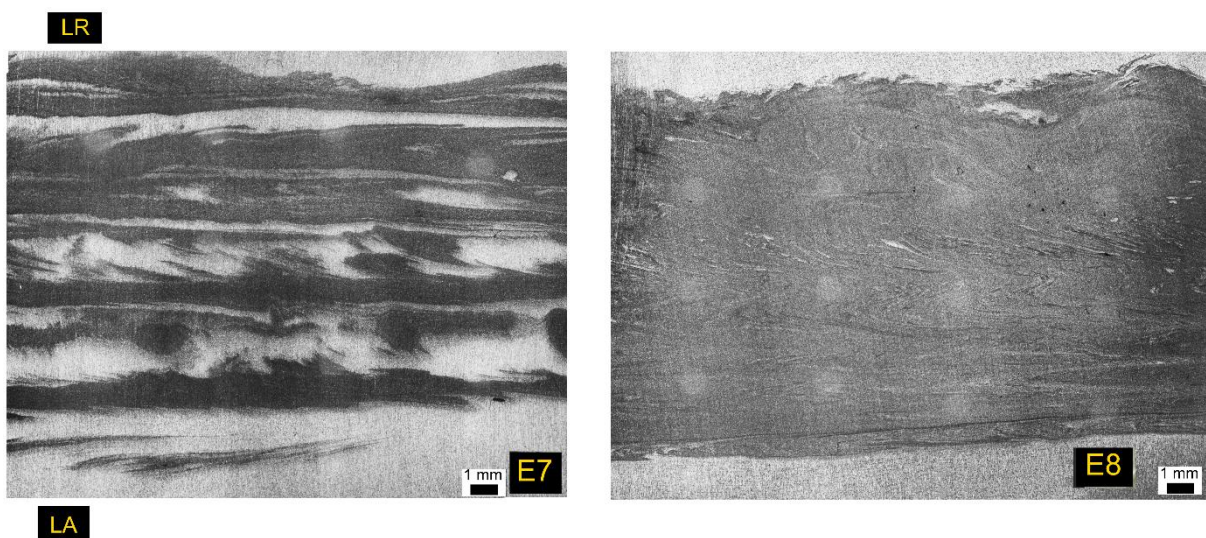


Figura 4.22 – Micrografia da superfície de amostras retiradas dos ensaios E7 e E8

5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 – Introdução

O capítulo final apresenta as conclusões retiradas do trabalho realizado e propostas para desenvolvimentos futuros nas áreas abordadas por este estudo.

5.2 – Conclusões

As principais conclusões desta dissertação são:

- O PFL é um processo utilizado para a obtenção de melhorias das propriedades mecânicas do material base, podendo ser utilizadas ou não, partículas de outros materiais de reforço;
- O PFL é um processo eficaz no refinamento de grão, observando-se uma redução no tamanho de grão de 40-50 μm para 6-8 μm no material base AA7075 com processamento em 6 passagens;
- O método de deposição de partículas com a abordagem do tipo *Sandwich* com fluxo vertical permite aumentar a uniformidade da

distribuição e quantidade de partículas, resolvendo o problema do método convencional por rasgo no material de base, o qual não permite uma dispersão uniforme das partículas;

- O sentido de rotação anti-horário da ferramenta promove a uniformidade da distribuição de matéria, uma vez que o fluxo ascendente permite obter uma área de material processado maior, até à superfície do substrato superior, comparativamente ao sentido horário onde o material processado se localiza junto à zona da junta das chapas;
- Quanto maior o número de passagens realizadas, melhor é o acabamento superficial da zona processada e obtém-se maior volume de material processado;
- A direção e a distância do avanço lateral entre passagens influencia o resultado obtido da zona processada, onde se verifica que obtém melhores resultados com o avanço lateral para o lado de retrocesso;
- Verifica-se a presença do defeito de vazio de material em todos os ensaios realizados com o sentido anti-horário da ferramenta, do lado correspondente à direção do avanço lateral.

5.3– Propostas para Desenvolvimentos Futuros

São sugeridas as seguintes propostas para desenvolvimento futuro:

- Modificação dos parâmetros de processo para avaliação da sua influência na distribuição do material de reforço;
- Avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos pelo método de *sandwich*
- Desenvolvimento de estratégias para eliminação do defeito de vazio de material provocado pelo fluxo ascendente;
- Avaliação da eficiência energética do processo, através dos valores das temperaturas e forças envolvidas no processo, obtidos pela base instrumentada e pela câmara termográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Rathee, S. Maheshwari, A. N. Siddiquee, and M. Srivastava, "Distribution of reinforcement particles in surface composite fabrication via friction stir processing: Suitable strategy," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 33, no. 3, pp. 262–269, 2018.
- [2] E. A. Starke and S. Mridha, *Aluminum Alloys: Alloy, Heat Treatment, and Temper Designation*, no. July 2015. Elsevier Ltd., 2016.
- [3] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. Mcfadden, N. A. Mara, and A. K. Mukherjee, "HIGH STRAIN RATE SUPERPLASTICITY IN A FRICTION STIR PROCESSED 7075 Al ALLOY," vol. 42, pp. 163–168, 2000.
- [4] S. C. Lim, M. Gupta, L. Ren, and J. K. M. Kwok, "The tribological properties of Al ± Cu / SiCp metal ± matrix composites fabricated using the rheocasting technique," vol. 90, pp. 591–596, 1999.
- [5] Y. Huang, T. Wang, W. Guo, L. Wan, and S. Lv, "Microstructure and surface mechanical property of AZ31 Mg / SiC p surface composite fabricated by Direct Friction Stir Processing," *J. Mater.*, vol. 59, pp. 274–278, 2014.
- [6] M. Navazani and K. Dehghani, "Investigation of Microstructure and Hardness of Mg/TiC Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing (FSP)," in *5th International Biennial Conference of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 2015, vol. 11, pp. 509–514.
- [7] M. Balakrishnan, I. Dinaharan, R. Palanivel, and R. Sivaprakasam, "Synthesize of AZ31 / TiC magnesium matrix composites using friction stir processing," *J. Magnes. Alloy.*, vol. 3, no. 1, pp. 76–78, 2015.
- [8] D. Ahmadkhaniha, M. Heydarzadeh Sohi, A. Salehi, and R. Tahavvori, "Formations of AZ91/Al₂O₃ nano-composite layer by friction stir

- processing,” *Magnes. Alloy.*, vol. 4, pp. 314–318, 2016.
- [9] J. Iwaszko, K. Kudla, and K. Fila, “Friction stir processing of the AZ91 magnesium alloy with SiC particles,” *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol. 77, no. February, pp. 85–92, 2016.
- [10] B. R. Sunil and T. S. S. Kumar, “Nano-hydroxyapatite reinforced AZ31 magnesium alloy by friction stir processing : a solid state processing for biodegradable metal matrix composites,” 2013.
- [11] D. Ahmadkhaniha, M. Fedel, M. H. Sohi, A. Z. Hanzaki, and F. Deflorian, “Corrosion behavior of magnesium and magnesium – hydroxyapatite composite fabricated by friction stir processing in Dulbecco ’ s phosphate buffered saline,” *Eval. Program Plann.*, vol. 104, pp. 319–329, 2016.
- [12] B. R. Sunil, T. S. S. Kumar, U. Chakkingal, V. Nandakumar, and M. Doble, “Friction stir processing of magnesium – nanohydroxyapatite composites with controlled in vitro degradation behavior,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 39, pp. 315–324, 2014.
- [13] H. R. Zheng, Z. Li, C. You, D. B. Liu, and M. F. Chen, “Effects of MgO modified b-TCP nanoparticles on the microstructure and properties of b - TCP / Mg-Zn-Zr composites,” vol. 2, pp. 1–9, 2017.
- [14] B. R. Sunil, G. P. Kumar, H. Patle, and R. Dumpala, “Magnesium based surface metal matrix composites by friction stir processing,” *J. Magnes. Alloy.*, vol. 4, no. 1, pp. 52–61, 2016.
- [15] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing,” vol. 50, pp. 1–78, 2005.
- [16] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, and I. Charit, “Friction stir processing : a novel technique for fabrication of surface composite,” vol. 341, no. v, pp. 1–4, 2003.
- [17] A. Chaudhary, A. Kumar Dev, A. Goel, R. Butola, and M. S. Ranganath, “The Mechanical Properties of Different alloys in friction stir processing: A

-
- Review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5553–5562, 2018.
- [18] P. N. Banjare, P. Sahlot, and A. Arora, “An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 239, no. August 2018, pp. 83–91, 2017.
- [19] F. Nascimento, T. Santos, P. Vilac, R. M. Miranda, and L. Quintino, “Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys,” vol. 506, pp. 16–22, 2009.
- [20] Techminy, “Friction stir welding machine tools, equipment and application,” 2016. [Online]. Available: <https://techminy.com/friction-stir-welding/>.
- [21] R. M. Miranda, J. Gandra, and P. Vilaça, “Surface Modification by Friction Based Processes,” *Intech open*, vol. 2, p. 64, 2013.
- [22] K. Elangovan and V. Balasubramanian, “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy,” vol. 0, pp. 163–175, 2007.
- [23] P. Dabeer and G. Shinde, “Perspective of Friction Stir Welding Tools,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 13166–13176, 2018.
- [24] E. R. I. Mahmoud, M. Takahashi, T. Shibayanagi, and K. Ikeuchi, “Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 14, no. 5, pp. 413–425, 2009.
- [25] R. M. Miranda, T. G. Santos, J. Gandra, N. Lopes, and R. J. C. Silva, “Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 9, pp. 1609–1615, 2013.
- [26] J. Gandra, R. M. Miranda, and P. Vilac, “Effect of overlapping direction in multipass friction stir processing,” vol. 528, pp. 5592–5599, 2011.
- [27] S. Rathee, S. Maheshwari, A. N. Siddiquee, and M. Srivastava, “A Review of Recent Progress in Solid State Fabrication of Composites and

- Functionally Graded Systems Via Friction Stir Processing,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 334–366, 2018.
- [28] C. M. Abreu, R. Acuña, M. Cabeza, M. J. Cristóbal, P. Merino, and D. Verdera, “Microstructure and mechanical properties of Al / SiC composite surface layer produced by friction stir processing,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 29, no. 1, pp. e82–e86, 2017.
- [29] M. Sudhakar, C. Srinivasa Rao, and M. Saheb.K, “Production of Surface Composites by Friction Stir Processing - A Review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 929–935, 2018.
- [30] G. M. Karthik, G. D. J. Ram, and R. S. Kottada, “A Friction stir selective alloying,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 684, no. October 2016, pp. 186–190, 2017.
- [31] Z. Du, M. J. Tan, J. F. Guo, G. Bi, and J. Wei, “Fabrication of a new Al-Al₂O₃-CNTs composite using friction stir processing (FSP),” *Materials Science and Engineering A*, vol. 667, pp. 125–131, 2016.
- [32] V. Sharma, Y. Gupta, B. V. M. Kumar, and U. Prakash, “Friction Stir Processing Strategies for Uniform Distribution of Reinforcement in a Surface Composite,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 10, pp. 1384–1392, 2016.
- [33] H. Rana and V. Badheka, “Influence of friction stir processing conditions on the manufacturing of Al- Mg-Zn-Cu alloy / boron carbide surface composite,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 255, no. January, pp. 795–807, 2018.
- [34] J. Tang, Y. Shen, and J. Li, “Influences of friction stir processing parameters on microstructure and mechanical properties of SiC/Al composites fabricated by multi-pin tool,” *J. Manuf. Process.*, vol. 38, no. August 2018, pp. 279–289, 2019.
- [35] A. Dolatkah, P. Golbabaie, M. K. B. Givi, and F. Molaiekiya, “Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052 / SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing,” *J. Mater.*, vol. 37, pp. 458–464, 2012.

- [36] A. Zarghani, A. Z.- Hanzaki, and S. F. Kashani-Bozorg, "Wear assessment of Al / Al₂O₃ nano-composite surface layer produced using friction stir processing," *Wear*, vol. 270, no. 5–6, pp. 403–412, 2011.
- [37] Matweb, "Aluminum 6082-T6." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7>.
- [38] Matweb, "Aluminum 7075-T651." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d>.
- [39] Matweb, "Magnesium AZ31." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a812783cd8d44cfc89a8ccd8801d6968&ckck=1>.