

LAMINAÇÃO A QUENTE DA LIGA DE MAGNÉSIO ZK60+2,5MM PROCESSADA POR FSP (FRICTION STIR PROCESSING)

Apresentado no

10º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP ou no 4º Congresso de Pós-Graduação do IFSP

27 e 28 de novembro de 2019- Sorocaba-SP, Brasil

RESUMO: Ligas metálicas com baixa densidade são consideradas materiais essenciais em aplicações nas indústrias de transporte. Neste contexto, as ligas a base de magnésio, em especial as de matriz ZK, são fortes candidatas uma vez que apresentam menor densidade dentre os materiais estruturais (33% menos denso que o alumínio) e maior resistência mecânica. Contudo, sua conformação mecânica é limitada devido à estrutura cristalina hexagonal compacta e a presença de intermetálicos nos contornos de grão, dificultando assim o trabalho a quente. Caso seja pulverizado, há o aumento de sua resistência mecânica, promovendo o aumento da taxa de recristalização dinâmica e o refino de grão durante a conformação mecânica. A adição de mischmetal aumenta a fração de intermetálicos, tornando os materiais mais frágeis. Uma alternativa é o uso do FSP, considerado um processo de baixo custo que promove quebra e pulverização nanométricas dos intermetálicos, além do super-refino de grão e recristalização na zona de mistura. Este trabalho visa estudar o efeito do processamento por FSP na taxa de redução na laminação a quente, na microestrutura do material, com o uso da microscopia óptica e da microscopia eletrônica de varredura, e nas propriedades mecânicas através dos ensaios de microdureza.

PALAVRAS-CHAVE: liga de magnésio; ZK60; FSP; laminação a quente; microestrutura.

Hot rolling of the ZK60 + 2.5MM magnesium alloy processed by FSP (Friction Stir Processing)

ABSTRACT: *Low-density metal alloys are considered essential materials for applications in the transportation industry. In this context, magnesium-based alloys, especially ZK-matrix alloys, are strong candidates since they have a lower density of structural materials (33% less dense than aluminum) and higher mechanical strength. However, its mechanical conformation is limited due to the compact hexagonal crystalline structure and the presence of intermetallic in the grain contours, making it difficult to work in hot conditions. If it is pulverized, there is an increase in its mechanical resistance, promoting the increase of the rate of dynamic recrystallization and the grain refining during the mechanical conformation. The addition of mischmetal increases the fraction of intermetallic, making the materials more fragile. An alternative is the use of FSP, considered a low-cost process that promotes nanometric breakage and spraying of intermetallics, besides grain super-refining and recrystallization in the mixing zone. This work aims to study the effect of FSP processing on the rate of reduction in hot rolling, microstructure of the material, using optical microscopy and scanning electron microscopy, and mechanical properties through microhardness tests.*

KEYWORDS: Magnesium alloy; ZK60; FSP; hot rolling; microstructure.

INTRODUÇÃO

Existe uma preocupação constante e uma procura muito grande em indústrias de transporte, em específico na aeronáutica, para o desenvolvimento de projetos que visam a redução ou minimização da emissão de CO₂ para a atmosfera, reduzindo consequentemente o impacto causado na camada de ozônio. A indústria de transporte é responsável por 23% da emissão de CO₂, e, portanto, neste sentido torna-se necessário a busca de alternativas que reduzem o peso dos produtos e consequentemente diminuem o gasto de energia para movimentação destas estruturas. Uma das alternativas é o estudo e o emprego de novos materiais que apresentem pesos menores, porém com a manutenção da resistência mecânica de projetos mais robustos, para poderem suportar as elevadas cargas das aplicações (DA SILVA, 2014)¹.

As ligas de magnésio, altamente utilizadas pelas indústrias militar e aeronáutica comercial, foram retiradas de uso nas décadas de 1950 e 1970 por apresentarem baixa resistência a corrosão. Porém, atualmente, retornaram às pesquisas por possuírem característica de baixa densidade, em torno de 2/3 da densidade do alumínio, boa usinabilidade, alta resistência mecânica específica, se comparada com outros tipos de materiais, além do alto potencial de reciclagem (DA SILVA, 2014)¹.

Das ligas a base de magnésio, as ligas ZK (Mg-Zn-Zr) são as que possuem melhores resistências mecânicas. Alguns estudos mostram que a adição de terras raras ou de *mischmetal* (Mm) nestas ligas, possibilita a formação de precipitados em meio a uma solução sólida, que aumentam o ponto de fusão e a dureza do material, promovendo assim uma maior resistência em temperatura ambiente e em altas temperaturas, além de promover o aumento de sua resistência à corrosão através da formação de uma película densa de óxido (DA SILVA, 2014).

Estudos mais aprofundados sobre essas ligas e suas variações, em relação a porcentagem de *mischmetal*, pode ser uma importante alternativa para as indústrias que necessitam de ligas com baixa densidade (DA SILVA, 2014).

Em específico, a liga ZK60 é uma das que apresenta a melhor combinação das propriedades de ductilidade e resistência mecânica, além de ser considerada uma das ligas mais disponíveis comercialmente (DA SILVA, 2016).

Caso seja pulverizado, há o aumento da taxa de recristalização e refino de grão durante a conformação mecânica. Sendo assim, o processo de FSP (processamento por fricção e mistura mecânica) é utilizado, pois através deste processamento é possível promover a quebra dos intermetálicos e dos grãos, transformando a microestrutura do material para uma nova zona de mistura (DA SILVA, 2017).

Este trabalho visa a conformação por laminação a quente após FSP, resultando em melhores propriedades mecânicas desta liga, através da aplicação de altas taxas de deformação visando o refino de grãos, quebra e pulverização dos intermetálicos, alta taxa de recristalização dinâmica, redução da textura basal e solubilização parcial dos intermetálicos durante o processo.

MATERIAL E MÉTODOS

FSP

Segundo Mahoney e Lynch (2006), o processamento por fricção (FSP - *friction stir processing*) é uma tecnologia emergente de engenharia de superfície, utilizada, dentre outras coisas, para promover o refinamento de microestruturas, melhorando a resistência mecânica e a ductilidade, aumentando a resistência à corrosão e fadiga, e melhorando a conformabilidade.

A Tabela 1 apresenta alguns resultados de dureza, limite de escoamento e limite de resistência, comparando valores para um material somente fundido e um material fundido e processado por FSP.

TABELA 1. Propriedades mecânica e dureza para um material bronze NiAl fundido e processado por fricção (MAHONEY e LYNCH, 2006).

Microestrutura	Dureza RB	Alongamento (%)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
Fundido	68 - 75	20	214	445
Processo FSP	91	23	508	776

Nota-se considerável melhora nos resultados de dureza, limite de escoamento e limite de resistência para as amostras processadas por FSP em relação às amostras somente fundidas.

O processo de FSP será realizado com uma ferramenta de aço 120 W V 4, disposta de um ombro de Ø18mm, um pino com Ø6 mm e comprimento de 5mm, com um ângulo de abertura de 30°. Para alívio de pressão a mesma trabalha com uma inclinação de 3°, para fornecer força compressiva à zona agitada, em que se aplica, em média, uma força de 11,7 KN. O processo será arrefecido a temperatura ambiente sem a utilização de um gás de proteção.

As amostras, após processadas por FSP, serão laminadas à quente. Para tanto, serão aquecidas em um forno da marca Maitec-Fornos INTI modelo FL-1300, até a temperatura de 420°C por 30 minutos no primeiro passe e 15 minutos para os demais passes. A laminação em si será realizada com o uso de um laminador de 1 CV de potência, com rotação de 60 rpm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos realizados mostram que a liga ZK60 + 2,5% de *mischmetal* apenas fundida não suportam reduções superiores à 2% entre passes com temperaturas de até 400°C, e para chapas

previamente processadas por FSP foi possível, nas mesmas condições, reduções por passes superiores a 20%, como mostrado nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2. Resultados obtidos no processo de laminação a quente da liga ZK60 + 2,5 *mischmetal*.

Graus °C	Nº de Passes	Espessura (mm)	Redução (%)	Espessura Esperada	Voltas Laminador
420	1	6,60	0,20	5,28	3,30
	2	5,30		4,24	2,65
	3	4,30		3,44	2,15
	4	3,38		2,70	1,69
	5	3,00		2,40	1,50
	6	2,40		1,92	1,20
	7	2,00		1,60	1,00

TABELA 3. Valores reais obtidos no processo de laminação à quente da liga ZK60 + 2,5 *mischmetal*.

Redução Calculada	Diferença de Redução	Redução Real	Redução Real (%)
6,60	1,00000	0,20000	20,00
5,28	0,99623	0,19925	19,92
4,22	0,98233	0,19647	19,65
3,38	0,99976	0,19995	20,00
2,70	0,90112	0,18022	18,02
2,16	0,90112	0,18022	18,02
1,73	0,86508	0,17302	17,30

Além da redução drástica do tempo de processamento, com a aplicação do processo por FSP, tem-se a obtenção de uma microestrutura super-refinada, como pode ser verificado na Figura 1.

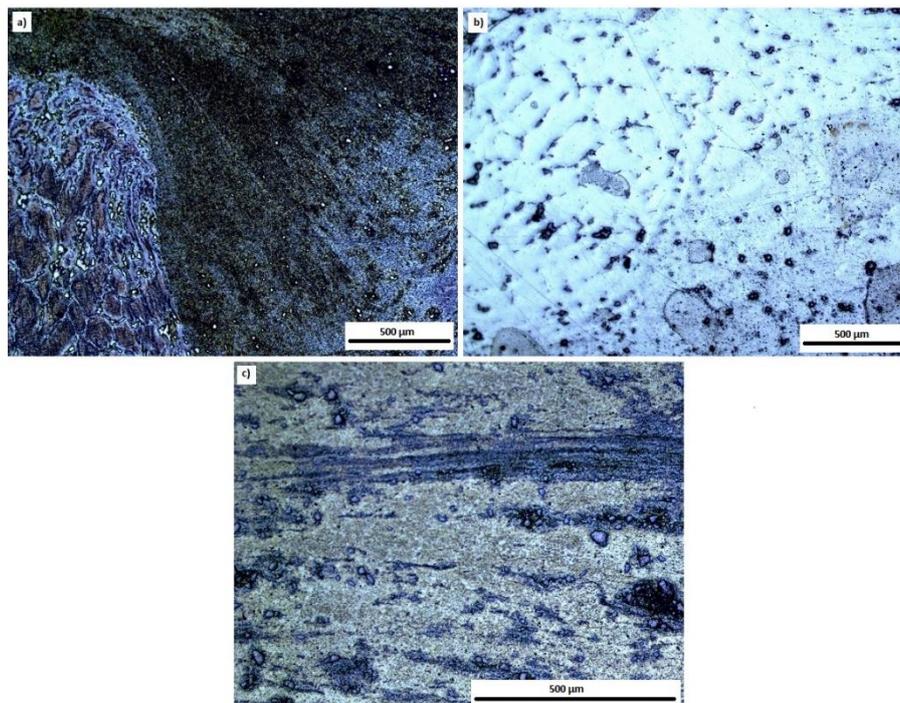


FIGURA 1. Microscopia ótica do material ZK60+2,5%Mm processadas por FSP (a) e laminadas a quente, na longitudinal (b) e na transversal (c).

A Tabela 4 mostra as médias junto com seus desvios padrões do ensaio de microdureza, tendo a primeira amostra de FSP sem laminação com $69,0 \pm 6,93$ HV e a com laminação $67,3 \pm 2,96$ HV, o que em tese são valores próximos e sem muita distinção.

TABELA 4. Valores de microdureza na liga ZK60 + 2,5 mischmetal+ FSP e laminação.

Ensaio de Microdureza Vickers (HV)	Passos	FSP sem laminação	FSP com laminação
	1		86,3
2		65,7	67,7
3		63,3	72,2
4		72,2	66,2
5		63,3	68,9
6		70	66,4
7		68,7	70,1
8		70,3	64,4
9		57,9	64,6
10		70,7	68,2
11		66,6	62
12		66,7	
13		65,6	
14		78,4	
Média		69,0	67,3
Desvio Padrão		6,93	2,96

As imagens (a) e (b) da Figura 2 também mostram os valores da dureza média e do desvio padrão para as amostras processadas por FSP, e processadas por FSP e laminadas posterior respectivamente. A imagem (c) da mesma figura e a Figura 3 mostram que estatisticamente as amostras não são diferentes, quando comparando os valores médios de microdureza juntamente com seus desvios padrões. Conclui-se que não existem diferenças significativas nos valores de microdureza para amostras processadas por FSP e/ou processadas por FSP e laminadas posteriormente.

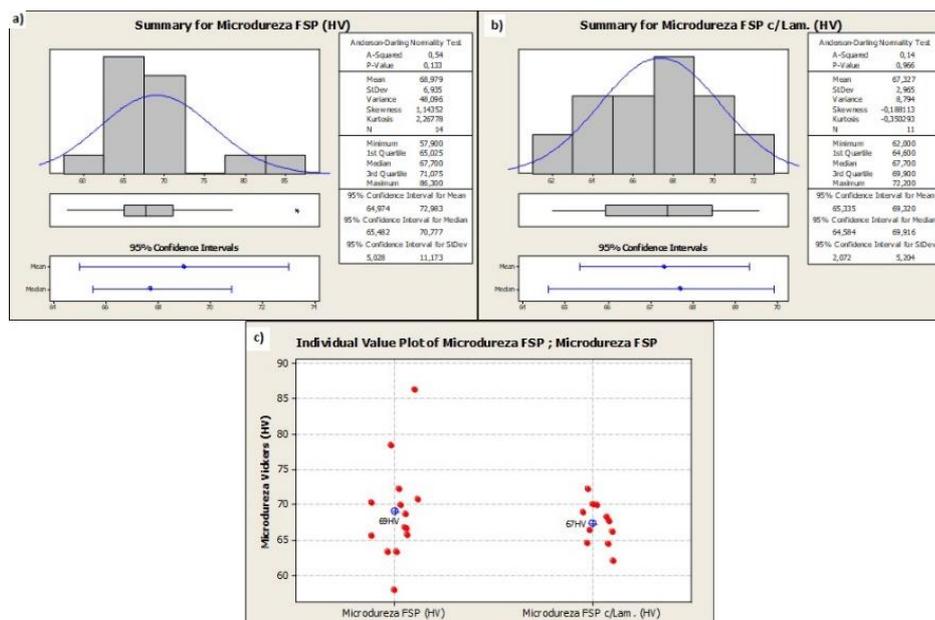


FIGURA 2. Dados estatísticos para (a) amostras processadas por FSP; (b) amostras processadas por FSP e laminação posterior. (c) comparação da microdureza das amostras distintas.

