

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE *FRICITION STIR PROCESSING* (FSP) NOS ASPÉCTOS MACRO E MICRO DE UMA CHAPA DE ALUMÍNIO 1050 COM 3 MM DE ESPESSURA\*

Carolina Alencar Caldeira de Souza<sup>1</sup>  
Kaio Ferreira dos Santos<sup>2</sup>  
Rafael Oliveira Santos<sup>3</sup>  
Bruna Godoi Meirelles<sup>4</sup>  
Miguel Borodiak<sup>5</sup>  
Saulo Brinco Diniz<sup>6</sup>

## Resumo

O *Friction Stir Processing* (FSP) promove a modificação microestrutural (está sendo diretamente ligada aos parâmetros utilizados) de uma chapa metálica devido ao aquecimento e deformação plástica localizada mediante a passagem de uma ferramenta que gira com uma velocidade constante. Este trabalho verificou a influência da velocidade de rotação e sequência dos passes de FSP, em uma chapa de alumínio 1050 com 3,1 mm de espessura. Foram capturadas imagens para avaliação macro das chapas processadas e realizou-se análises microestruturais via luz polarizada. De acordo com os resultados obtidos, pode-se verificar que os passes sequenciais trazem melhores resultados, e com os demais parâmetros de FSP utilizados, uma velocidade de rotação de 980 rpm apresentou um melhor resultado macro e microestrutural.

**Palavras-chave:** FSP; *Friction Stir Processing*; Alumínio 1050.

## INFLUENCE OF FRICTION STIR PROCESSING (FSP) PARAMETERS IN THE MACRO AND MICRO ASPECTS OF AN 1050 ALUMINUM SHEET WITH 3 MM THICKNESS

## Abstract

The Friction Stir Processing (FSP) promotes the microstructural changes (and this is directly linked to the parameters used) of a metal sheet, due to heating and localized plastic deformation due to the passage of a tool that rotate with a constant speed. The objective was verify the influence of the rotation speed and processing passes on a 1050 aluminum sheet with 3.1 mm of thickness. Images were taken from macro evaluation of the processed plates, and microstructural analyzes were carried out by polarized light. According to the results, it can be verified that the sequential passes bring better results, and with the other FSP parameters used, the rotational speed of 980 rpm presented a better macro and microstructural result.

**Keywords:** FSP; *Friction Stir Processing*; 1050 Aluminum

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Metúrgica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> M.Sc., Eng. Metalurgista, Doutorando em Engenharia Metalúrgica (EEIMVR), UFF, Volta Redonda – RJ, Brasil; Professor DI – 1, CEFET - Angra dos Reis, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Metalurgista, CBA, Alumínio, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Bacharel em Química, Técnico Metalográfico, CBA, Alumínio, SP, Brasil.

<sup>6</sup> D.Sc., Eng. Metalurgista, Professor DI – 1, CEFET - Angra dos Reis, Angra dos Reis, RJ, Brasil. saulo\_brinco@hotmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais utilizados na atualidade, e isto se deve a sua alta versatilidade que é consequência de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Dentre essas características, podem-se destacar: alta resistência à corrosão na maioria dos ambientes; baixa densidade (aproximadamente 2,7 g/cm<sup>3</sup>); e uma alta condutividade térmica e elétrica. Algumas propriedades são influenciadas diretamente devido sua estrutura cristalina (CFC – cúbica de face centrada) como por exemplo, a ductilidade, que é uma das características mais importantes do alumínio. Apesar de todas as vantagens mencionadas, o alumínio apresenta algumas desvantagens que podem prejudicar sua utilização [1-3].

Dentre as desvantagens do alumínio se destacam: um baixo ponto de fusão e uma baixa resistência mecânica, sendo esta última, podendo ser aprimorada através de tratamentos térmicos adequados e trabalho mecânico a frio. As ligas de alumínio da série 1XXX, apresentam uma baixa resistência mecânica em relação as demais, e tem suas aplicações em protetores de equipamentos eletrônicos, contatos elétricos, alclad, trocadores de calor e equipamentos da indústria química, alimentícia e de bebidas [1, 4-7].

A liga de alumínio 1050 apresenta grau de pureza de 99,50%p (porcentagem em peso) de Al, e alguns elementos na forma de impurezas, como por exemplo, o Cu, Si e Fe, que formam compostos intermetálicos como o FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>SiAl<sub>12</sub> e FeSiAl<sub>18</sub>. Essas fases apresentam diferentes tamanhos, distribuições e formas, que podem prejudicar as propriedades da matriz. Em relação as suas propriedades, o alumínio comercialmente puro é caracterizado por uma elevada condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e uma baixa resistência mecânica. [4, 8]. A resistência mecânica pode ser melhorada através do trabalho a frio (encruamento) e refinamento de grão, como é previsto pela equação de Hall-Petch [9]. Dentre os métodos para se refinar o tamanho de grão, o processamento por fricção e mistura (*Friction Stir Processing* – FSP), tem-se mostrado promissor [4, 8, 10].

O FSP consiste em uma ferramenta composta por um pino acoplado a um ombro de maior diâmetro concêntricos, que giram com uma velocidade constante, geralmente até o final do processamento. Após a ferramenta iniciar sua rotação, essa é movimentada para baixo, para que ocorra a penetração do pino na chapa em um ponto inicial, e em seguida, é direcionada longitudinalmente até o ponto final. A realização do FSP promove um tratamento termomecânico, uma vez que há a geração de calor devido ao atrito, e a deformação plástica do material pela movimentação da ferramenta ao longo da região a ser processada. O calor gerado deve apresentar temperatura inferior ao ponto de fusão, para que não haja a fusão do material, entretanto tendo temperatura o suficiente para permitir o deslocamento da ferramenta que provoca a deformação plástica. Essa temperatura é alcançada através de um controle rigoroso dos parâmetros de processamento [11, 12].

Os parâmetros do FSP de maior importância são a velocidade de avanço, rotação da ferramenta, força axial, penetração do pino e ombro, ângulo de inclinação que a ferramenta faz com a peça e geometria da ferramenta, sendo este último o parâmetro de maior importância. A ferramenta do FSP tem o objetivo principal de geração de calor e fluxo de material, por isso, ferramentas com pino rosqueado, com ranhuras e o ombro côncavo são normalmente mais utilizados, uma vez que, geram maior calor devido ao atrito e promovem um maior confinamento do volume aquecido. A velocidade de rotação também é um fator que exerce significativa influência na geração de calor. O atrito aumenta com o acréscimo da velocidade de

rotação e assim há um incremento de calor gerado. E devido uma combinação dos parâmetros de FSP, pode-se alterar as microestruturas resultantes do material processado [13, 14].

A microestrutura do metal processado via FSP é formada por cinco zonas microestruturais distintas dentre elas: O *Nugget*, que está localizado no centro da área que foi processada em que são encontrados grãos finos, equiaxiais e recristalizados, conferindo alterações nas propriedades mecânicas iniciais da peça. A zona mais próxima à região do *Nugget*, é afetada pelo calor e pela deformação, entretanto não suficiente, para ocasionar a recristalização, à essa região dá-se o nome de zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA). A próxima região é afetada somente pelo calor e não mais pela deformação conhecido como zona termicamente afetada (ZTA). A zona que não é afetada pelo calor ou deformação é denominada metal base. Tem-se ainda, a zona afetada devido a passagem do ombro (ZAPO), de pouca profundidade, localizada na parte superior da chapa [13, 15].

Este trabalho teve como objetivo, estudar o aspecto macro e microestrutural de uma chapa de alumínio 1050 com 3,1 mm de espessura, submetida ao FSP com velocidades de rotação e sequência dos passes de FSP diferentes. Para tal objetivo, foram realizadas análises microestruturais via luz polarizada.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

O material utilizado para o presente estudo foi o alumínio comercialmente puro de nomenclatura 1050, na forma de chapa laminada a frio com uma espessura de 3,1 mm. Na Tabela 1 é apresentado um exemplo da faixa de composição química da liga de alumínio 1050 de acordo com SHOCK METAIS (2018) que utiliza a norma ASTM B-221.

**Tabela 1.** Faixa de composição química (porcentagem em peso) da liga de alumínio 1050 (SHOCK METAIS, 2018).

Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Outros cada (%)	Outros total (%)
99,5 mín	0,25 máx	0,4 máx	0,05 máx	0,03	-				

### 2.2 Métodos

Para a realização do FSP em chapas da liga de alumínio 1050 foi-se utilizado uma fresadora (modelo Veker 300U, eixos X, Y e Z), instalada no Laboratório de Processos de Fabricação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Campus Angra dos Reis. Realizou-se no total 3 passes em cada uma das chapas submetidas ao FSP, variando apenas a ordem em que os passes foram realizados e a velocidade de rotação da ferramenta. Os demais parâmetros, velocidade de avanço (105 mm/min), distância entre os passes (7,5 mm), penetração da ferramenta (-0,1 mm) e sentido de rotação

da ferramenta (sentido horário), foram mantidos constantes durante todo o processamento das chapas.

Na Figura 1 está apresentado o desenho técnico da ferramenta utilizada para a realização do FSP, com diferentes vistas: (a) e (c) apresentam as vistas laterais, (b) apresenta a vista isométrica da ferramenta, e (d) apresenta com um melhor detalhamento o pino e o ombro da ferramenta.

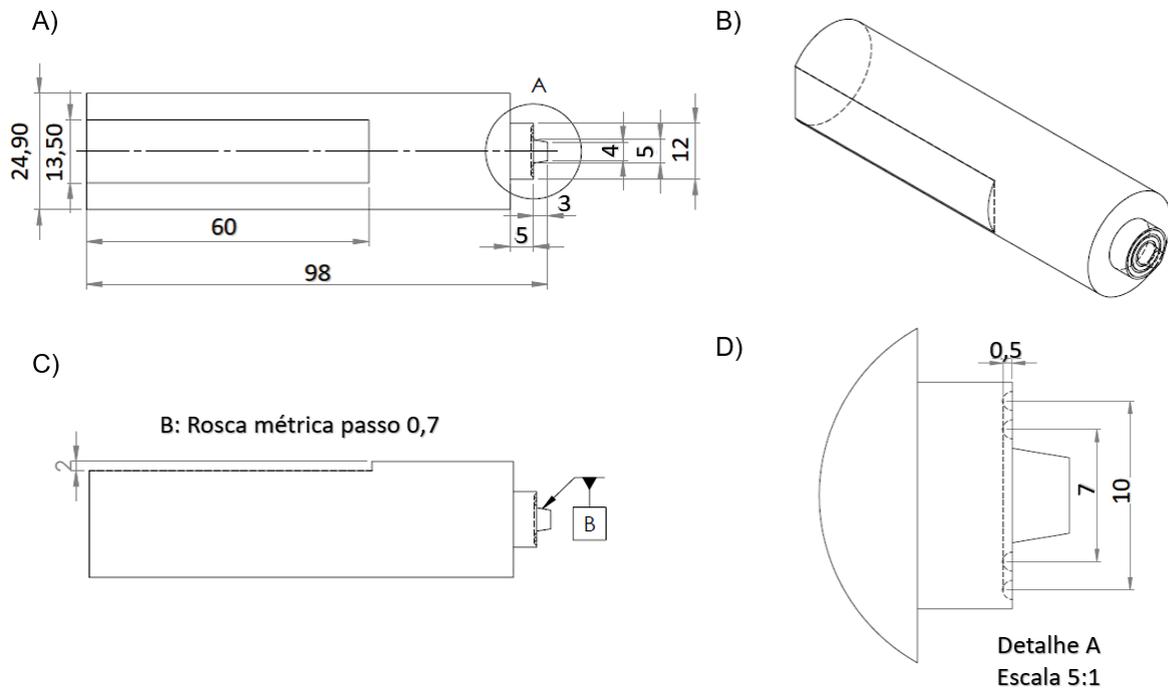


Figura 1 - Ferramenta de *Friction Stir Processing* em suas distintas vistas: (a) vista lateral, (b) vista isométrica, (c) vista lateral e (d) detalhamento do pino e ombro.

Para um melhor entendimento, a ordem e o modo em que os passes de FSP foram realizados, são apresentados nas Figuras 2 e 3.

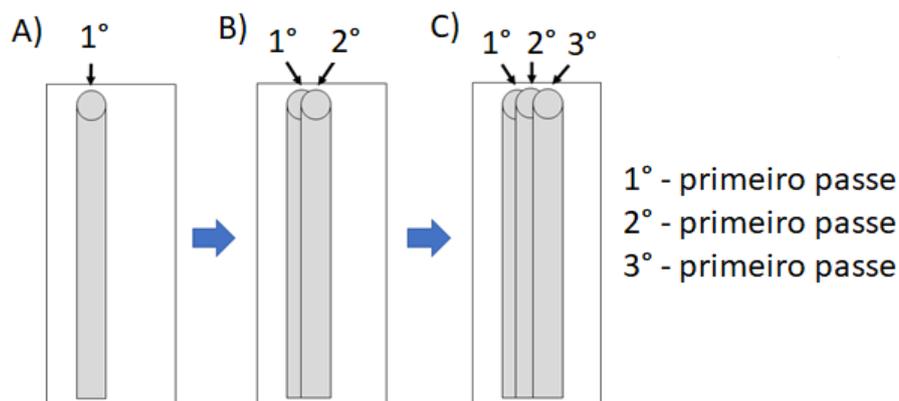


Figura 2 - Representação esquemática da ordem de passes 1º passe; 2º passe; 3º passe.

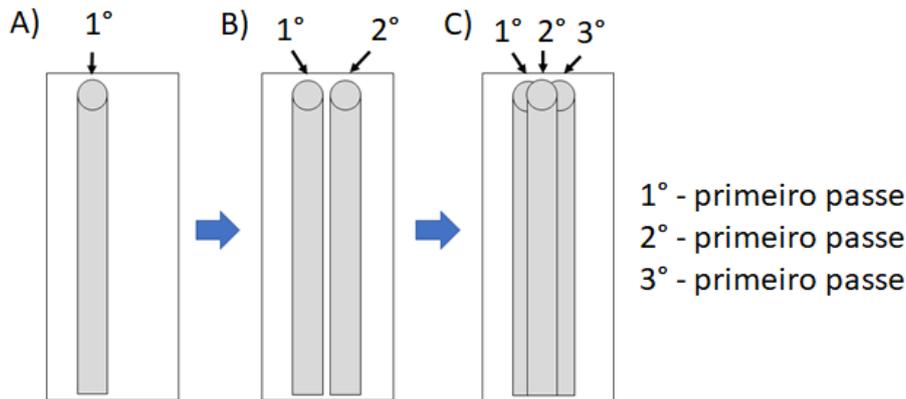


Figura 3 - Representação esquemática da ordem de passes 1º passe; 3º passe; 2º passe.

Como pode ser observado na Figura 2, os passes do FSP foram realizados sequencialmente, ou seja, um ao lado do outro. Já na Figura 3, observa-se que o 1º e o 2º passes são espaçados de modo que o último passe (3º passe) seja realizado entre os dois primeiros. Ao final do FSP das chapas, cada passe teve um distanciamento de 7,5 mm.

Após o processamento das chapas, as mesmas foram nomeadas seguindo um código numérico de formato XXYYY, onde XX representa a velocidade de rotação (sendo 06, para a rotação de 650 rpm, 98 para a rotação de 980 rpm e 13 para a rotação de 1380 rpm), e os índices YYY, representam a ordem em que foram realizados os passes. Na tabela 2, são apresentadas as nomenclaturas utilizadas, bem como o seu significado que relaciona o parâmetro utilizado no FSP.

**Tabela 2.** Relação entre nomenclatura das amostras e parâmetros utilizados.

Nomenclatura	Velocidade de rotação (rpm)	Ordem de passes
06132	650	1º; 3º; 2º
06123	650	1º; 2º; 3º
09132	980	1º; 3º; 2º
09123	980	1º; 2º; 3º
13132	1380	1º; 3º; 2º
13123	1380	1º; 2º; 3º

Após o processamento das chapas, as mesmas foram conduzidas para a análise visual. Para isto, foi-se utilizado uma câmera de celular (13 Mpixels), para realizar o registro das imagens. Todas as imagens foram capturadas com uma distância aproximada entre as chapas e o celular.

Com exceção da amostra 06132, devido uma série de defeitos evidenciados nas análises visuais, todas as outras condições foram destinadas as análises microestruturais via microscopia óptica com luz polarizada. Após serem cortadas (com auxílio de uma máquina de corte com disco abrasivo, sob refrigeração) no sentido transversal a linha de processamento, as amostras foram embutidas com resina fenólica, e seguiram para a etapa de lixamento e polimento. As amostras foram lixadas com lixas de carbetto de silício até a granulometria de 1200, e polidas em alumina nas granulometrias de 6 e 1  $\mu\text{m}$ . Uma etapa adicional de polimento eletrolítico foi conduzida em uma solução de 1,8 %  $\text{HBF}_4$  + 98,2 %  $\text{H}_2\text{O}$ , durante 15 segundos a uma diferença de potencial de 15 V.

Para visualização e registro das imagens foi-se utilizado um microscópio óptico (fabricante Olympus, modelo BX51) com polarizador de luz, instalado na Votorantim Metais, Alumínio – SP. Com intuito de visualizar toda a região em que foi realizado o processamento, foi-se utilizado uma baixa ampliação (20X).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Macrografia das chapas processadas

Nas Figuras 4 e 5 estão apresentadas as macrografias das chapas processadas com ordem de processamento 1º, 2º e 3º passes, e processadas com ordem 1º, 3º e 2º passes respectivamente, com as velocidades de rotação de (a) 650, (b) 980 e (c) 1380 rpm.

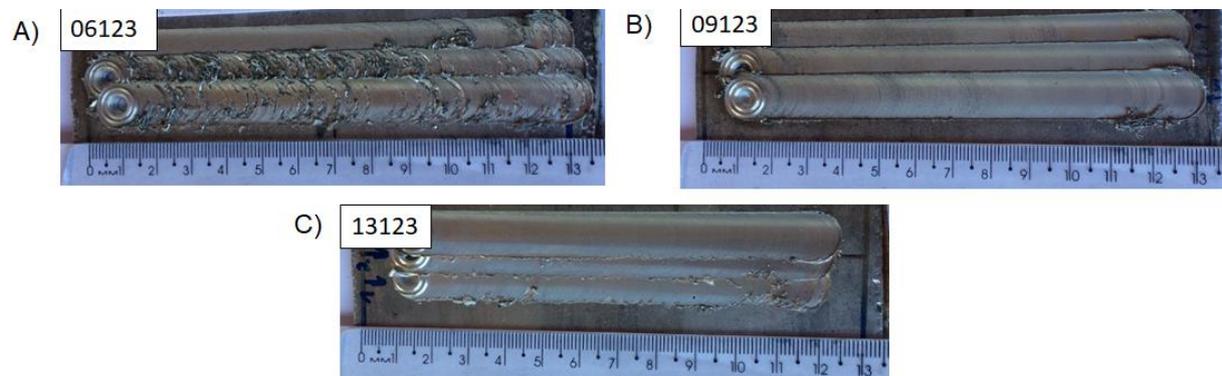


Figura 4 - Chapas processadas com ordem de passes 1º, 2º, e 3º com velocidade de rotação de a) 650, b) 980 e c) 1380 rpm.

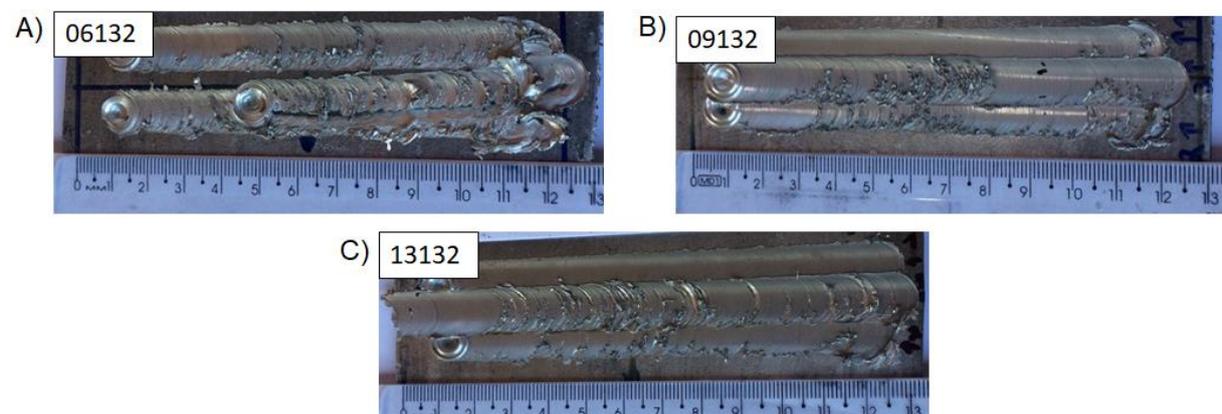


Figura 5 - Chapas processadas com ordem de passes 1º, 3º, e 2º com velocidade de rotação de a) 650, b) 980 e c) 1380 rpm.

De acordo com a Figura 4 e Figura 5 (a) as chapas processadas com velocidade de rotação de 650 rpm proporcionaram um menor atrito e possivelmente uma menor temperatura obtida na linha de processamento. Esta temperatura obtida é de extrema importância, pois sendo baixa, pode fazer com que o metal não obtenha a temperatura mínima necessária para que ocorra o estado plastificado do metal, e sendo assim o escoamento de metal plastificado ao longo do pino da ferramenta acontece de maneira difícil, provocando uma grande quantidade de rebarbas e defeitos no interior da região processada.

Na figura 5 (a) observa-se que além da grande quantidade de rebarbas, houve um desvio da ferramenta no 3º passe (passe central), embora o eixo transversal a

direção de processamento estivesse fixada na fresadora. Este desvio pode ser justificado pela elevada força necessária para executar o processamento da chapa, no qual a mesma também foi influenciada pela maior vibração do cabeçote da máquina (devido uma maior resistência da proporcionada pela chapa), e desta forma, o percurso da ferramenta foi desvio para a região que a força necessária para realizar o FSP fosse menor. Sendo assim, pode-se inferir que a região submetida ao FSP apresenta uma dureza menor do que o metal base.

Outro fato observado para as chapas que foram processadas com ordens de passes 132, é que ao realizar o 1º passe (chapa inicialmente a temperatura ambiente) com as velocidades de rotação de 980 e 1380 rpm, estes não apresentaram nenhum defeito, no que diz respeito a presença de rebarbas, e ao realizar o 2º passe a uma distância central do 1º passe de 1,5 mm, houve uma pequena quantidade rebarbas. Ao realizar o 3º passe, no qual foi entre os passes 1 e 2, a quantidade de rebarba presente no 2º passe, provocou uma quantidade enorme de rebarbas no 3º passe. Este fato se deve, a rebarba do 2º passe não estar devidamente fixada na superfície da chapa, e sendo assim, esta não foi aquecida à mesma temperatura que a porção de metal local, somado ao sentido de rotação da ferramenta, não foram perfeitamente misturadas pelo segundo passe.

Como pode ser observado nas Figuras 4 (b) e (c) uma velocidade de rotação maior (980 e 1380 respectivamente) e a ordem de passes 1, 2 e 3, proporcionaram condições quase ideais para se obter um perfeito processamento das chapas da liga de alumínio 1050, pois durante o processamento conseguiu-se atingir temperaturas suficientes para obter-se uma deformação plástica severa e um perfeito escoamento do metal plastificado ao longo do pino da ferramenta, sem resultar em muitas rebarbas. Para estas duas amostras é esperado que a amostra 13123, se existirem, apresente uma quantidade relativamente pequena de defeitos internos, pois da mesma forma como foi mencionado anteriormente, rebarbas provocam falta interna de metal.

### 3.2 Análise microestrutural das chapas processadas

As Figura 6, 7 e 8, apresentam as microestruturas obtidas por microscopia óptica por luz polarizada de amostras das chapas de alumínio antes do processamento, das amostras (a) 06123, (b) 09123 e (c) 13123, e das amostras (a) 06132, (b) 09132 e (c) 13132, respectivamente.

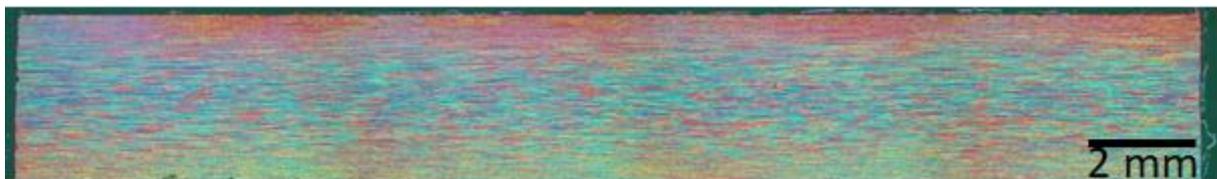


Figura 6 - Micrografia sob luz polarizada - seção transversal da chapa de alumínio antes do FSP.

Como pode ser observado na Figura 6 (a), a chapa da liga de alumínio 1050 apresenta grãos alongados na direção de laminação, e após o processamento independente dos parâmetros utilizados (Figura 7 e 8), é observado um aparente elevado refinamento de grão.

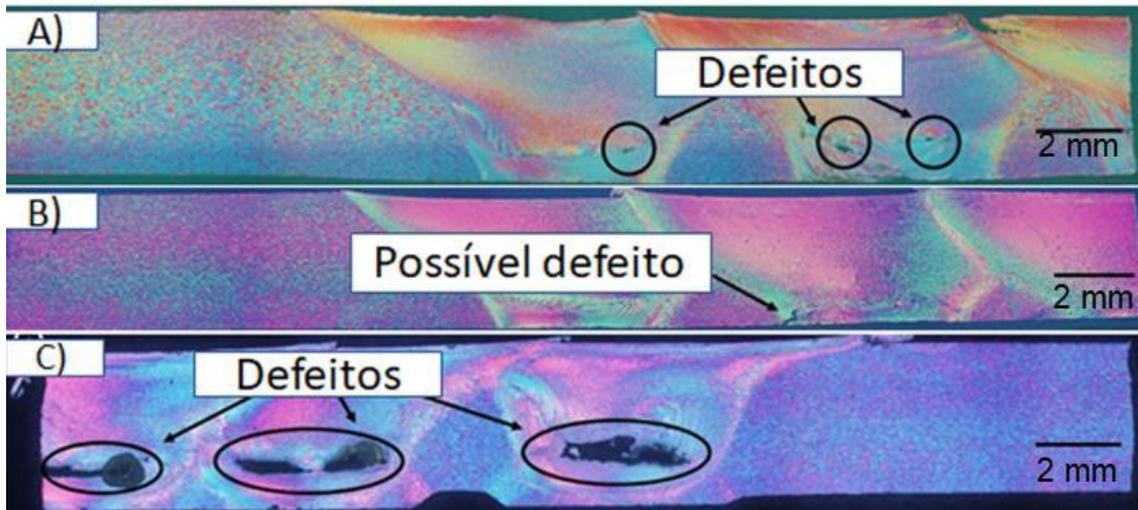


Figura 7 - Micrografia sob luz polarizada na seção transversal das amostras: (a) 06123, (b) 09123 e (c) 13123.

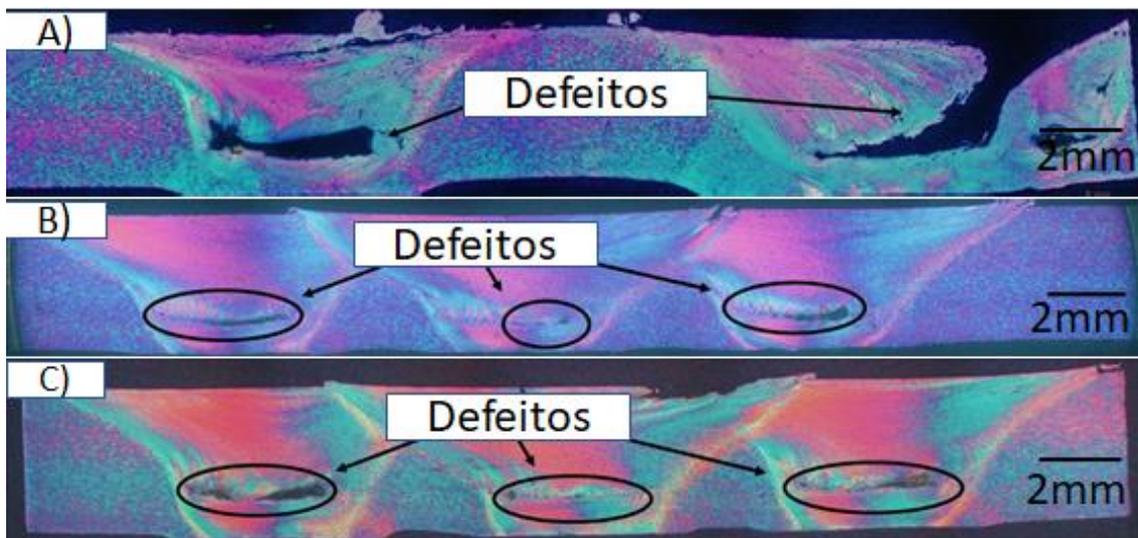


Figura 8 - Micrografia sob luz polarizada na seção transversal das amostras: (a) 06132, (b) 09132 e (c) 13132.

Nas Figuras 7 e 8, é observado que ao realizar o FSP das chapas, obtém-se o processamento de toda a espessura da amostra, e há a presença de defeitos no *nugget* chamados de “wormholes” [10], os quais são caracterizados por um “túnel” ao longo do *nugget*. A geração deste defeito, ou seja, a falta de material para preenchimento do *nugget*, pode ser devido as distorções das raízes, pois as amostras 09132 e 06123 apresentaram pequenas distorções das raízes, e conseqüentemente apresentaram “wormholes” relativamente pequenos, ao contrário das condições 06132, 13132 e 13123 que apresentaram maiores distorções nas raízes e conseqüentemente maiores “wormholes”. Por sua vez, a distorção da raiz das chapas processadas, possivelmente foi gerada devido a pequenas diferenças entre o cobre-junta e a mesa fixadora das chapas.

Estudos que relacionam o efeito da rotação da ferramenta com o surgimento de defeitos são realizados por alguns autores como é o caso de ESMAEILI [16]. Em seu trabalho, ESMAEILI [16] comparou a influência das velocidades de rotação da ferramenta para a qualidade final de uma soldagem por fricção (processo que é similar ao FSP), e verificou que a frequência de defeitos, como por exemplo, o

*wormholes*, aumentam para velocidades de rotação muito altas e muito baixas. Comportamento similar ocorreu para o presente estudo, onde a velocidade intermediária, ou seja, amostra 09123 apresentou um melhor aspecto visual. A amostra 09123 apresenta uma região que pode ser possivelmente um defeito, porém este defeito ao contrário dos outros, não aparenta ser contínuo, ou seja, não vai de uma extremidade a outra da chapa. Sendo assim, aliada ao seu excelente aspecto superficial, com os parâmetros usados, a amostra 09123 foi a que melhor apresentou resultados quanto ao processamento da chapa de alumínio 1050.

### 3 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir:

- A amostra 09123 apresentou os melhores resultados quanto ao processamento da chapa de alumínio 1050;
- Foi evidenciado um aparente elevado refinamento microestrutural na região processada (independente do parâmetro utilizado) em relação ao metal antes do processamento;
- As amostras 06132, 06123, 09132, 13132 e 13123 apresentaram defeitos denominados “*wormholes*”, e estes defeitos possivelmente estão ligados as distorções nas raízes.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica dos alunos Santos, K. F. e SOUZA, C. A. C.; à Companhia Brasileira de Alumínio pela doação das chapas de alumínio 1050 e ao CEFET-RJ pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

1. ASM HANDBOOK. Properties and Seletion: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM: volume 2, 1990.
2. PADILHA, AF, SICILIANO Jr F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. Editora ABM, 3ª edição, São Paulo, 2005.
3. PEREIRA, Leandro Henrique. Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio 6061 com 1,4%p Fe Processada por Conformação por Spray de Extrusão a Quente [dissertação]. São Carlos, 2017.
4. INFOMET. Alumínio comercialmente puro (Série AA 1XXX). Acesso em: 23 mar. 2019.
5. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=49>.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO [página da internet]. Estampagem. ABAL. Acesso em: 02 maio 2018. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/estampagem/>.
7. OLIVEIRA, Janaina CPT. Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de pureza [tese]. Universidade de São Paulo (USP), 2009.
8. SZURKALO, M. Investigação do Efeito de Moléculas Auto-organizáveis na Resistência à Corrosão da Liga de Alumínio 1050 [dissertação]. IPEN, 2009.
9. MORRIS Jr. JW. The influence of grain size on the mechanical properties of steel. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. 2001.

10. GIBSON BT, LAMMLEIN DH, PRATER TJ, LONGHURST WR, COX CD, BALLUN, MC, *et al.* Friction Stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, n° 16, 2014.
11. MAHONEY MW. Friction-Stir Processing. Rockwell Scientific Company LLC. 2006.
12. GENICOLO, Marco AC. Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método Friction Stir Welding em estruturas aeronáuticas [dissertação]. Escola politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.
13. MISHRA RS, Ma, ZY, Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, n° 50, p. 1-78, 2005.
14. OLIVIECKI, NJ, Beskow, AB. Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga de Alumínio. *Perspectiva, Erechim*. v.37, n° 138, 2013.
15. BUFFA, G, FRATINI RS. Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model. *Materials Science and Engineering*. n° 419; p. 381-388, 2005.
16. ESMAEILI A, BESHARATI GIVI MK, ZAREIE RAJANI. A metallurgical and mechanical study on dissimilar Friction Stir welding of aluminum 1050 to brass (CuZn30). *Materials Science and Engineering*. n° 528; 2011. p. 7093-7102.