

## CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO ALUMÍNIO AA1050 SUBMETIDO À JUNÇÃO POR LAMINAÇÃO ASSIMÉTRICA ACUMULADA (JLAA)

Renan Pereira de Godoi, renangodoi@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Felipe Bento de Almeida, felipe.bentoalmeida@gmail.com<sup>2</sup>

Andrea Madeira Kliauga, kliauga@ufscar.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos - Campus São Carlos

**Resumo:** Processos de deformação plástica severa (DPS) induzem a uma alta resistência mecânica, tenacidade, vida em fadiga e resistência ao desgaste. O que distingue um processo DPS em particular de outros processos é o tipo do fluxo viscoplástico e o caminho da deformação. Assim, esses processos conduzem a um elevado nível de cisalhamento e são caracterizados por uma deformação não-conservativa, que irá produzir uma distribuição cristalográfica bastante aleatória e baixa anisotropia. Estudos anteriores mostraram que amostras de alumínio AA1050 recozidas, posteriormente processadas por extrusão em canal angular (ECA) atingiram melhor conformabilidade que o mesmo material processado por laminação convencional. No entanto, o ECA é pouco adequado para a produção de produtos finais em forma de chapa, e a junção por laminação acumulada (JLA) induz à mesma textura que a laminação convencional. Com isso, uma alternativa pode ser encontrada associando as técnicas de laminação assimétrica e junção por laminação acumulada, aqui denominada JLAA (junção por laminação assimétrica acumulada). Esta técnica, através de um alto nível de deformação e cisalhamento proporciona um novo método para a junção de chapas, que irá corroborar para a obtenção das propriedades desejadas. O processo JLAA foi realizado em um laminador de laboratório, com rolos superior e inferior de diferentes diâmetros, na razão de 1,0:1,5. O material de partida utilizado foi o alumínio AA1050 com 2mm de espessura, laminado até a espessura de 1mm, então recozido a 350°C durante 5 minutos. A junção foi realizada dobrando a chapa de 1mm ao meio, reduzindo sua espessura em 50% durante a laminação. Esse procedimento foi repetido 4 e 6 vezes, com tratamentos térmicos de recozimento entre as laminações. As amostras foram caracterizadas micro estruturalmente para mostrar a eficiência da junção e foi realizado um ensaio de microdureza vickers para avaliar a homogeneidade da deformação ao longo da espessura.

**Palavras-chave:** laminação assimétrica, deformação plástica severa, multi-junção.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, esforços em pesquisas são realizados com o objetivo de produzir materiais com granulometria submicrométrica ou até mesmo nanométrica, desde que a redução do tamanho do grão seja benéfica para as propriedades mecânicas do material. Sabe-se que elevados níveis de deformação, como ocorre na laminação a frio, pode resultar no refinamento microestrutural. No entanto, como existem limites para a deformação total que pode ser imposto aos materiais, as estruturas formadas são geralmente subgrãos que possuem contornos de baixo ângulo. (SU, 2014)

Tendo como objetivo o exposto acima, processos de deformação plástica severa podem produzir materiais com granulometria refinada, separada por muitos contornos de grão de alto ângulo, através da introdução de uma grande quantidade de deformação plástica. De acordo com Beausir (2010), os materiais produzidos dessa forma apresentam alta resistência específica, apresentando potencial utilização na indústria automobilística e aeroespacial.

O que distingue um processo de deformação plástica severa de outros processamentos é o tipo de fluxo viscoplástico e o caminho para que ocorra a deformação, dessa forma, os processos que conduzem a um elevado nível de cisalhamento, e que são caracterizados por um caminho de deformação não conservativo produzirão uma distribuição cristalográfica bastante aleatória e uma anisotropia mais baixa.

Os processos de deformação plástica severa mais conhecidos até o momento são a extrusão em canal angular (ECA), junção por laminação acumulada (JLA) e torção por alta pressão. O processo ECA é um dos mais utilizados em termos de DPS. Esse fato foi mostrado em um estudo anterior de Kliauga (2015), no qual amostras de alumínio AA1050 submetidas ao recozimento após a deformação em ECA alcançaram maiores índices de conformabilidade que quando produzidas por laminação convencional, porém quando se trata da produção de chapas finas a técnica de junção por laminação acumulada passa a ser considerada como uma das técnicas mais promissoras para a obtenção de materiais com granulometria ultrafina (SU, 2014; BEAUSIR, 2010; KLIAUGA 2015)

Sabe-se que o processo de junção por laminação é um processo de solda na fase sólida. Os mecanismos para essa junção a frio são entendidos como a fratura de uma camada superficial frágil, formada por um filme óxido, seguido pelo

contato entre o material abaixo dessa camada entre as duas chapas, ocorrendo a coalescência do material base com a superfície oposta. (SU, 2014)

Durante a junção por laminação, o processo é conduzido em duas chapas de mesma dimensão, que são empilhadas uma sobre a outra. O processo de laminação não proporciona apenas altas quantidades de deformação plástica, como também uma união entre as duas chapas. Para que a união ocorra é realizado um tratamento superficial nas chapas, que envolve as etapas de corte, escovamento e limpeza da superfície a ser unida, tratamento térmico e empilhamento para laminação. O tratamento térmico, de acordo com Jaamati (2011) é um dos fatores que mais afetam na melhoria da junção entre as chapas. O autor dá grande ênfase para os tratamentos térmicos de recozimento que são realizados antes da laminação, pois estes facilitam a quebra de camadas superficiais e sua sucessiva ligação entre camadas de metal ausente de oxidação, além de proporcionar, em partes, a energia requerida para a formação da ligação atômica entre os átomos da junção. Tratamentos térmicos posteriores à laminação também são sugeridos pelo mesmo autor, principalmente por ativar processos difusionais atômicos, porém os tratamentos térmicos prévios à laminação tendem a ser mais eficientes. (JAAMATI, 2011).

No intuito de otimizar a diminuição no tamanho de grão, algumas variáveis de processo podem ser alteradas, como a velocidade de laminação, o tempo de tratamento térmico, o gradiente de deformação, dentre outras. No que diz respeito ao aumento do gradiente de deformação, a laminação assimétrica pode ser uma boa alternativa. Esse processo necessita de um laminador especial, com rolos que possuem diâmetros diferentes, gerando então velocidades angulares diferentes, de modo que o ponto neutro da região em contato com o rolo mais lento se desloque para a entrada da laminação e o ponto da região em contato com o mais veloz se desloque para a saída, friccionando uma chapa sobre a outra. O atrito gerado entre essas superfícies de contato trabalha em sentidos opostos, gerando assim tensões de cisalhamento. A zona de cisalhamento gerada aumenta com o aumento da diferença de velocidade entre os rolos. A deformação resultante é similar a um estado de deformação plana com compressão ao longo da direção normal, juntamente com cisalhamento ao longo da direção de laminação (XING, 2004). A laminação assimétrica leva vantagem sobre outras técnicas de DPS por ser um processo contínuo. A introdução dessa deformação cisalhante adicional à deformação compressiva do processo de laminação contribui para o efeito de subdivisão dos grãos, produzindo um refinamento microestrutural e modificando a textura cristalográfica, o que acarreta na melhora de várias propriedades da chapa processada, obtendo assim grande potencial para aplicação industrial de materiais com granulometria ultrafina. (NILSSON, 2012; ANGELLA, 2013).

Materiais com granulometria ultrafina apresentam aumento significativo em propriedades mecânicas como dureza e limite de escoamento. Su (2014) estudou a influência da laminação acumulada após 1, 3 e 5 ciclos de laminação. Para o primeiro caso, a dureza ao longo da espessura da amostra teve menores valores no centro da chapa, aumentando gradualmente para a superfície, o que pode ser explicado pelo refinamento microestrutural causado pela deformação cisalhante próxima a superfície. Após o terceiro ciclo de laminação, a chapa apresentou dureza elevada na proximidade da superfície e nas interfaces formadas, com ambos valores maiores se comparados com a chapa submetida a apenas um ciclo. A elevada dureza próxima a superfície é devido também à deformação de cisalhamento, causada pela fricção entre a chapa e os rolos, e a dureza elevada próxima às interfaces se deve a dois fatores principais: ao refinamento microestrutural e à possível existência de partículas de óxido ao longo da interface da junção. Após o quinto ciclo de laminação, a dureza média aumentou, em detrimento do refinamento microestrutural, e a distribuição da dureza ao longo da chapa se tornou mais randômica, com pouca diferença entre a superfície e as interfaces. (SU, 2014)

Tendo em vista a influência da laminação assimétrica e da laminação acumulada na redução do tamanho de grão dos materiais, alguns trabalhos de junção por laminação assimétrica acumulada (JLAA) podem ser encontrados na literatura, utilizando ambos processos na obtenção de uma estrutura mais refinada. Esse trabalho tem como objetivo mostrar resultados preliminares obtidos em termos da efetividade da junção e da influência desse processo na dureza do material.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da laminação assimétrica acumulada foi utilizado um laminador de laboratório modelo Coelho LE 200, que possui rolos com diferentes diâmetros em uma mesma velocidade de rotação. A razão entre o rolo superior e o rolo inferior utilizados foi de 1,5. Conforme evidenciado por Vega (2014), o processo da laminação assimétrica é muito dependente do atrito entre a placa e os rolos, por causa disso, os rolos utilizados receberam um recartilhado em sua superfície para evitar o escorregamento excessivo das chapas durante o processo. O material de partida consistiu em uma chapa de alumínio AA 1050 com 2mm de espessura, que foi laminada assimetricamente até a espessura de 1mm e então recozida a 350°C por 1 hora.

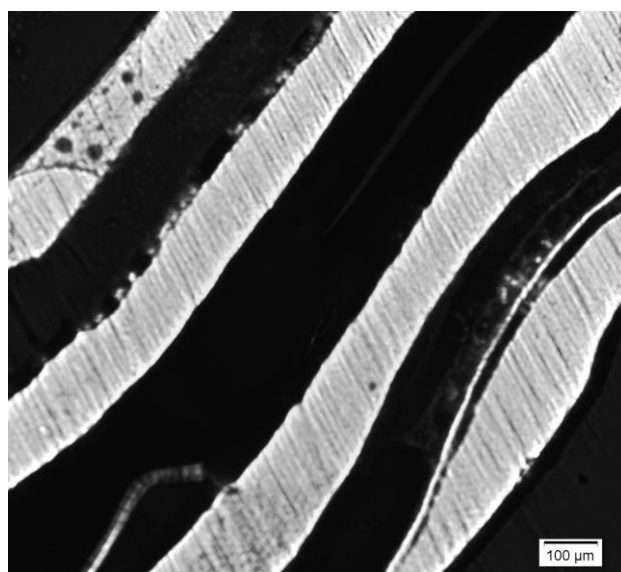
A amostra JLAA1 foi obtida a partir do seguinte procedimento: corte da chapa em dois pedaços, limpeza superficial por escovamento, empilhamento das chapas, laminação assimétrica com redução de 50% da espessura e recozimento a uma temperatura de 350°C por 5 minutos. As amostras JLAA2 e JLAA3 foram obtidas por um procedimento diferente: dobra da chapa ao meio, recozimento a 350°C por 5 minutos e laminação assimétrica com redução de 50% da espessura do material. Na amostra JLAA2 esse procedimento foi repetido 4 vezes, gerando 16 camadas de alumínio sobrepostas e

na amostra JLAA3 o processo foi repetido 6 vezes, obtendo assim uma amostra com 64 camadas de alumínio sobrepostas.

Para a observação das junções por microscopia óptica foi realizado um ataque químico nas amostras que passaram pelo segundo procedimento, para revelar as junções. As amostras JLAA 2 e JLAA 3 foram imersas em uma solução de hidróxido de sódio, com concentração de 0,5 mol/L durante 20 segundos. As junções foram caracterizadas por microscopia óptica, com auxílio de um microscópio Olympus BX 51, com aumento de 100x antes e depois do ataque químico. Nas amostras JLAA 2 e JLAA 3 foram realizados testes de microdureza Vickers, aplicando uma carga de 300g durante 15 segundos, com o objetivo de verificar a homogeneidade da deformação ao longo da espessura das amostras.

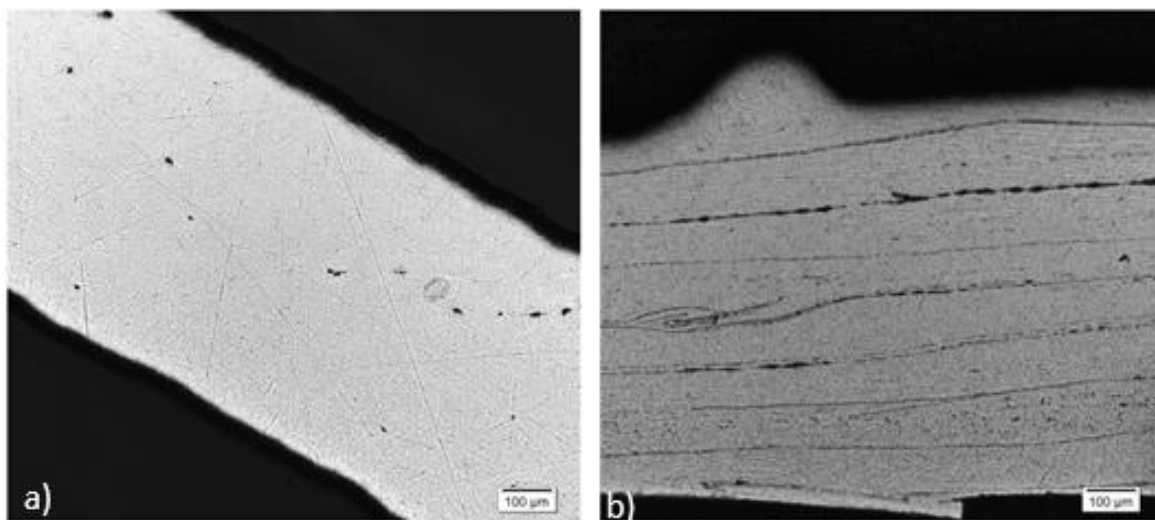
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura (1) refere-se à imagem de microscopia óptica referente à amostra JLAA1, que foi submetida ao procedimento de junção por laminação assimétrica, conforme descrito na seção anterior. Como pode ser observado não houve junção efetiva entre as chapas de alumínio, o que demandou na mudança do processo, acrescentando a etapa de recozimento anterior à laminação assimétrica.



**Figura 1 – Microscopia óptica com aumento de 100X da amostra JLAA1**

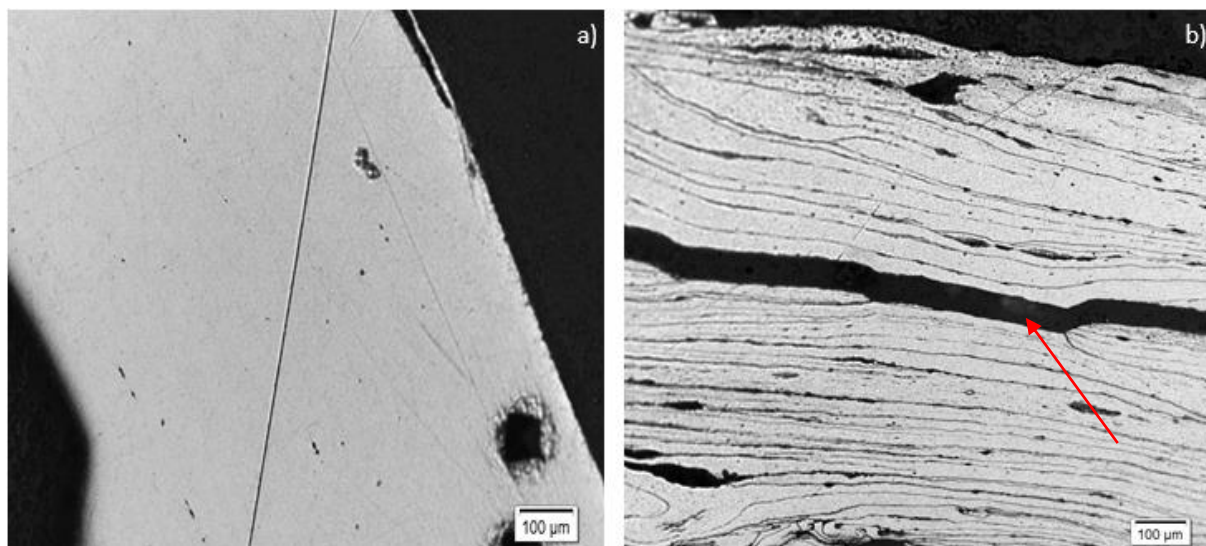
As Figuras (2a) e (2b) referem-se a microscopia óptica realizada na amostra JLAA2, com 16 camadas, submetidas ao recozimento anterior à laminação, visualizadas antes e após o ataque químico respectivamente.



**Figura 2 – Microscopia óptica com aumento de 100X: (a) Amostra JLAA 2 sem ataque químico; (b) Amostra JLAA 2 com ataque químico**

Na Figura (2a) é possível observar a alta eficiência da junção entre as chapas de alumínio, sem qualquer fissura ou interface aparente, conforme apresentado no trabalho de Jaamati (2011), onde é ressaltado a importância do tratamento térmico anterior. Na Figura (2b) é possível observar as regiões de interface entre as 16 camadas empilhadas.

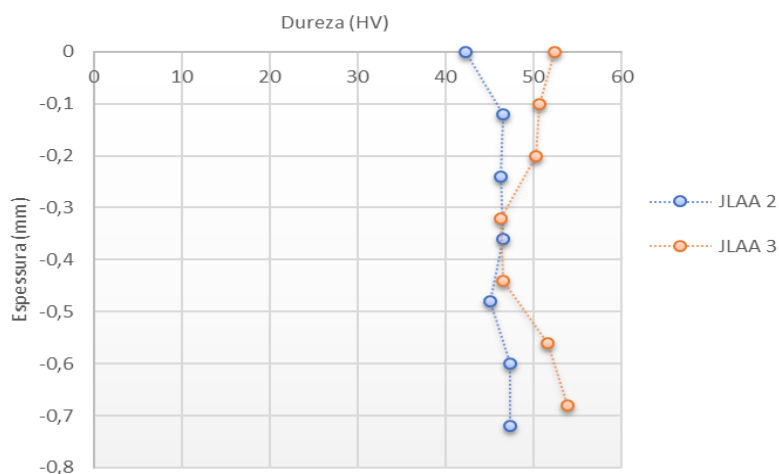
A imagem obtida por microscopia óptica da amostra JLAA3 antes e após o ataque químico, é mostrada nas Figuras (3a) e (3b):



**Figura 3 – Microscopia óptica com aumento de 100X: (a) Amostra JLAA 3 sem ataque químico; (b) Amostra JLAA 3 com ataque químico**

Assim como na amostra JLAA 2 sem ataque químico, na Figura (3a) não é possível identificar qualquer interface aparente que caracterize as junções, revelando a alta eficácia da junção quando o processo é realizado com etapas intermediárias de recozimento. A Figura (3b) refere-se à amostra atacada quimicamente, onde é possível observar claramente as interfaces entre as várias camadas de alumínio que foram sobrepostas. Na amostra JLAA3, com 64 camadas é possível observar uma divisão evidente, mostrada pela seta vermelha. Essa região, que mostra uma certa divisão deve-se provavelmente ao limite máximo de encruamento sustentado pela amostra, ou seja, a partir dessa quantidade de deformação, nas condições de realizadas de processamento, não é possível a junção.

Foi realizado um ensaio de microdureza Vickers no intuito de investigar a influência desse processamento no aumento da dureza do material e possivelmente correlacionar esse fator à diminuição do tamanho de grão devido ao elevado encruamento. A Figura 4 mostra as medidas de dureza em função da distância em relação à espessura da amostra:



**Figura 4 – Valores de microdureza Vickers em função da espessura da amostra**

Para a amostra JLAA2, o perfil de dureza é similar ao apresentado por Su (2014) em uma amostra com 5 ciclos, pois observa-se uma distribuição randômica da dureza ao longo da chapa, sem diferenças marcantes entre a superfície e o centro da chapa. No caso da amostra JLAA3, é possível observar um aumento nos valores de dureza nas regiões superficiais, devido ao cisalhamento causado pela fricção entre chapa e rolos, assim como mostrado por Su (2014). Na região central da amostra JLAA3 observa-se uma diminuição nos valores de dureza, o que provavelmente se deve à zona em que não houve junção, evidenciada pelas imagens de microscopia óptica mostradas anteriormente.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo alcançar uma junção efetiva entre chapas de alumínio pelo processo de laminação assimétrica acumulada e avaliar a influência desse processamento na dureza do material. Uma amostra inicial, denominada amostra JLAA1 foi submetida ao processamento, porém sem exibir uma junção efetiva, o que demandou de mudanças no processo, como a adição de um tratamento térmico anterior à laminação. Com essa nova etapa adicionada ao processo, as amostras JLAA2 e JLAA3 apresentaram junções efetivas entre 16 e 64 camadas respectivamente, sem apresentar trincas ou interfaces aparentes. Quando submetida ao ataque químico, a amostra JLAA3 exibiu um grande espaçamento na porção central, o que pode ser explicado pelo alto grau de encruamento dessa região, impossibilitando a junção. As amostras JLAA2 e JLAA3 foram submetidas a ensaios de dureza ao longo da espessura, e apresentaram perfis de dureza condizentes aos mostrados na literatura. Os aumentos nos valores de dureza serão correlacionados futuramente com a granulometria do material, que será analisada por microscopia eletrônica de varredura.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Fatec Sorocaba pela disponibilidade de equipamentos e de pessoal para a realização dos ensaios de microdureza.  
Ao Departamento de Engenharia de Materiais – Dema Ufscar São Carlos.  
À CAPES pelo aporte financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Angella, G., Esfandiar Jahromi, B., Vedani, M., 2013, “A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, pp. 742-750.
- Beausir, B., Scharnweber, J., Jaschinski, J., Brokmeier, H.-G., Oertel, C.-G., Skrotzki, W., 2010, “Plastic anisotropy of ultrafine grained aluminium alloys produced by accumulative roll bonding”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp.3271-3278.
- Jaamati, R., Toroghinejad, M.R., 2011, “Cold roll bonding bond strengths: review”, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108.
- Kliauga, A.M., Bolmaro, R.E., Ferrante, M., 2015, “The Evolution of Texture in equal channel pressed aluminium AA1050”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 623, pp. 22-31
- Nilsson, A., Salvator, I., Putz, P.-D., Goldhahn, G., Malbrancke, J., 2012, “Using asymmetrical rolling for increased production and improved material properties”, *EUR 25061 – Publications Office of the European Union*, 171 pp.
- Su, L., Lu, C., Li, H., Deng, G., Tieu, K., 2014, “Investigation of ultrafine grained AA 1050 fabricated by accumulative roll bonding”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 614, pp.148-155.
- Vega, M.C.V, Bolmaro, R.E., Ferrante, M., Sordi, V.L., Kliauga, A.M., 2015, “The influence of deformation path on strain characteristics of AA1050 aluminium processed by equal-channel angular pressing followed by rolling”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 646, pp. 154-162
- Xing, Z.P., Kang, S.B., Kim, H.W., 2004, “Structure stability of AA 3003 alloy with ultra-fine grain size”, *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 1259-1265.

## MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF AN ASYMMETRIC ACCUMULATIVE ROLL BONDED (AARB) OF AA 1050 ALUMINIUM ALLOY

Renan Pereira de Godoi, renangodoi@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Felipe Bento de Almeida, felipe.bentoalmeida@gmail.com<sup>2</sup>

Andrea Madeira Kliauga, kliauga@ufscar.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate program in Materials Science, Federal University of São Carlos – Campus Sorocaba

<sup>2</sup>Department of Materials Engineering, Federal University of São Carlos – Campus São Carlos

**Resumo:** All severe plastic deformation (SPD) processes induces a very high yield strength, toughness, fatigue life and wear resistance. What distinguishes a particular SPD process from the other is the kind of viscoplastic flow and the deformation path. Thus, those processes that lead to a high level of shear and are characterized by a non-conservative deformation path, will produces a quite random crystallographic distribution and lower anisotropy. Our previous studies have shown that annealing of Al commercial purity (AA 1050), which has been processed by equal channel pressing (ECAP) attains better conformability than the same material processed by conventional rolling or ECAP followed by rolling. However, ECAP is poorly suited for producing plate shaped end products, and accumulative roll bonding (ARB) alone induces the same texture as rolling; hence an alternative can be found in the association of the asymmetric rolling technique to the ARB process, here named AARB (asymmetric accumulative roll bonding). This technique promotes a high deformation level and a great degree of shear, creating a new method to joint plates. The deformation was performed in a laboratory rolling mill with different diameters of rolls rotating at the same angular speed. The ratio of the roll diameters was 1.5. The starting material was a fully annealed AA1050 aluminum sheet of 2mm thickness, which was asymmetric rolled to an initial thickness of 1mm and then annealed at 350°C for 1 hour. AARB was performed stacking two sheets and asymmetric rolling to 50% reduction. This procedure was repeated 4 to 6 times with intermediate annealing treatments at 350°C for 5 minutes. The samples were microstructural characterized by metallographic tests to prove the efficiency of bonding. Vickers hardness test was performed to verify the homogeneity of strain.

**Keywords:** asymeric rolling, severe plastic deformation, multijunction