

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO DURANTE A LAMINAÇÃO ASSIMÉTRICA PARA DIFERENTES RELAÇÕES DE VELOCIDADE TANGENCIAL NA LIGA AA1050.

Felipe S. Nascimento¹, Bianca D. Zanchetta², J. R. Benaque³, V. Sordi¹,

R.E. Bolmaro⁴, A. M Kliauga¹

1. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, DEMA São Carlos – SP.
2. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, PPGCM, Sorocaba – SP.
3. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, **DEMEC São Carlos** – SP.
4. Instituto de Física de Rosario - Rosario Argentina

Felipe S.Nascimento¹

Universidade Federal de São Carlos, Rod Washington Luis, km 235, Depto de Eng. de Materiais,
13565-905 São Carlos - SP

felipesoares.txt@gmail.com

Resumo

A laminação assimétrica aumenta a tensão de cisalhamento durante a deformação através da modificação da relação de velocidades entre os rolos superior e inferior. Isso modifica a textura do material deformado e a anisotropia de conformação durante processos de estampagem profunda. Neste trabalho foram quantificadas as deformações equivalentes e a porcentagem de cisalhamento induzida na laminação de amostras de alumínio AA1050 para relações de velocidade de 1,5 e 2,0 e taxas de redução de espessura por passe de 10%. Os resultados experimentais foram comparados com a simulação numérica utilizando o programa DEFORM V10. Com o aumento da diferença relativa de velocidades tangenciais houve um aumento do cisalhamento imposto ao sistema. Medidas de textura mostraram que a houve uma rotação da orientação cristalográfica com o aumento da deformação por cisalhamento.

ABSTRACT

The asymmetrical rolling (AR) increases the shear strain during deformation by changing the speed ratio between the superior the inferior rolls. This will modify the texture of the deformed material and its plastic anisotropy during deep drawing. In this work we quantified the equivalent deformation and the induced percentage of shear of AR AA1050aluminum at speed ratios of 1,5and 2,0 at 10% thickness reduction per pass. The experimental results were compared with the numerical simulation using DEFORM V10. Increasing the tangential speed ratio yielded higher shear strains. A rotation of the

crystallographic orientation around the transverse axis was observed with the increase of the shear strain.

Palavras-chave: laminação assimétrica; alumínio, simulação numérica, textura cristalográfica

INTRODUÇÃO

A modificação da textura de deformação e de recozimento em ligas de Al é de grande interesse tecnológico, pois a textura cubo normalmente obtida após o recozimento de chapas laminadas reduz a conformabilidade desse material. Estudo anterior mostrou que amostras de Al AA1050 recozidas após a deformação por extrusão em canal angular (ECA), alcançaram maiores índices de conformabilidade do que quando produzidas por laminação convencional [VEGA (2015)]. O processo ECA, no entanto, não é adequado para a produção de chapas finas e normalmente ele é empregado na produção de tarugos.

Uma alternativa de deformação por cisalhamento que também gera uma rotação da orientação cristalográfica com relação à típica de laminação e tem forma de processamento mais apropriada para a produção de chapas é a laminação assimétrica. Esse processo necessita de um laminador especial dotado de rolos com diâmetros diferentes, ou alternativamente, de rolos girando com velocidades diferentes. Contrariamente à laminação convencional, em que a posição do ponto neutro (ponto em que a superfície da chapa tem a mesma velocidade que a superfície do rolo laminador) é igual para o rolo superior e o inferior, na laminação assimétrica a diferença de velocidades faz com que o ponto neutro da região em contato com o rolo mais lento se desloque para a entrada da laminação e o ponto neutro da região em contato com o mais veloz se desloque para a saída. Neste intervalo o atrito entre as superfícies de contato trabalha em sentidos opostos, gerando assim tensões de cisalhamento; naturalmente, o comprimento da zona de cisalhamento aumenta com o aumento da diferença de velocidade dos rolos [MAKSIMOV E. A. (2011)].

Da mecânica elasto-plástica a deformação equivalente é dada por

$$\varepsilon_{eq} = \left\{ \frac{2[\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)}{2}]}{3} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Durante a laminação convencional o modo de deformação é planar, ou seja, $\varepsilon_x = \varepsilon_z$, $\varepsilon_y = 0$, $\gamma_{xy} = \gamma_{zy} = \gamma_{xz} = 0$. Sendo assim a deformação equivalente pode ser descrita por

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_y \quad (2)$$

Onde $\varepsilon_y = -\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$ h e h_0 sendo a espessura final e inicial da chapa.

Já na LA o grau de deformação equivalente teórico da laminação assimétrica por diferentes diâmetros de rolos pode ser calculado conforme a equação (3) [KANG et al., (2005)]

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[6 \left[\ln \left(1 - \frac{h_i - h_f}{h_i} \right) \right]^2 + \frac{6}{(h_i + h_f)^2} \times \left[R_1 \cos^{-1} \left(\frac{2R_1 - (h_i - h_f)}{2R_1} \right) - R_2 \cos^{-1} \left(\frac{2R_2 - (h_i - h_f)}{2R_2} \right) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Onde h_i representa a espessura inicial da chapa, h_f espessura final, R_1 e R_2 os raios dos rolos de laminação.

A deformação pode ser também medida a partir do ângulo θ da deformação de cisalhamento, a deformação equivalente pode ser obtida pela equação (4): [DING (2009)]

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \left\{ 1 + \left[\frac{(1-r)^2}{r(2-r)} \tan \theta \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Onde $r = 1 - \frac{h_f}{h_i}$

Onde h_i representa a espessura inicial da chapa, h_f espessura final e θ o ângulo de inclinação da deformação por cisalhamento com relação ao eixo normal da chapa (ângulo entre sulcos, perpendiculares ao plano de laminação antes da laminação e que sofreram inclinação após a deformação assimétrica).

A introdução de deformação cisalhante adicional à deformação compressiva do processo de laminação convencional contribui para o efeito de rotação e subdivisão dos grãos produzindo refinamento da estrutura e modificação da textura cristalográfica, o que pode melhorar diversas propriedades da chapa processada [EUR 25061(2012)]. Com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros do processo neste trabalho foram quantificadas as deformações equivalentes e a

porcentagem de cisalhamento induzida na laminação de amostras de alumínio AA1050 para relações de velocidade de 1,5 e 2,0 e taxas de redução de espessura por passe de 10%.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado experimentalmente neste trabalho foi o alumínio AA1050 na forma de chapas produzidas pelo processo TRC (*twin roll caster*) pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Foi realizado um recozimento a 350°C por 1 h antes de se iniciar a deformação.

Em um laminador convencional foram modificados os diâmetros dos rolos, de modo a obter relações de 1:1,5 e 1:2 entre as velocidades tangenciais, com a metade da extensão do par de rolos destinada a cada relação. O dimensionamento dos rolos foi realizado em CADE o material utilizado para sua confecção foi a liga de aço VC-131. Usinados conforme o projeto, os novos rolos tiveram, então, sua superfície submetida a um processo de recartilhagem (FIGURA 1) e endurecimento por indução, com objetivo de reduzir o escorregamento da chapa durante a laminação. Devido ao perfil de deformação, com grande curvatura na parte frontal da amostra laminada, foram adicionadas mesas de apoio.



FIGURA 1 - Detalhe da superfície recartilhada e mesas de apoio

As amostras foram laminadas sempre seguindo o mesmo sentido e direção, sem rotação, com redução de 10% partindo de uma espessura final de

aproximadamente 6,5mm até uma redução de espessura de cerca de 70% (2mm). A chapa foi inicialmente marcada em suas laterais com sulcos ortogonais ao plano de laminação em espaçamentos de cerca de 10 mm em prol de medir a deformação angular durante o processo. As amostras foram nomeadas LA15 ou LA20 para $r_1/r_2 = 1,5$ e $r_1/r_2 = 2,0$ respectivamente, seguidas pelo número de passes.

Para a análise metalográfica, as chapas de alumínio foram polidas e anodizadas eletroquimicamente em solução de 2,0% de ácido fluobórico diluído, a 20V por 5 minutos. Microscopia óptica sob luz polarizada foi utilizada para revelar os grãos.

As amostras foram lixadas e polidas para que fosse analisada a textura da região central das chapas. As figuras de polo (111), (200) e (220) foram obtidas em um difratômetro Philips X-pert pro MPD com radiação $\text{CuK}\alpha$, localizado no IFIR - Argentina.

Para a análise de elementos finitos foi utilizado o software DEFORM-3D V10 e material similar, listado na livraria do software, sob o código "AL1100, COLD [70F(20C)]". O sistema de laminação é composto por cilindro superior e inferior, mesa de entrada e saída, e "empurrador" segundo as dimensões do equipamento experimental, assim como velocidade de rotação dos cilindros – 23 RPM –. A geometria da malha da chapa foi montada com 100 elementos de secção transversal e 36 camadas para as Laminações Assimétricas (LA) e 100 elementos com 36 camadas para a Laminação Convencional (LC). Foi definida uma relação de atrito de 0,9 entre a chapa e cada rolo, e de 0,1 entre a chapa e as demais partes. Para as LA, foi utilizado o método incremental (Lagrangiano) e para a LC, o método estacionário (ALE), sendo os parâmetros para ambos mantidos conforme o padrão do software.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A FIGURA 2 mostra a microestrutura do material após o recozimento (FIGURA 2a) e após a laminação assimétrica com uma redução de espessura de 50% (FIGURAS 2b e 2c). Tanto para a amostra LA15p6 quanto para a amostra LA20p6 foi observado o alongamento dos grãos na direção de laminação.

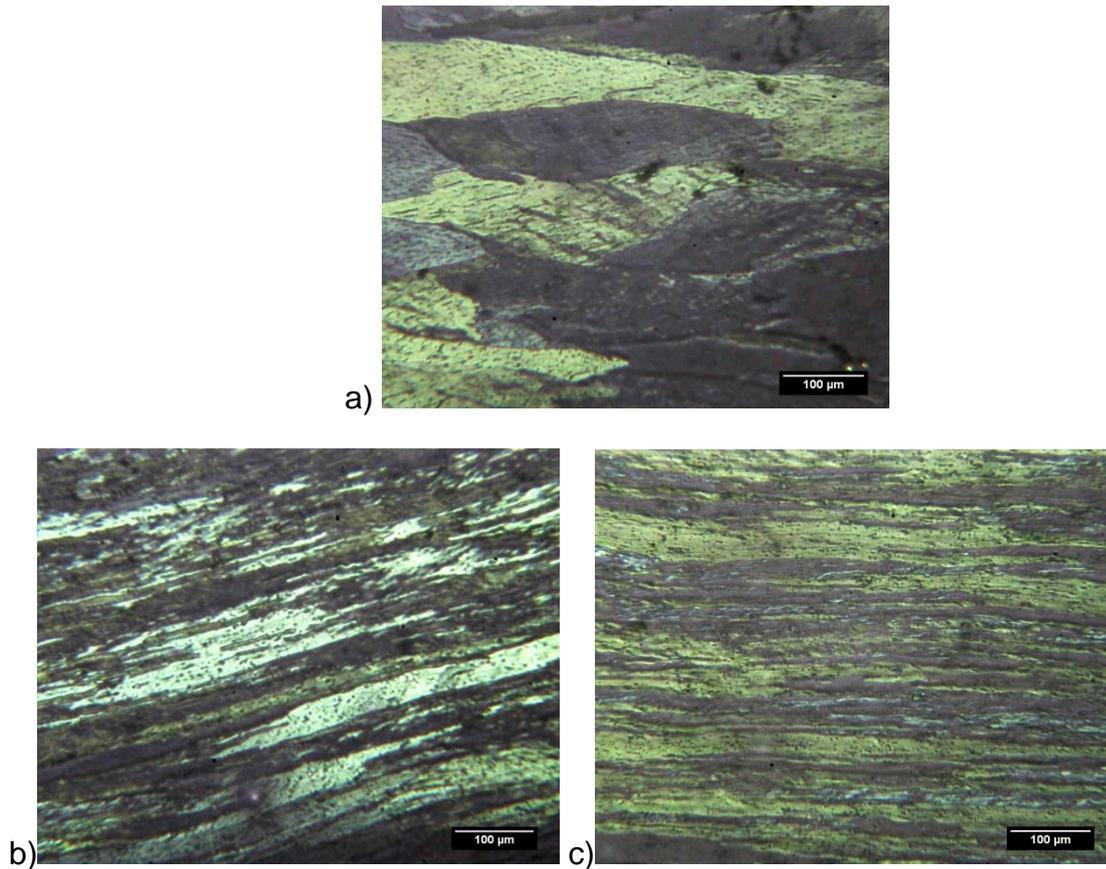


FIGURA 2 - Microestruturas das amostras a) como recozida; b) LA15p6; c) LA20p6

A FIGURA 3 compara os resultados obtidos entre o cálculo da deformação equivalente utilizando as equações teóricas (2) e (3) para a laminação convencional e assimétrica e a experimental (4) obtidos a partir da medida da inclinação dos marcadores das amostras. Ocorreu uma boa concordância entre os valores obtidos e medidos na LA, com uma variação maior nas amostras LA20 (relação entre diâmetro de rolos de 2). A laminação assimétrica induz a uma deformação equivalente maior do que a laminação convencional e este aumento é proporcional à relação de diâmetros do laminador.

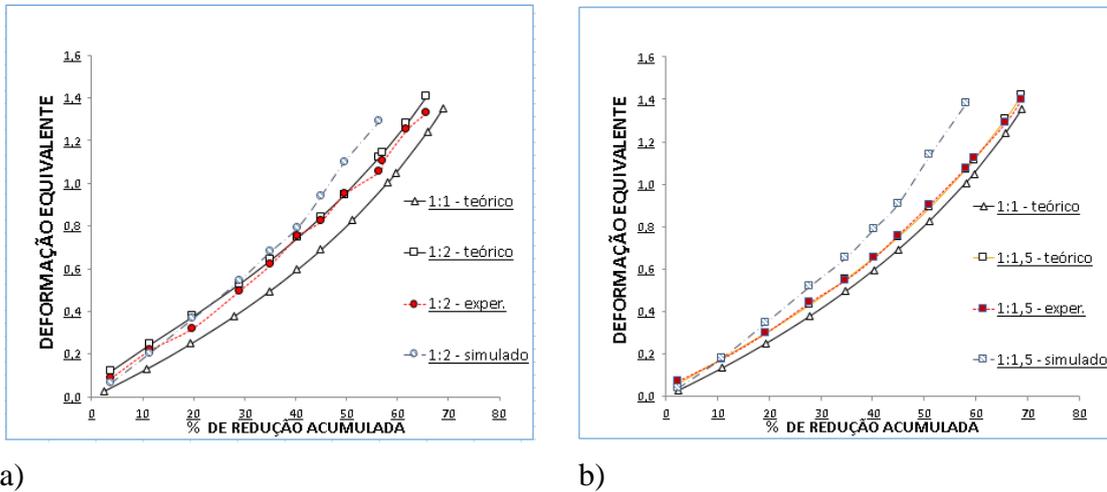


Figura 3 - Evolução da deformação equivalente com o aumento de % de redução de espessura acumulada na chapa calculados pelas equações (3) e (4) e obtidos pelos marcadores na laminação experimental. Em a), LA20, em b), LA15.

A FIGURA 4 mostra uma comparação entre a inclinação obtida nos marcadores da amostra após uma redução de espessura de 50% e a inclinação da malha de elementos finitos. Na amostra se obteve uma inclinação de $62,8^\circ$ e na malha temos uma inclinação de $62,7^\circ$, mostrando uma aproximação boa entre as medidas experimentais e as obtidas na simulação numérica. Um outro fator que chama a atenção na malha de deformação é que há um gradiente tanto na deformação ε_z quanto na deformação angular ε_{xz} ao longo da espessura, o que indica que há uma variação da intensidade de deformação nesta direção.

Esta variação de deformação equivalente é apresentada no gráfico da FIGURA 5, que mostra a ε_{eq} entre os passes 6 e 7 em três pontos da chapa: próximo ao rolo superior (P1), centro (P2) e próximo ao rolo inferior (P3). Na região central a deformação é menor do que próximo às superfícies e há uma diferença de deformação entre a superfície superior e a inferior que diminui entre um passe e outro. Mostrando que a deformação é heterogênea no início do processo e tende a se uniformizar quando a espessura da chapa diminui.

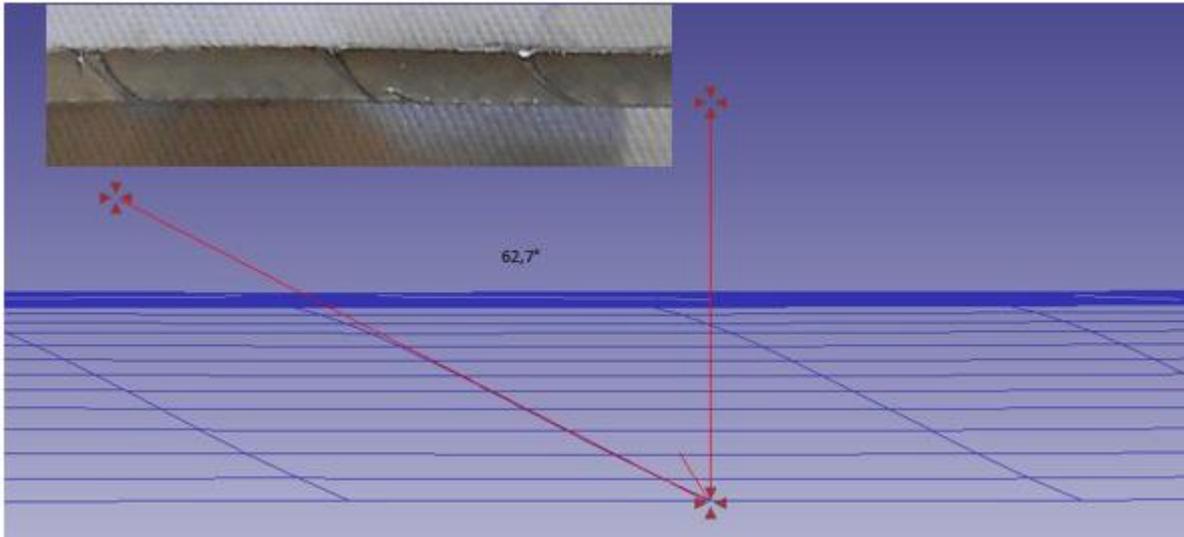


Figura 4 - Comparação entre o marcador da laminação experimental e a inclinação da malha de elementos finitos utilizada durante a simulação numérica: LA 20p9.

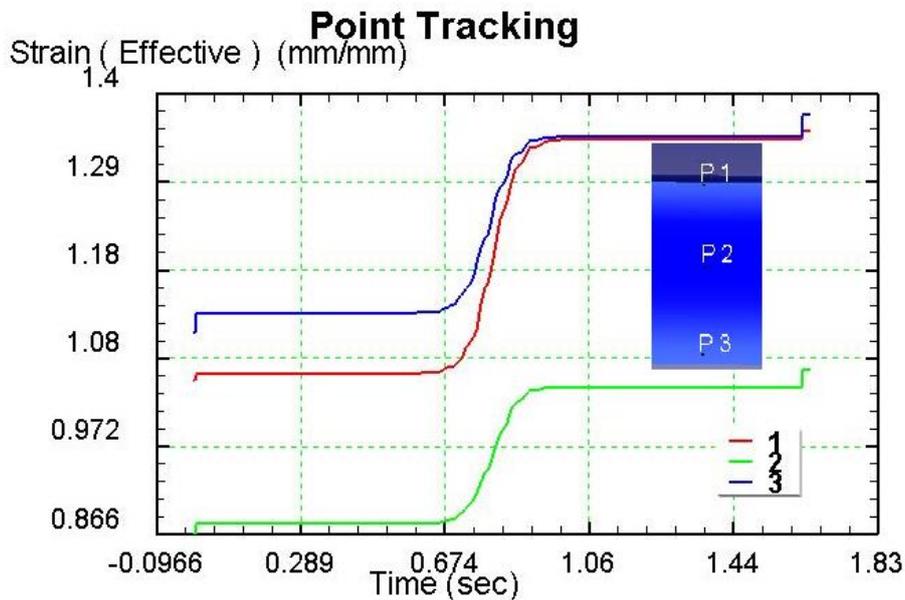


Figura 5 - Variação da deformação equivalente em três pontos da malha ponto 1 superfície junto ao rolo maior, 2, centro e 3, superfície inferior junto ao rolo menor entre o 6º e o 7º passe.

Um outro aspecto a ser considerado, é a contribuição do cisalhamento na deformação. No gráfico da FIGURA 6 foram controladas as posições 1, 2 e 3 e separadas as contribuições de ϵ_z , e γ_{xz} da deformação. Foi estabelecido um fator denominado n , sendo

$$n = \frac{\gamma_{xz}}{\epsilon_x} \quad (5)$$

e comparadas nas relações de diâmetro de 1,5 e 2,0 e na laminação convencional. Quanto maior o valor de n maior a contribuição do cisalhamento na deformação equivalente. O fator n é mais elevado na laminação assimétrica e a contribuição do cisalhamento é maior próximo aos rolos do que no centro da chapa, tanto para a série LA quanto para a laminação convencional. Há uma inflexão na curva das amostras LA, com uma diminuição inicial da contribuição do cisalhamento; a laminação convencional, porém, mantém a taxa de cisalhamento baixa e praticamente constante ao longo do processo. Na LA a diferença de cisalhamento imposto na superfície e no centro aumenta com o aumento da deformação. Uma das causas prováveis para o decréscimo no início da LA pode ser o encruamento do material. Já o aumento da contribuição do cisalhamento a partir do sexto passe pode estar associado à redução da espessura da chapa. Também foi observada uma imposição maior de cisalhamento no centro das amostras LA20 quando comparadas às LA15.

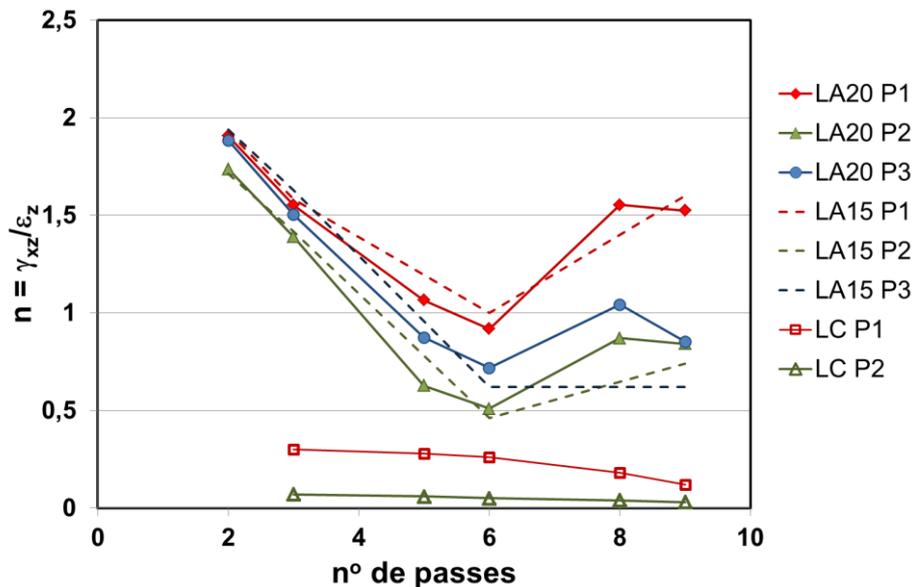


Figura 6 - Fator $n = \gamma_{xz}/\epsilon_z$ para a laminação assimétrica (LA 15 e LA20) e a laminação convencional (LC) em função do número de passes de laminação.

Finalmente a FIGURA 7 mostra as figuras de polo (111) da região central das chapas tendo como eixos de referência as direções z paralela a direção normal (DN) e x paralela à direção de laminação (DL). Após o recozimento a região central

tinha como textura predominante a textura cubo {001}<100>que tem um dos polos de direção cubo paralelo ao eixo transversal (y).

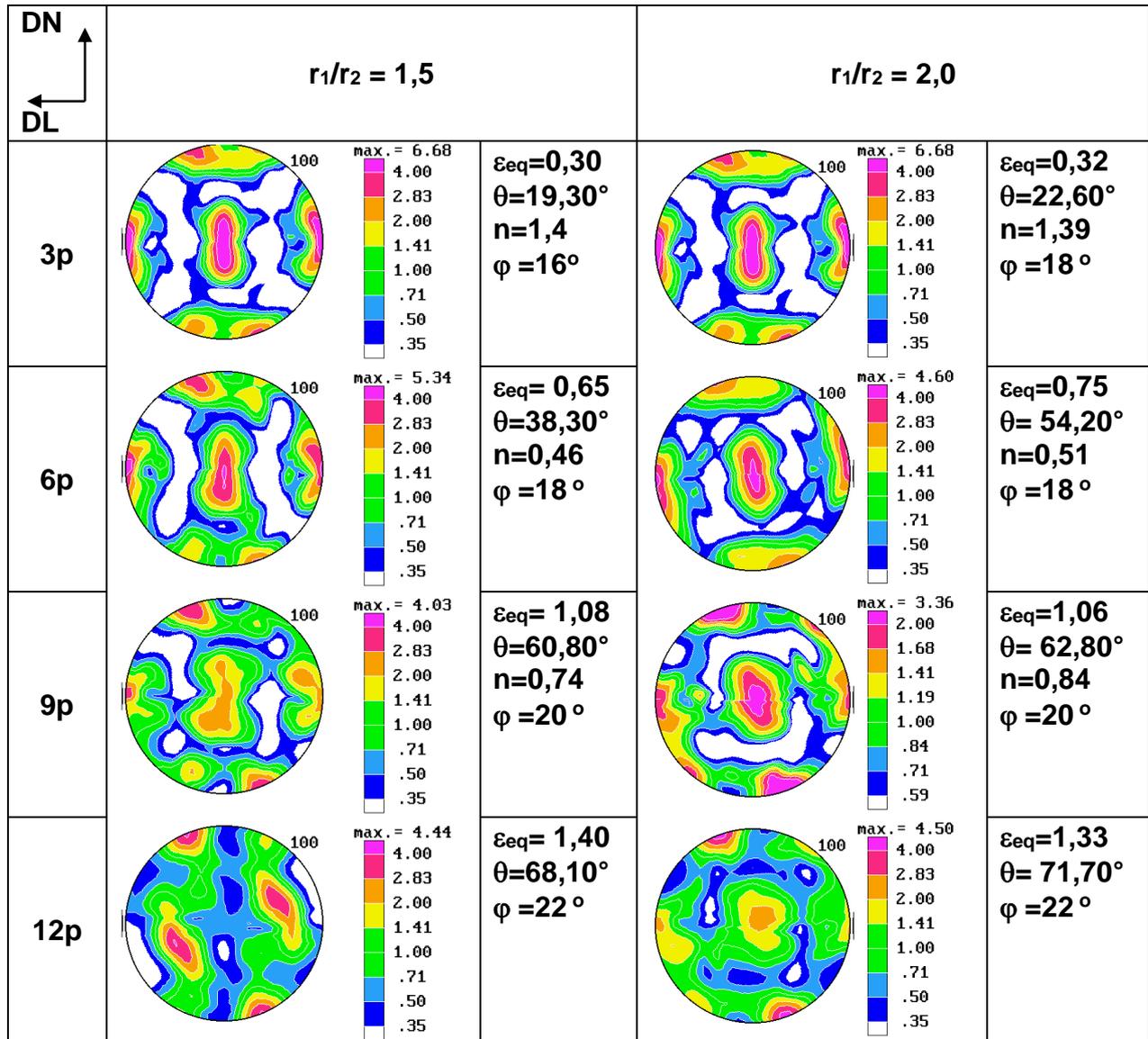


FIGURA 7 - Evolução da textura cristalográfica através das figuras de polo dos planos {100}. Região examinada: centro das chapas após a laminação assimétrica variando a deformação equivalente entre 0,30 (3 passes) e 1,40 (12 passes) para relação entre diâmetros de rolo (r_1/r_2) de 1,5 e 2,0. São dados os valores medidos de deformação equivalente (ϵ_{eq}), ângulo de distorção da malha (θ), relação entre γ_{xz}/ϵ_z (n) e ângulo de rotação da textura cubo (φ).

O eixo transversal é o eixo invariante do processo de LA e pode-se observar como a orientação cristalográfica gira ao redor deste eixo com o aumento da deformação. A rotação variou de 18° no terceiro passe para 22° no décimo segundo

passe, não sendo observada diferença muito significativa entre as relações de diâmetro de 1,5 e 2,0. Do nono ao décimo segundo passe ocorreu uma distorção do eixo de rotação e uma diminuição de intensidade do polo (100) // DT. Ao mesmo tempo a intensidade de textura das figuras de polo diminuiu com o aumento da deformação.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o efeito da imposição de cisalhamento na deformação de chapas de alumínio AA1050 através da laminação assimétrica, com uma redução de espessura de cerca de 70%. Nas relações de diâmetros de 1,5 e 2,0 foi medido um aumento da deformação equivalente do sistema com o aumento da diferença de velocidades entre rolo superior e inferior. Na LA a distribuição de deformação é bastante heterogênea e é mais acentuada próximo à superfície da chapa. A contribuição do cisalhamento na deformação também é mais acentuada na superfície do que no centro da chapa. Encruamento e espessura interferem na distribuição desta deformação. Ocorreu rotação da orientação cristalográfica ao redor do eixo invariante (direção transversal da chapa) e uma diminuição na intensidade da textura cristalográfica com o aumento da deformação por cisalhamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (bolsa de iniciação científica ligada ao projeto 449009/2014-9), à CAPES (bolsa de mestrado institucional PPGCM - UFSCar) e à FAPESP (projeto 2016/10997-0) pelo apoio ao trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- Ding Y., Jiang J., Shan A., Microstructures and mechanical properties of commercial purity iron processed by asymmetric rolling, *Materials Science and Engineering A* v.509, p. 76–80, 2009.
- EUR 25061 -European Commission Report,— Using asymmetrical rolling for increased production and **improved** material Properties , Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012.
- KANG S.-B., MIN B.-K., KIM H.-W., WILKINSON D. S.,KANG J., Effect of Asymmetric Rolling on the Texture and Mechanical Properties of AA6111-Aluminum Sheet, *Metall. Mater. Trans. A*, v.36, p.3141-3149, 2005.

MAKSIMOV E. A., Research into an Additional Mechanism of Lowering the Pressure and Increasing the Compressions during the Asymmetric Rolling of Strips of Aluminum Alloys, Russian Journal of Non Ferrous Metals, v. 52, No. 1, p. 29–32, 2011.

VEGA M.C.V., BOLMARO R.E., FERRANTE M., SORDI V.L., KLIAUGA A.M. The influence of deformation path on strain characteristics of AA1050 aluminium processed by equal-channel angular pressing followed by rolling *Mater Sci Eng A* v.646, p. 154 -162 , 2015.