

EFEITO DO FATOR DE ESCALA PARA OS CONTORNOS DE GRÃOS NA MICRO ESTAMPAGEM INCREMENTAL MÚLTIPLOS PONTOS

Gustavo Coser Monteiro Dias¹

Sérgio Henrique Evangelista²

¹Escola de Engenharia de São Carlos; ²Universidade Federal de São Carlos

¹gustavo.dias@usp.br; ²toddyprof@ufscar.br

Luciana Montanari³

³Escola de Engenharia de São Carlos

montanar@sc.usp.br

Resumo. A técnica de micro conformação incremental múltiplos pontos surgiu no sentido de diminuir o tempo de fabricação de micro componentes, em relação à técnica de conformação incremental de único ponto. Este trabalho apresenta o estudo do efeito do fator de escala no comportamento do material quando se realiza o processo de conformação incremental múltiplos pontos, via análise por elementos finitos no software ABAQUSTM. Os ensaios consistiram em analisar uma chapa de alumínio puro com 500 μm de espessura e grãos com tamanho médio de 9 μm . Para essas condições o efeito do fator de escala foi irrelevante no processo de deformação, o que indica que para grãos de tamanho médio da ordem de 2 % da espessura, o material ainda pode ser considerado poli cristalino e, portanto, pouco sensível ao número de contornos de grãos na resistência mecânica.

Palavras chave: Micro estampagem. Contornos de Grão. Estampagem incremental múltiplos pontos. Efeito escala.

1. INTRODUÇÃO

A técnica da estampagem incremental é um processo de deformação plástica, com potencial para substituir as técnicas convencionais de estampagem e estampagem profunda na fabricação de pequenos lotes ou produções unitárias (Jeswiet, *et al.*, 2005 e Echrf e Hrairi, 2011). Como grande vantagem da técnica de conformação incremental sobre as convencionais destaca a simplicidade do ferramental, que normalmente consiste de uma ferramenta (punção) cilíndrica de ponta hemisférica (Attanasio, *et al.*, 2008; Hussain e Gao, 2007; Ben Hmida, *et al.*, 2013; McAnulty *et al.*, 2017), flexível e de baixo custo, de um suporte simples e de um prensa chapas, ilustrado conforme a Fig. 1.

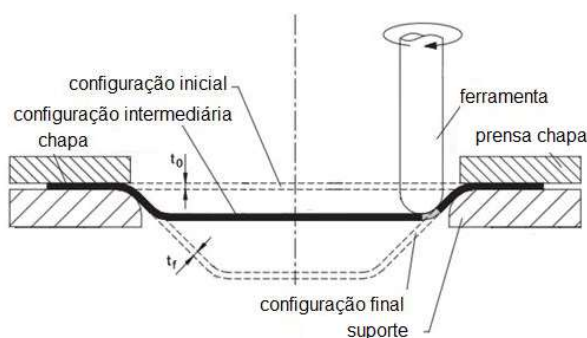


Figura 1. Representação esquemática da técnica de conformação incremental (Silva, *et al.*, 2008).

Como limitação da técnica de conformação incremental pode-se citar o elevado tempo de processamento, mas o aumento do limite de conformabilidade do material em relação àquele atingido pelos processos convencionais é tido como um ganho alcançado pela aplicação incremental das deformações (Silva, *et al.*, 2008). As deformações ocorrem devido ao contato da ponta da ferramenta com a superfície da chapa, o qual ocorre de maneira progressiva e localmente, de acordo com uma trajetória previamente definida.

Quando se trata de micro escala Kim, *et al.*, (2008), Peng, *et al.*, (2009), Gao e Cheng (2010), Chen, *et al.*, (2010), Lam, *et al.*, (2011), Chan, *et al.*, (2011), Deng, *et al.*, (2011), Ast e Durst (2013) e Xu, *et al.*, (2015) afirmam que há influência dos contornos de grãos, em função do tamanho destes, no comportamento do material durante a aplicação das cargas sobre a superfície da chapa. Quanto menores forem os grãos, maior será a quantidade de contornos e, portanto, maior a resistência que o material oferece à deformação. Peng, *et al.*, (2009) e Xu, *et al.*, (2015) aplicaram um fator de

escala ao comportamento do material a fim de identificar e mensurar essa influência. Peng, *et al.*, (2009) e Xu, *et al.*, (2015) consideraram o material composto por grãos superficiais e internos e, para cada um desses determinaram uma parcela de contribuição da tensão de resistência ao carregamento. As Equações (1), (2) e (3) descrevem a atuação do fator de escala, assim como a contribuição dos grãos internos e superficiais na composição das tensões atuantes sobre o material, respectivamente.

$$\sigma = \eta * \sigma_s + (1 - \eta) * \sigma_i \quad (1)$$

$$\sigma_s(\varepsilon) = m * \tau(\varepsilon) \quad (2)$$

$$\sigma_i(\varepsilon) = M * \tau(\varepsilon) + \frac{k(\varepsilon)}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

Pelas Equações (1), (2) e (3), σ representa a tensão equivalente no material, η , o fator de escala, σ_i , a tensão relativa aos grãos internos, σ_s , a tensão relativa aos grãos superficiais, m e M são os fatores de orientação em mono e policristais, respectivamente, τ é a tensão de cisalhamento crítica do material monocristalino, k é a tensão de cisalhamento crítica do material policristalino, d é o tamanho médio dos grãos e ε é a deformação equivalente do material. O fator de escala aplicado nos estudos de Peng, *et al.*, (2009) e Xu, *et al.*, (2015) foi obtido como sendo a razão entre o tamanho médio dos grãos e a espessura da chapa avaliada, cujo valor sempre estaria entre 0 e 1. Quanto mais próximo de zero fosse esse fator, mais policristalino seria o material, ou seja, maior seria a quantidade de grãos internos e, portanto, menores os efeitos dos sobre a resistência do material gerados a partir de pequenas variações na espessura da chapa.

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre o efeito do fator de escala no comportamento do material quando se realiza o processo de conformação incremental múltiplos pontos, por meio de análises por elementos finitos. A conformação incremental múltiplos pontos difere da conformação incremental com ponto único pela quantidade de punções trabalhando simultaneamente e uma ferramenta auxiliar e, o estudo do efeito do fator de escala se faz importante a fim de verificar a influência na conformabilidade do material. Em termos das análises por elementos finitos, os estudos presentes são respaldados pelas considerações dos estudos do caso múltiplos pontos a partir de Boudhaouia S., *et al*, 2018 em comparação com estudos consolidados para o caso com ponto único, no caso de Arfa, *et al.*, 2013 e Henrard, *et al.*, 2011.

2. METODOLOGIA

Com o intuito de verificar o efeito do fator de escala na micro conformação incremental foram realizados dois estudos em elementos finitos pelo módulo de simulação explícita no software ABAQUS TM. O software foi parametrizado para realizar a simulação do comportamento de uma fina chapa de alumínio puro (500 μ m de espessura) submetida à ação simultânea de dois punções (Fig.2a) de ponta hemisférica de 1 mm de diâmetro, espaçados de uma distância “D” de 4 mm um do outro (Fig 2b). A configuração consiste de uma matriz inferior, de um prensa chapas e de uma ferramenta auxiliar. Tanto a matriz inferior quanto o prensa chapas foram considerados como corpos rígidos, assim como a ferramenta auxiliar e os punções. A chapa de alumínio foi considerada como corpo flexível e os dados do material foram abastecidos a partir dos resultados obtidos em um ensaio de tração conduzido de acordo com a norma ASTM E8/E8M – 16a (2016).

Por meio de análise metalográfica de uma amostra do material verificou que o tamanho médio de grãos é de aproximadamente 9 μ m. Disto, foi calculado o fator de escala η (de acordo com Peng, *et al.*, 2009 e Xu, *et al.*, 2015) de 0,018 que, por sua vez, foi utilizado para corrigir a curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira. A fim de confrontar os resultados alcançados por Peng, *et al.*, (2009) e Xu, *et al.*, (2015), a aplicação das Equações (2) e (3) nas simulações considerou para m e M os valores 2 e 3,06, respectivamente.

Para efeitos de comparação, os dois estudos realizados diferiram entre si apenas pelos dados de tensão e deformação verdadeiras, que variaram em função do fator de escala η . A malha possui elementos tipo casca com topologia dada por: quadrados de 0,18875 mm de tamanho médio para a chapa metálica, quadrados de tamanho médio de 2,2 mm e 2,0 mm para as matrizes inferior e superior, respectivamente e elementos quadrados de tamanho médio de 0,25 mm para a ferramenta inferior; elementos tetraédricos de tamanho médio de 0,0375 mm para a ponta dos punções e, elementos tetraédricos de 0,5 mm de tamanho médio para as hastes (Fig. 2b).

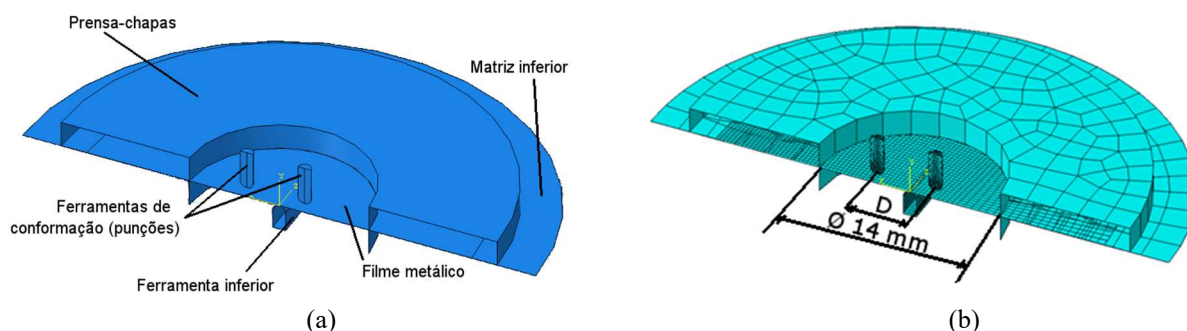


Figura 2 (a). Aparato desenvolvido para estudos via simulações por elementos finitos. (b). Malha com os elementos finitos escolhidos para os estudos em ABAQUS™ (fonte: próprio autor).

Para a realização das simulações foi considerado o uso do algoritmo de contato do tipo *penalty* para o modelo de atrito de Coulomb com coeficiente de atrito estático de 0,15 para materiais isotrópicos. Como condição de contorno para o prensa chapas foi considerado a restrição de movimento tipo engaste, sem qualquer carga prévia atuando sobre a superfície da chapa de alumínio. Todos os movimentos realizados pelos punções nas três direções (vertical e sobre o plano definido pela superfície da chapa, conforme indicado pela Fig.3a) ocorreram sob velocidade constante de 10 mm/s. Por se tratar de alumínio puro, os dados considerados para o material foram 2780 kg/m³ para a massa específica, 73,1 GPa para o módulo de Young e 0,33 para o coeficiente de Poisson.

Foram conformados dois canais “V” na superfície superior da chapa, conforme indicado pela Fig.3a. A fim de garantir a simplicidade da matriz inferior e do prensa chapas, optou-se por utilizar um disco de alumínio puro de 30 mm de diâmetro com espaço livre para translação das ferramentas de 14 mm de diâmetro (Fig 2a). Para a profundidade “H” (Fig.3a) dos canais “V” adotou-se 400 µm, atingidos após quatro incrementos verticais impostos ao movimento dos punções. Após cada incremento vertical dos punções foram descritos deslocamentos planares destes sobre a superfície da chapa, de modo a obter a extensão do canal (3 mm) e o perfil triangular da seção transversal do canal, segundo deformações registradas ao longo da direção principal 1 de deformações (Fig.3b).

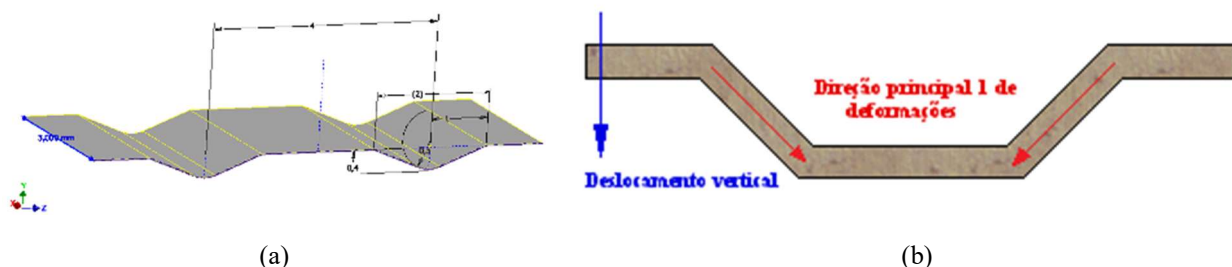


Figura 3 (a) Geometria da chapa conformada. (b) Esquema indicando a direção principal de deformações e o deslocamento vertical da chapa de alumínio puro (fonte: próprio autor).

3. RESULTADOS

O termo “tensão” utilizado a partir desta seção refere-se à tensão equivalente do material. A correção dos dados de tensão equivalente do material na curva tensão-deformação foi realizada conforme indicado pelas Eq. (1), (2) e (3). A Figura 4 mostra as duas curvas de tensão-deformação obtidas a partir do ensaio de tração e a corrigida conforme influência do fator de escala indicado pelas Eq. (1), (2) e (3). Nota-se claramente que o fator de escala promove um pequeno aumento da resistência à tração do material, devido à presença de um número maior de contornos de grãos na microestrutura do material.

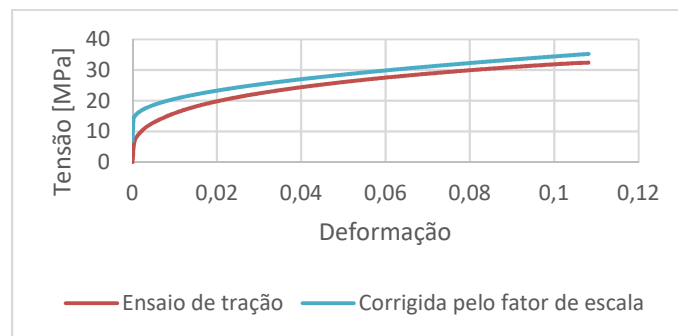


Figura 4. Curvas tensão-deformação original e corrigida pelo fator de escala.

Os resultados obtidos a partir dos estudos FEA01 (a curva original de tensão verdadeira versus deformação verdadeira) e FEA03 (tensão verdadeira versus deformação verdadeira corrigida em função do fator de escala) foram comparados em relação ao deslocamento vertical obtido pela superfície da chapa em contato com os punções e, em relação às deformações verdadeiras ocorridas ao longo da direção principal de deformações (Fig.3b). Os dados relativos ao deslocamento vertical e às deformações verdadeiras ocorridas foram tomados, para a seção transversal da chapa, a partir de uma posição intermediária dos punções em relação à extensão do canal “V” conformado, aproximadamente a 2,0 mm da posição em que ocorreu o passo vertical.

A atuação da ferramenta auxiliar em contato com a superfície inferior da chapa impediu que houvesse movimentos verticais no sentido do deslocamento dos punções (para baixo). A ausência de limitadores na superfície superior, logo acima da ferramenta inferior, permitiu o deslocamento da chapa verticalmente para cima em, aproximadamente, 0,1 mm (Fig. 5a). Há também dois vales, cujos pontos mínimos (da ordem de 0,1 mm) estão afastados em aproximadamente 4 mm, o que condiz com a distância estabelecida entre os dois punções. O deslocamento, contudo, pode indicar a ocorrência de retorno elástico do material após a passagem da ferramenta, uma vez que a profundidade desejada para cada canal (0,4 mm) não fora atingida. No entanto, é necessário considerar que a complexidade dos estados de tensão e deformação exige cuidado ao tentar separar este efeito do retorno elástico em relação ao efeito esperado decorrente da parcela das deformações elásticas face à variação volumétrica em cada ponto. Nota-se, porém, que não houve significativa diferença no comportamento da chapa em função da aplicação do fator de escala, o que provavelmente está associado ao valor deste (0,018) que, segundo Peng, *et al.*, 2009 e Xu, *et al.*, 2015, pode caracterizar um material policristalino, para o qual o efeito dos contornos de grãos não é relevante.

Os dados relativos às deformações verdadeiras, apresentados pela Fig.5b, também mostram a similaridade comportamental do alumínio puro em ambos os estudos, indicando, mais uma vez, a pouca influência dos contornos de grãos quando se possui um fator de escala pequeno.

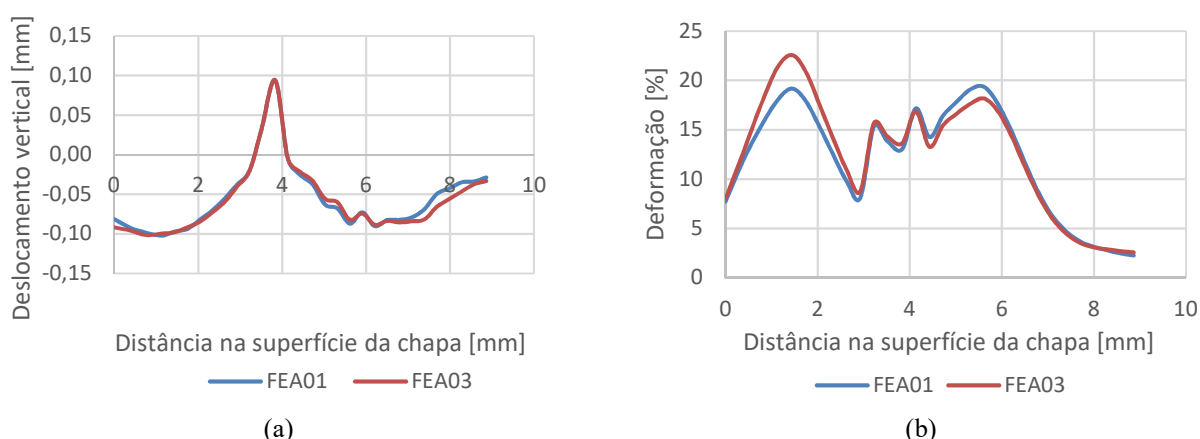


Figura 5 (a) Deslocamento vertical da chapa de alumínio ao longo da direção transversal ao canal conformado. (b) Deformações verdadeiras ao longo da direção transversal ao canal conformado (fonte: próprio autor).

Há dois picos de deformação verdadeira, representativos dos dois pontos mais profundos atingidos pela chapa durante o processo de micro conformação, cujos módulos se aproximam de 20% e se distanciam horizontalmente de aproximadamente 4 mm. A faixa intermediária em relação aos dois picos ocorridos (Fig. 5b) representa a região da chapa inicialmente em contato com a ferramenta inferior, para a qual foram registrados percentuais de deformação verdadeira em torno de 50 % a 75 % daqueles observados para o fundo dos canais “V”. Esse efeito provavelmente está associado ao

fato de não ter sido previsto nenhum limitador vertical que impedisse a chapa, na região de contato com a ferramenta inferior, de deformar-se e deslocar-se para cima (Fig. 5a) .

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que para materiais constituídos por grãos de tamanho médio da ordem de 2 % da espessura da chapa conformada, o efeito causado pelos contornos de grãos pode ser considerado irrelevante. Este trabalho de análises merece o respaldo de experimentações embasadas. Contudo, pode-se antecipar que outras análises poderão ser feitas a fim de identificar o limiar a partir do qual a influência dos contornos de grãos será mais relevante ao comportamento mecânico do material no processo, mesmo quando ponderadas as incertezas de modelagem e outras.

5. AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

6. REFERÊNCIAS

- ARFA, H. et al. Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts. *International Journal of Material Forming*, v. 6, n., p. 483-510, 2013. ISSN 1960-6214.
- ATTANASIO, A. et al. Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of materials processing technology*, v. 197, n. 1, p. 59-67, 2008. ISSN 0924-0136.
- AST, J.; DURST, K. Nanoforming behaviour and microstructural evolution during nanoimprinting of ultrafine-grained and nanocrystalline metals. *Materials Science and Engineering: A*, v. 568, p. 68-75, 2013. ISSN 0921-5093. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509312016085> >.
- ASTM E8 / E8M-16, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- BEN HMIDA, R. et al. Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. *Materials & Design*, v. 45, p. 155-165, Mar 2013. ISSN 0261-3069. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000312856800022 >.
- BOUDHAOUIA, S. et al. Experimental and numerical study of a new hybrid process: multi-point incremental forming (MPIF). *The International Journal of Material forming*, v. 11, n., p. 815-827, 2018. ISSN 1960-6214.
- CHAN, W. L.; FU, M. W.; LU, J. The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. *Materials & Design*, v. 32, n. 1, p. 198-206, 2011. ISSN 0261-3069. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910003869> >.
- CHEN, C. H.; LEE, R. S.; GAU, J. T. Size effect and forming-limit strain prediction for microscale sheet metal forming of stainless steel 304. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 45, n. 4, p. 283-299, 2010. ISSN 0309-3247.
- DENG, J. H.; FU, M. W.; CHAN, W. L. Size effect on material surface deformation behavior in micro-forming process. *Materials Science and Engineering: A*, v. 528, n. 13-14, p. 4799-4806, 2011. ISSN 0921-5093. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311002747> >.
- ECHRIF, S.; HRAIRI, M. Research and progress in incremental sheet forming processes. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 26, n. 11, p. 1404-1414, 2011. ISSN 1042-6914.
- GAO, H.; CHENG, G. J. Laser-Induced High-Strain-Rate Superplastic 3-D Microforming of Metallic Thin Films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 19, n. 2, p. 273-281, 2010. ISSN 1057-7157.
- HENRARD, C. et al. Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity. *Computational Mechanics*, v. 47, n., p. 573-590, 2011. ISSN 1432-0924.
- HUSSAIN, G.; GAO, L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 3-4, p. 419-435, 2007. ISSN 0890-6955. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506001611> >.
- JESWIET, J. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 54, n. 2, p. 88-114, 2005. ISSN 0007-8506.
- KIM, W. J.; YOO, S. J.; KIM, H. K. Superplastic microforming of Mg-9Al-1Zn alloy with ultrafine-grained microstructure. *Scripta Materialia*, v. 59, n. 6, p. 599-602, Sep 2008. ISSN 1359-6462. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000258239300006 >.
- LAM, Y. C. et al. New deformation phenomenon for micro-formability of polycrystalline materials. *Materials Science and Engineering: A*, v. 528, n. 3, p. 1906-1909, 2011. ISSN 0921-5093. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509310012864> >.
- PENG, L. et al. Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model. *Materials science and engineering: A*, v. 526, n. 1-2, p. 93-99, 2009. ISSN 0921-5093.

Dias, G. C. M., Evangelista, S. H., Montanari, L.

Efeito do fator de escala para os contornos de grãos na micro estampagem incremental múltiplos pontos

SILVA, M. et al. Single-point incremental forming and formability—failure diagrams. The journal of strain analysis for engineering design, v. 43, n. 1, p. 15-35, 2008. ISSN 0309-3247.

XU, Z. T. et al. Size effect affected formability of sheet metals in micro/meso scale plastic deformation: Experiment and modeling. International Journal of Plasticity, v. 68, p. 34-54, 2015. ISSN 0749-6419. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641914002174>>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Effect of scale factor for grain boundaries in Multiple Point Incremental Micro Forming

Gustavo Coser Monteiro Dias¹

Sérgio Henrique Evangelista²

¹São Carlos School of Engineering; ²Federal University of São Carlos

¹gustavo.dias@usp.br; ²toddyprof@ufscar.br

Luciana Montanari³

³São Carlos School of Engineering

montanar@sc.usp.br

Abstract. The multiple point incremental micro forming technique appeared in order to reduce the time of manufacture of micro components, in relation to the technique of single point incremental forming. This work presents the study of the effect of the scaling factor on the behavior of the material when performing the process of multiple point incremental micro forming, via finite element analysis in ABAQUSTM software. The tests consisted of analyzing a pure aluminum plate with 500 μm thickness and grains with medium size of 9 μm . For these conditions the effect of the scale factor was irrelevant in the deformation process, which indicates that for medium size grains of the order of 2 % of the thickness, the material can still be considered polycrystalline and therefore not sensitive to the number of grain boundaries in mechanical strength.

Keywords: Micro forming, Grain boundary, Multiple points incremental forming, Scale effect

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.