



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SEVERA ECAP E A VARIAÇÃO ECAP-CONFORM

Paulo S. Brandão Júnior^{1*}, Luis F. B. Ferreira¹, Nayara A. N. da Silva¹ e André F. Félix¹

1 – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG). Rua Itaguaçu, 595, São Caetano, Betim, CEP 32677-562, MG.

paulo.sbrandaojunior@gmail.com

RESUMO

As técnicas de deformação plástica severa (Severe Plastic Deformation- SPD) vem ganhando espaço dentre os processos que promovem o refino de grãos de materiais, através de deformações cíclicas por meio de tensões de cisalhamento. Dentre os processos SPD existentes, a extrusão angular por canais iguais (Equal Channel Angular Pressing – ECAP) se destaca por apresentar potencial para a produção de metais com granulação ultrafina e homogênea. Todavia, os materiais processados por ECAP são limitados pelo comprimento, devido ao curso do maquinário que realiza o processo e aos efeitos da flambagem, assim como às baixas velocidades de processamento que devem ser aplicadas. Sabendo que, para alcançar níveis de refino de grãos e homogeneidade são necessários vários ciclos de operação o ECAP se torna improdutivo pelo fato de o processo apresentar baixa continuidade. Dessa forma, em 2004 foi criado o ECAP-Conform que é uma variação do convencional, sendo que nesse, o problema da continuidade do processo é amenizado, devido a possibilidade de se processar materiais com comprimentos maiores e com maiores velocidades, entretanto, os materiais não alcançam homogeneidade dos grãos quanto alcançam com o ECAP. Neste trabalho o processo ECAP com sua variação ECAP-Conform foram comparados, considerando suas características e suas limitações. Para isso, foram pesquisados artigos publicados entre os anos de 2015 à 2022 observando os parâmetros de processamento utilizados para execução do ECAP e do ECAP-Conform.

Palavras-chave: ECAP; ECAP-Conform; SPD; Refino de grãos.

INTRODUÇÃO

O refino de grãos é um dos mecanismos de aumento de resistência do material, neste caso o trabalho a frio é uma das formas de se alcançar um refino microestrutural, através do aumento do número de contornos de alto ângulo de desorientação, dificultando a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, promovendo o aumento de resistência. Além disso, segundo Hall e Petch^(2,3), o tamanho do grão é inversamente proporcional à tensão necessária para realizar deformação^(1,2,3).

Segundo Costa⁽⁴⁾, os processos de deformação plástica severa (SPD - *Severe Plastic Deformation*) consistem em conjunto de técnicas que proporcionam a obtenção de materiais com grãos ultrafinos com contornos de alto ângulo, provocados por grandes deformações por passe de processamento sem que ocorram quaisquer alterações substanciais de sua forma e

dimensões. Além disso, as técnicas SPD devem apresentar microestrutura uniforme e não podem provocar trincas no material processado ⁽⁵⁾.

Entre os tipos de processos SPD existentes, Bagherpour *et al.* ⁽⁶⁾ indicam a divisão dos processos em cinco grandes grupos, que são: técnicas SPD baseadas em extrusão angular por canais iguais (ECAP – *Equal Channel Angular Pressing*), SPD baseada em torção/cisalhamento sob alta pressão (HPT - *High Pressure Torsion*), técnicas SPD baseada em prensagem/forjamento multi-direcional (MDF - *Multi-Directional Forging*), SPD baseada em processos de laminação acumulativa (ARB - *Accumulative Roll Bonding*) e técnicas SPD combinadas.

O processo de extrusão angular por canais iguais (ECAP) utiliza de cisalhamento simples para realizar uma grande deformação plástica. De acordo com Ravisankar ⁽⁷⁾, o processo consiste em pressionar um tarugo bem lubrificado em uma matriz, com canais de seção transversal iguais, que se cruzam e formam um ângulo interno (ϕ) entre as intersecções dos canais e um ângulo externo de curvatura (Ψ), conforme esquematizado na Figura 1. O material é então deformado por cisalhamento e, quando girado em seu eixo longitudinal, cria uma deformação cruzada.

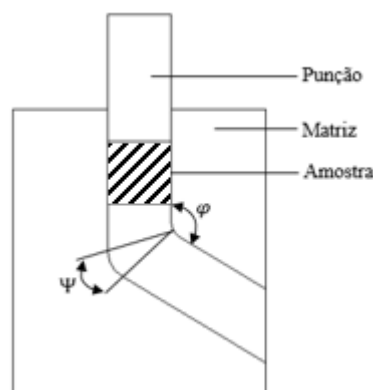


Figura 1: Esquema do processo ECAP.

Em 1974, a concepção da extrusão contínua de metais, denominada extrusão conform, foi criada por Etherington ⁽⁸⁾, com o objetivo de contornar os problemas encontrados na extrusão convencional. Dessa forma, Raab *et al.* ⁽⁹⁾ desenvolveram um processo que une as técnicas do ECAP convencional com a extrusão conform, resultando no ECAP-Conform.

A Figura 2 trata de um esquema representativo do processo ECAP-Conform.

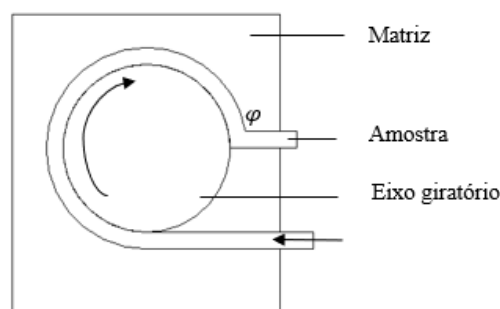


Figura 2: Processo ECAP-Conform.

O processo de ECAP-Conform, consiste na inserção de um material em uma matriz fixa, esse material é conduzido por um eixo giratório até o canal de saída, onde é realizado o cisalhamento. O eixo giratório possui uma ranhura para facilitar tanto o processo quanto a força de atrito entre as interfaces eixo-peça e peça-matriz ⁽¹⁰⁾.

Neste trabalho, foi realizada uma revisão da literatura comparando os processos ECAP e ECAP-Conform, levantando suas principais características e limitações em um contexto produtivo de larga escala.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas as buscas de artigos publicados entre os anos de 2015 a 2022 na plataforma Periódicos Capes usando como palavras-chave e operadores booleanos “*Equal channel angular pressing AND Study case*” e “*Equal channel angular pressing AND Conform*”. Os parâmetros de processamento utilizados para ambas as rotas, bem como alguns resultados alcançados foram dispostos nas Tabelas 1 e 2 e comparados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os parâmetros de processo do ECAP e ECAP-Conform, respectivamente, encontrados nos artigos selecionados, bem como alguns resultados alcançados.

Tabela 1- Parâmetros de processamento e resultados encontrados na literatura para o processo ECAP.

MATERIAL	VELOCIDADE (mm/s)	DIMENSÕES DOS MATERIAIS (mm)	ϕ	PASSES	TAMANHO MÉDIO DOS GRÃOS (μm)	REF.
Cobre	0,33	50x50x300	90°	8	1,1	(11)
Liga de Alumínio	-	19,5x19,5x100	90°	3	0,35~0,6	(12)
Liga de alta entropia	3,00	10x10x60	110°	4	0,1	(13)
Liga de Magnésio	-	ϕ 10x60	120°	12	0,69	(14)
Liga de Alumínio	1,50	ϕ 12x100	90°	4	0,6	(15)
Liga Fe	0,48	70x10x10	90°	1	5,94	(16)
Liga de Magnésio	-	-	90°	4	0,72	(17)
Liga de Alumínio	-	ϕ 10x50	120°	3	36	(18)
Liga de Alumínio	5,00	ϕ 10x60	90°	2	-	(19)
Liga de Magnésio	-	10x10x140	90°	4	0,7	(20)

* ϕ representa o ângulo do canal das matrizes

Tabela 2- Parâmetros de processamento e resultados encontrados na literatura para o processo ECAP-Conform.

MATERIAL	VELOCIDADE (mm/s)	DIMENSÕES DOS MATERIAIS (mm)	ϕ	PASSES	TAMANHO MÉDIO DOS GRÃOS (μm)	REF.
Alumínio	10,00	ϕ 5~200	90°	1	9	(21)
Liga de Alumínio	-	ϕ 12,5x1500	120°	6	0,5	(22)
Liga de Alumínio	5,00	ϕ 9x1000	120°	6	0,7	(23)
Liga de Alumínio	15,00	ϕ 12x-	90°	1	5,1	(24)
Titânio grau 4	-	ϕ 12x-	120°	6	2X0,7	(25)
Titânio grau 4	33,00	-x500	120°	12	0,3	(26)
Titânio grau 4	-	-	120°	12	0,4	(27)
Titânio grau 2	-	14x14x-	90°	8	0,09	(28)
Titânio grau 4	33,00	11x11x500	120°	6	0,3	(29)
Titânio grau 4	-	ϕ 12x-	120°	8	0,2	(30)

* ϕ representa o ângulo do canal das matrizes

Analisando as Tabelas 1 e 2 é notório a influência da quantidade de passes em relação ao refino dos grãos, sendo que, quanto maior o número de passes a tendência é de se obter grãos

mais refinados. Simirnov⁽²⁵⁾ processou titânio grau 4 por ECAP-Conform em seis passes e obteve grãos com tamanho médio de 1,35µm, sendo que Dyakonov *et al.*⁽²⁶⁾, também processando titânio grau 4 por ECAP-Conform, porém, com 12 passes de processamento, obteve grãos com tamanho médio de 0,3 µm.

Em relação aos materiais processados por ECAP e ECAP-Conform, as ligas de alumínio, magnésio e titânio ganharam destaque. Fato que pode ser justificado pelas menores cargas necessárias para se processar materiais não ferrosos, bem como pela dificuldade de se obter aumento de resistência apenas pela aplicação de tratamentos térmicos, como pode ser alcançado ao se trabalhar com ligas ferrosas.

Segundo Semenova *et al.*⁽³¹⁾, o processo ECAP não permite uma produção contínua, em uma visão industrial. Isso se dá pelo limite imposto pelo processo no comprimento das peças de trabalho, devido ao curso da máquina, além da possibilidade de a peça sofrer flambagem durante a operação, se esse limite de comprimento for ultrapassado. Por fim, as extremidades do material processado geralmente contêm microestrutura não uniforme ou microfissuras⁽⁹⁾.

Segundo Murashkin *et al.*^(22 e 23) e Dyakonov *et al.*^(26 e 29), pode se observar que o ECAP-Conform supre a limitação do ECAP em relação ao comprimento do material processado. Além disso, a média de velocidade de processamento, utilizando o ECAP-Conform, em relação a Tabela 2 corresponde à aproximadamente 9 vezes a média de velocidade utilizada por ECAP convencional, como descrito na Tabela 1, dessa forma, as velocidades de processamento superiores, contribuem para que o processo Conform seja mais adequado para uma produção industrial em larga escala.

Segundo Ayati, Parsa e Mirzadeh⁽³²⁾, o ECAP-Conform se destaca ainda através da deformação que realiza no material durante a passagem através da matriz até a chegada ao ângulo de cisalhamento, potencializando a deformação final.

O processo ECAP-Conform alcança níveis de refino de grãos semelhantes aos encontrados no processo convencional, entretanto, existe uma limitação referente a homogeneização dos grãos, causado pela impossibilidade de criar novas rotas de processamento entre os passes^(9,10).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi levantado o processo de deformação plástica severa tem o propósito de aumentar a resistência de um material através de cíclicas deformações severas sem variação de dimensão, a fim de buscar o refino de grão. Esses processos se fazem relevantes em situações em que outras técnicas de refino como, tratamento térmico, por exemplo, são impossibilitadas de serem aplicadas.

O processo ECAP convencional se destaca através do refino de grão em níveis, em alguns casos, nanométricos. Além disso, esse processo gera grande homogeneidade na distribuição do tamanho dos grãos, entretanto, o processo não permite uma produção contínua, o que torna um empecilho para aplicação em escala industrial.

O problema da descontinuidade do ECAP convencional tem potencial de resolução com a aplicação do processo de ECAP-Conform, porém, este não fornece o mesmo nível de homogeneidade dos grãos quando comparado ao ECAP convencional. Todavia, O ECAP-Conform, pode ser processado em maior velocidade e possui capacidade de operação com amostras de maior comprimento, reduzindo assim o tempo de processamento e aumentando seu potencial de industrialização em produção de larga escala.

REFERÊNCIAS

- DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Tradução de Antônio Sergio de Sousa e Silva, Luiz Henrique de Almeida e Paulo Emílio Valadão de Miranda. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- HALL, E.O. The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. Proceedings of the Physical Society. Section B. *[S.I.]*, v. 64, n. 9, p. 747-753, 1951.
- PETCH, N.J. The Cleavage Strength of Polycrystals. The Journal of the Iron and Steel Institute. *[S.I.]*, v. 174, p. 25–28, 1953.
- COSTA, A. L. M. Processos de conformação de metais por deformação plástica severa: desafios e oportunidades. 1º Seminário Baiano de Tecnologias de Fabricação 2010 Sistema FIEB (SENAI). Salvador, ed. 1, p. 1-10, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/304626764>. Acesso em: 31 Ago. 2021.
- VALIEV, R. Z.; ISLAMGALIEV, R. K.; ALEXANDROV, I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in Materials Science, v. 45, ed. 2, p. 103-189, 2000.
- BAGHERPOUR, E. et al. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. Int J Adv Manuf Technol, v. 100, p. 1647–1694, 2019.
- RAVISANKAR, B. Equal-Channel Angular Pressing (ECAP). Handbook of Mechanical Nanostructuring. *[S.I.]*: Wiley-VCH, 2015, p. 277-296.
- ETHERINGTON, C. Conform—A New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals. J. Eng. Ind. Springfield's, Salwick, Preston, 1974.
- RAAB, G. J. et al. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform. Materials Science and Engineering A, v. 382, ed. 1-2, p. 30-34, 2004.
- XU, C . et al. Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy. Acta Materialia, v. 58, ed. 4, p. 1379-1386, 2010.
- FRINT, S. et al. Scaling up Segal's principle of Equal-Channel Angular Pressing. Materials & Design, v. 97, p. 502-511, 2016.
- ZHA, M. et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of a binary Al–7Mg alloy processed by equal-channel angular pressing. Acta Materialia, v.84, p.42-54, 2015.
- SHAHMIR, H. et al. Microstructure and properties of a CoCrFeNiMn high-entropy alloy processed by equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A, v. 705, p. 411-419, 2017.
- MARTYNENKO, N. S. et al. Increasing strength and ductility of magnesium alloy WE43 by equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A, v. 712, p. 625-629, 2018.
- ESMAEILI, A. et al. Fatigue behavior of AA7075 aluminium alloy severely deformed by equal channel angular pressing. Journal of Alloys and Compounds, v. 757, p. 324-332, 2018.
- LACHHAB, R. et al. Study of the microstructure and texture heterogeneities of Fe–48wt%Ni alloy severely deformed by equal channel angular pressing. Journal of Materials Science, v. 54, p. 4354-4365, 2019.
- KOLLER, M. et al. An ultrasonic internal friction study of ultrafine-grained AZ31 magnesium alloy. Journal of Materials Science, v. 50, ed. 2, p. 808-818, 2015.
- BONGALE, A. M.; KUMAR, S. Equal channel angular pressing of powder processed Al6061/SiC nano metal matrix composites and study of its wear properties. Materials Research Express, v. 5, n. 3, p. 1-11, 2018.
- NEJADSEYFI, O.; SHOKUHFAR, A.; SADEGHI, S. Feasibility of attaining uniform grain structure and enhanced ductility in aluminum alloy by employing a beveled punch in equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A, v. 651, p. 461-466, 2016.
- GZYL, M. et al. Producing High-Strength Metals by I-ECAP. Advanced Engineering Materials, v. 18, ed. 2, p. 219-223, 2016.
- DERAKHSHAN, J. F.; PARSA, M. H.; JAFARIAN, H. R. Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process. Materials Science and Engineering: A, v. 747, p. 120-129, 2019.
- MURASHKIN, M. et al. Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultrafine-Grained Al 6101 Alloy Processed via ECAP-Conform. Metals, v. 5, p. 2148-2164, 2015.

23. MURASHKIN, M. Y. et al. Microstructure, strength, electrical conductivity and heat resistance of an Al-Mg-Zr alloy after ECAP-conform and cold drawing. *Reviews Advanced Materials Science*, v. 47, p. 16-25, 2016.
24. PROCHÁZKA, R. et al. Local Mechanical Properties and Microstructure of EN AW 6082 Aluminium Alloy Processed via ECAP–Conform Technique. *Materials*, v. 13, p. 1-18, 2020.
25. SIMIRNOV, I. V. Strength Characteristics and Fracture of Ultrafine-Grained Titanium Grade 4 Processed by Equal Channel Angular Pressing—Conform. *Technical Physics*, v. 64, p. 497-505, 2019.
26. DYAKONOV, G. S. et al. Microstructure evolution and strengthening mechanisms in commercial-purity titanium subjected to equal-channel angular pressing. *Freedom Collection Journals*, v. 701, p. 289-301, 2017a.
27. DYAKONOV, G. S. et al. The microstructure-strength relationship in severely-deformed commercial-purity titanium. *Freedom Collection Journals*, v. 192, p. 165-168, 2017b.
28. ZHANG, S. et al. Effect of temperature on microstructural stabilization and mechanical properties in the dynamic testing of nanocrystalline pure Ti. *Materials Science and Engineering: A*, v. 634, p. 64-70, 2015.
29. DYAKONOV, G. S. et al. An EBSD investigation of ultrafine-grain titanium for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, v. 648, p. 305-310, 2015.
30. SEMENOVA, I. P. et al. Nanostructured Titanium for Maxillofacial Mini-Implants. *Advanced Engineering Materials*, v. 18, ed. 7, p. 1216-1224, 2016.
31. SEGAL, V. Equal-Channel Angular Extrusion (ECAE): From a Laboratory Curiosity to an Industrial Technology. *Metals*. v. 10, n. 2, p. 1-15, 2020.
32. AYATI, V.; PARSA, M. H.; MIRZADEH, H. Deformation of Pure Aluminum Along the Groove Path of ECAP-Conform Process. *Advanced Engineering Materials*. v. 18, p. 319-323, 2016.

COMPARATIVE STUDY AMONG THE PLASTIC DEFORMATION METHODS ECAP AND THE VARIATION ECAP-CONFORM

ABSTRACT

The techniques of Severe Plastic Deformation (SPD) have been conquering space among the processes that promote grain refining in materials, through cyclic deformations that work via shear stress. Among the existing SPD processes, Equal Channel Angular Pressing (ECAP) stands out for its potential in the production of materials with ultra-fine and homogeneous granulation. However, the materials processed by ECAP are limited by the length, because of the stroke of the machine that carries out the process and because of the buckling effects, as well as the slow process velocities that must be used. Knowing that in order to attain high levels of grain refining and homogeneity several operation cycles are necessary, ECAP becomes counterproductive due to the fact of its lack of continuity. With that in mind, ECAP-Conform was created in 2004. This is a variation of the conventional process, in which the problem of the continuity is softened, due to the possibility of processing materials with greater lengths at greater velocities. It's important to note, however, that the materials do not reach grain refining and homogeneity levels as well as the with the ECAP. In this work, the processes of ECAP with its variation ECAP-Conform were compared, taking into consideration its characteristics and limitations. To reach that goal, articles written between 2015 and 2022 were examined, observing the parameters utilized in the execution of the ECAP and ECAP-Conform.

Keywords: ECAP; ECAP-Conform; SPD; Refining grains.