

# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE EXTRUSÃO NA HOMOGENEIDADE MICROESTRUTURAL DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO CONTÍNUA

Gustavo Tressia <sup>1</sup>  
Victor Caso Moreira <sup>1</sup>  
Leandro de Almeida <sup>1</sup>  
Paulo de Jesus Aniceto <sup>1</sup>

## Resumo

O processo de extrusão contínua, também conhecido como Conform, é capaz de conformar diversos formatos de produtos ultralongos sem necessidade de qualquer processo de junção. O processo apresenta menor consumo de energia e de área física para instalação de maquinário quando comparado com o processo de extrusão e também não se faz necessário o aquecimento da matéria-prima como na extrusão a quente convencional. As propriedades do material fabricado são garantidas pelo severo grau de deformação e rápido aquecimento gerado na conformação do material. Alguns parâmetros de processo influenciam a condição microestrutural do material, alterando as propriedades finais. Um dos principais parâmetros é a velocidade da rotação da roda extrusora. O presente trabalho estuda liga de cobre de baixo oxigênio (ASTM C10200), avaliando as propriedades mecânicas do material em função da velocidade de extrusão, por meio de ensaios de tração, avaliação microestrutural em microscópio óptico e metalografia quantitativa. Conclui-se que o aumento da velocidade de extrusão não influencia na homogeneidade microestrutural, na variação do tamanho médio de grão e das propriedades mecânicas do produto fabricado.

**Palavras-chave:** Velocidade de extrusão; Conform; Extrusão contínua; Cobre.

## INFLUENCE OF THE EXTRUSION SPEED ON THE MICROSTRUCTURAL HOMOGENEITY OF THE CONTINUOUS FORMING PROCESS

### Abstract

The continuous extrusion process, also known as Conform, is capable of forming several ultra-long products in different formats without any joining process. Besides lowering energy consumption, this process also requires less physical area for machinery when compared to extrusion process and feedstock heating is not required as in conventional hot extrusion. The material properties are achieved by severe deformation and rapid heating generated from material conformation. Some process parameters influence the material microstructural condition, thus varying its final properties. One of the main parameters is the rotation speed of extrusion wheel. The present paper studies low oxygen copper alloy (ASTM C10200), its mechanical properties are evaluated as a function of extrusion speed, tensile test, microstructural evaluation by optical microscopy and quantitative metallography. It was concluded that the increase of the extrusion speed did not contribute to microstructural homogeneity, average grain size and mechanical properties of product.

**Keywords:** Extrusion speed; Conform; Continuous extrusion; Copper.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de extrusão contínua, também conhecido como conformação contínua, ou do inglês “*Continuous Forming*” (Conform) é utilizado principalmente nas indústrias de cobre e alumínio. Esse processo apresenta algumas vantagens perante a extrusão a quente convencional, seja

ela direta ou inversa. Segundo Song et al. [1], a principal vantagem do processo Conform está na redução do consumo de energia. Essa redução está associada à necessidade de menores pressões de extrusão, sendo assim necessários motores e sistemas hidráulicos de menores potências, além

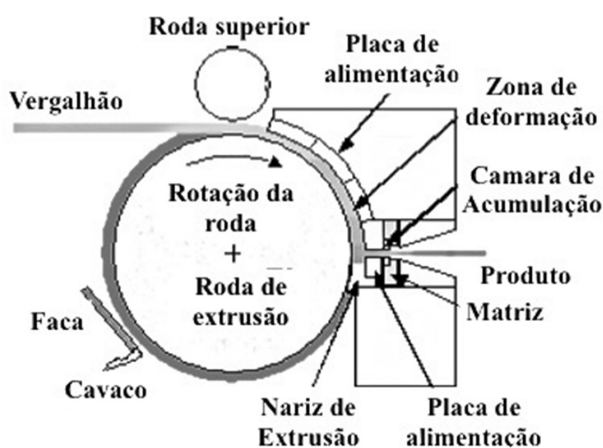
<sup>1</sup>Parapanema SA, Santo André, SP, Brasil. E-mail: [gustavotressia@hotmail.com](mailto:gustavotressia@hotmail.com)



de não necessitar da etapa de aquecimento da matéria-prima. As menores pressões de extrusão requeridas são justificadas pelo fato de a relação de extrusão do processo Conform apresentar valor inferior em comparação a extrusão direta do cobre, levando-se em consideração que a matéria prima do processo Conform apresenta, em geral, diâmetro da seção transversal entre 12 e 25 mm, e para extrusão direta esse valor varia de 150 a 250 mm. Uma vantagem pouco conhecida do processo Conform está na possibilidade de relações de extrusões menores do que 1, ou seja, é possível produzir um material com área de seção transversal maior do que da matéria-prima, como será apresentado nesse trabalho. Quanto as desvantagens destacam-se o maior valor da matéria-prima (vergalhão), limitações quanto à liga a ser trabalhada e o dimensional dos produtos.

O processo Conform consiste em comprimir a matéria-prima, vergalhão, por meio de uma roda de extrusão, esta contendo um canal central que permite a acomodação do vergalhão, e por uma roda superior, realizando a compressão do vergalhão contra o canal. Após a roda superior, encontra-se a placa de alimentação que garante que todo vergalhão já deformado seja direcionado para a câmara de acumulação e assim realize o preenchimento da matriz. Devido a toda a deformação a que o vergalhão é submetido e ao atrito entre o canal e o material, no processamento de cobre o material atinge temperaturas na faixa de 600 a 700°C antes da câmara de acumulação, acima da temperatura de recristalização do material, justificando a ausência de qualquer sistema de aquecimento. Imediatamente ao sair da matriz o material entra em contato com água, localizada no tanque de resfriamento, reduzindo rapidamente a temperatura do produto e evitando assim que este sofra oxidação.

O aumento de produtividade do processo Conform em geral é relacionado à velocidade de extrusão, sendo controlado pela rotação da roda de extrusão, sendo esta uma das principais partes do conjunto de ferramental. Na Figura 1 são destacadas as principais partes do conjunto de ferramental do processo Conform.



**Figura 1.** Principais ferramentais envolvidos no processo Conform. Adaptado de Khawaja et al. [2].

O aumento da velocidade de extrusão está diretamente relacionado ao aumento de produtividade. Porém, na indústria, o aumento de produtividade geralmente está associado à geração de problemas de qualidade do produto, como por exemplo, variações de propriedades mecânicas, defeitos estruturais, acabamento superficial, dentre outros. A variação da rotação da roda de extrusão também promove a alteração de alguns parâmetros de processo, como por exemplo da temperatura do processo, ou seja, do material e de todo o conjunto de ferramental. Wu et al. [3] verificaram, por simulação, o efeito da variação velocidade de extrusão na fabricação de barras de cobre, sendo mostrado que o aumento da velocidade de 8 rpm para 10 rpm resultou em um acréscimo de 10°C, e quando a velocidade foi alterada para 12 rpm ocorreu um acréscimo total de 20°C no produto após a saída da matriz. Porém os autores não verificam se ocorreu variação de propriedades do material fabricado.

A aplicação da extrusão contínua Conform em ligas de cobre é marcada pela ocorrência do processo de recristalização dinâmica, sendo esse fortemente influenciado pela temperatura do material. Segundo Huang et al. [4], no processo de recristalização dinâmica, quanto maior for a temperatura de processamento, maior será o tamanho de grão do material produzido. Essas variações de temperatura podem afetar também outras propriedades do material, alterando a homogeneidade microestrutural, a dureza, o limite de escoamento e também o limite de resistência à tração.

A variação da temperatura do material em extrusão pode ser afetada por outros parâmetros, como por exemplo a relação de extrusão, a liga e também a geometria do ferramental. Neste trabalho avaliou-se a influência da velocidade de extrusão em relação a homogeneidade microestrutural, as propriedades mecânicas e a variação da temperatura da matriz de extrusão.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Matéria-prima

Como matéria-prima foi utilizado vergalhão da liga ASTM C10200, classificada de acordo com a norma ASTM B-187 [5], conhecida como Cobre “Oxygen free”, marcado pelo baixíssimo teor de oxigênio, podendo atingir um teor máximo de 10 ppm. O diâmetro médio do vergalhão utilizado foi de 12,50 mm. Na Tabela 1 é apresentada a composição química dos vergalhões utilizados. Não foi observado nenhuma variação significativa de composição química entre os materiais utilizados.

**Tabela 1.** Composição química dos vergalhões utilizados para a fabricação dos materiais

Material produzido	Cu (%)	O (ppm)	Fe (ppm)	Bi (ppm)	Ni (ppm)
Redondo	99,99	6	1	1	1
Retangular	99,99	5	2	1	1

## 2.2 Fabricação dos Materiais

Foram fabricados dois materiais com área da secção transversal diferentes, sendo um com geometria circular de diâmetro 11,5 mm e outro com geometria retangular com dimensões de 15,0 × 10,0 mm. Sendo assim, foram fabricados materiais com diferentes relações de extrusão (razão entre área do vergalhão de entrada e a área do material de saída), em que para o material redondo a relação foi de 1,2 e para o material retangular a relação foi de 0,8.

Para cada material a velocidade de rotação da roda extrusora foi variada em três valores, sendo eles 4, 8 e 12,5 rpm. Os demais parâmetros de processo, como geometria da câmara de acumulação e distância da placa de alimentação em relação à roda, foram mantidos constantes para todos os materiais. Medições de temperatura da matriz de extrusão foram realizadas utilizando um termopar de contato.

## 2.3 Análise Metalográfica e de Propriedades Mecânicas

Para a preparação metalográfica, as amostras foram polidas passando por lixa grana #220 até #1200, seguindo para polimento em pasta de diamante com grana de 9 a 1 μm. Para a revelação da microestrutura as amostras foram imersas em trióxido de cromo durante 5 segundos. A análise da microestrutura foi realizada em microscópio óptico e foi utilizado o software ImageJ para análise das imagens e determinação das áreas de cada grão. Para cada condição, foram analisados pelo menos 150 grãos, e o médio de grão foi determinado pela média dos resultados das imagens analisadas. A área dos grãos foi convertida em diâmetro médio equivalente pela suposição de um grão esférico.

Foram realizados ensaios de limite de resistência a tração (LRT), limite de escoamento (LE) e de alongamento após ruptura, com 5 repetições para cada condição, utilizando-se uma máquina universal de ensaios. Para obtenção do alongamento, foi realizada medição após o ensaio das marcações realizadas nos corpos de prova antes da deformação. As marcas iniciais foram realizadas a uma distância de 50,8 mm.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados de medições de temperatura realizados na matriz de extrusão em função do material e da velocidade utilizada. As medições de temperatura foram realizadas utilizando um termopar de contato localizado na parte inferior da matriz de extrusão, permitindo assim conhecer a temperatura da matriz durante a conformação do produto. Os valores de temperaturas indicados na Figura 2 foram obtidos após um período de estabilização de 3 minutos, garantindo que o processo tenha atingido a estabilidade, não sofrendo variação após este momento. Para ambos os materiais, é possível notar

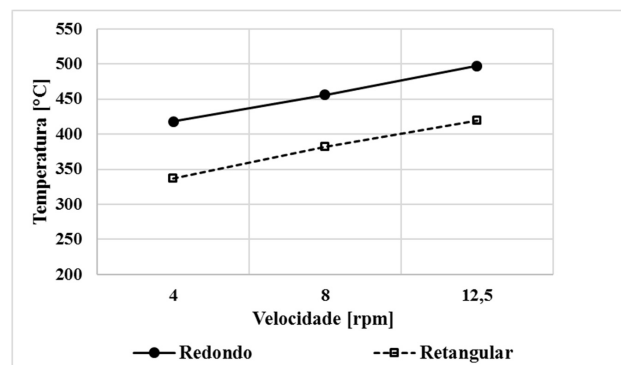


Figura 2. Temperatura da matriz de extrusão para os materiais fabricados.

um aumento da temperatura em função do aumento da velocidade de rotação da roda de extrusão. Porém, para o material retangular, com maior área da seção transversal, ocorreu um aumento mais pronunciado da temperatura quando a velocidade foi aumentada de 8 para 12,5 rpm, aumentando 24%, enquanto para o material redondo com menor área da seção transversal ocorreu um aumento de 19%.

A roda de extrusão possui um canal, sendo neste que o vergalhão sofre atrito e deformação, ocorrendo um aumento de temperatura acima da temperatura de recristalização do cobre. Como essa região fica com uma temperatura elevada entre a zona de deformação e a câmara de acumulação (Figura 1), quanto maior for a velocidade de rotação, menor será o tempo que esse canal da roda terá para perder calor. Logo, quanto maior for a velocidade de rotação da roda, maior será a temperatura que o canal da roda apresentará durante o processo, explicando assim o aumento da temperatura em função do aumento da velocidade.

Ainda na Figura 2, nota-se que o material com maior relação de extrusão, redondo, apresentou maior temperatura de processo, podendo ser explicado pelo fato de uma maior deformação ser necessária para a conformação, ocasionando também o aumento da temperatura de todo o processo.

No trabalho de Wu et al. [3] os autores encontraram um aumento de temperatura em função da velocidade de rotação de 5°C/rpm, enquanto neste trabalho foi encontrado um aumento de temperatura em média de 9,5°C/rpm. Essa diferença, pode ser explicada pelo fato de Wu et al. [3] terem obtidos resultados de temperatura para o material de cobre logo após ser conformado enquanto neste trabalho os resultados de temperatura são para o ferramental de extrusão. Ainda, essa diferença acentuada pode estar associada ao fato de menores velocidades resultarem em menores temperaturas do conjunto de ferramental, pois a taxa de deformação do material é menor, e portanto a geração de calor como dissipação da energia de deformação também é reduzida.

Na Figura 3 é apresentada uma macrografia do vergalhão utilizado, mostrando a presença de grão colunares



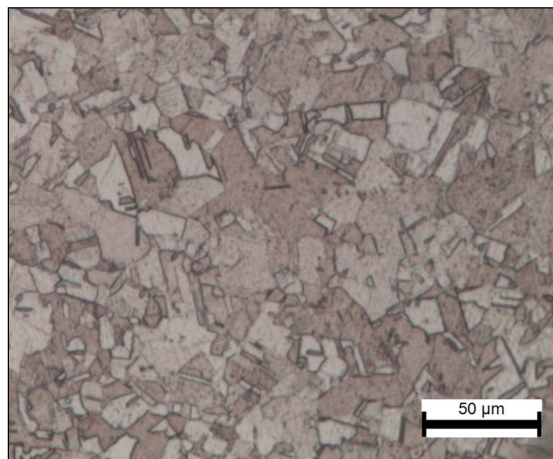
Figura 3. Macroestrutura da matéria prima utilizada (vergalhão).

de ordem milimétrica oriundo do processo de fundição contínua.

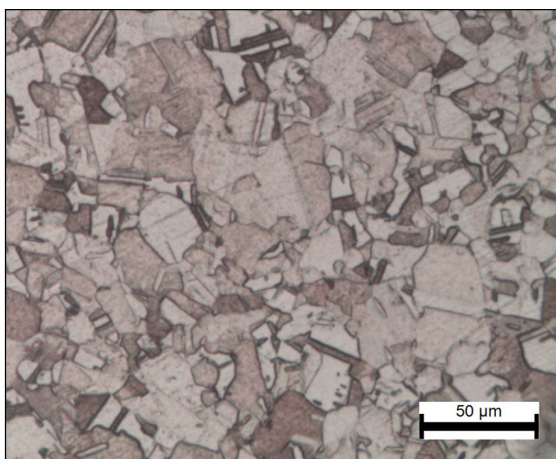
Nas Figuras 4 e 5, são apresentadas as microestruturas dos materiais redondo e retangular respectivamente, para as três velocidades de trabalho, 4, 8 e 12,5 rpm. Para todos os materiais é possível notar que ocorreu uma mudança microestrutural, comparando a estrutura do vergalhão e dos materiais após a conformação, sugerindo a ocorrência de um processo de recristalização dinâmica, garantindo que a estrutura do vergalhão foi completamente alterada.

Na Figura 4 é possível notar a presença de grãos recristalizados provenientes do processo de recristalização dinâmica. Comparando as imagens, visualmente não se observa diferença significativa entre os tamanhos de grão em função da variação de velocidade de extrusão para o material redondo.

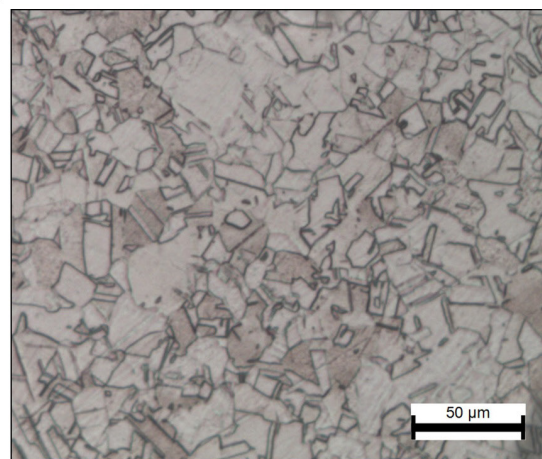
Assim como para o material redondo, observa-se na Figura 5 a presença de grãos recristalizados. Não é notada, visualmente, diferença significativa entre os tamanhos de grão em função da variação de velocidade de extrusão para o material retangular. Comparando visualmente as



(a)

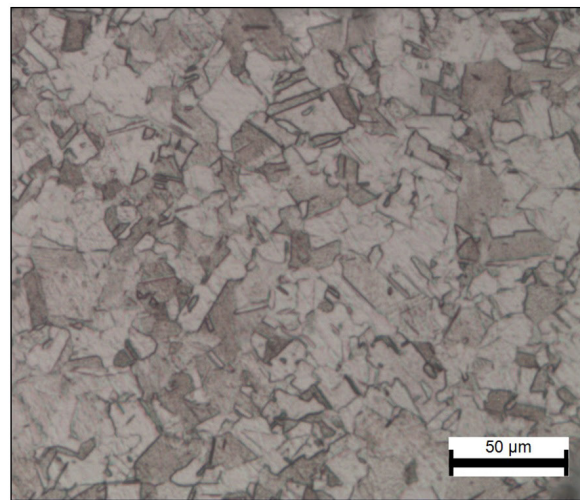


(b)

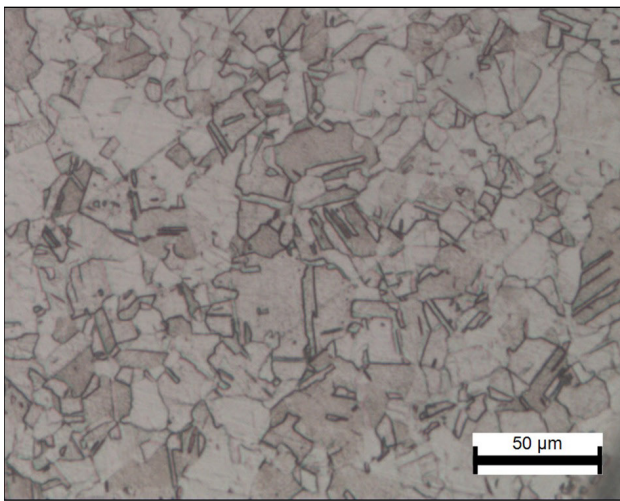


(c)

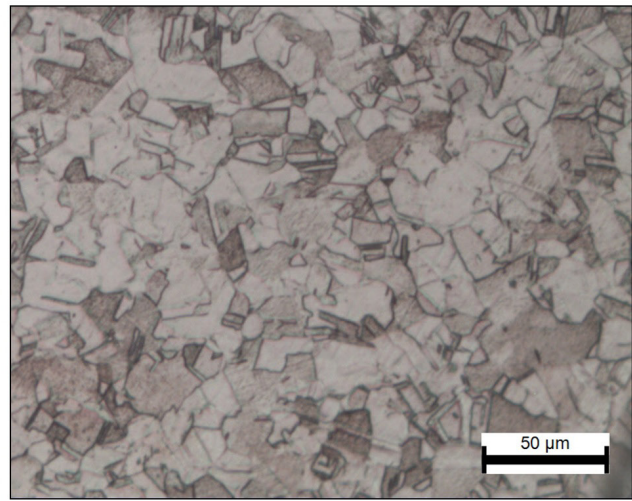
Figura 4. Microestrutura do material Redondo para: (a) 4 rpm; (b) 8 rpm; e (c) 12 rpm.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.** Microestrutura do material retangular para: (a) 4 rpm; (b) 8 rpm; e (c) 12 rpm.

micrografias dos dois materiais também não são notadas diferenças de tamanho de grão.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de medições de tamanho de grão, bem como os desvios. Quanto ao tamanho médio de grão não foi observada diferença significativa com a variação da velocidade. Também não foi notada diferença de tamanho de grão entre os materiais produzidos.

Huang et al. [4] mostraram que, para processos de recristalização dinâmica, o aumento da temperatura de conformação resulta em aumento do tamanho de grão do material, logo, comparando os resultados de temperatura da Figura 2 com os resultados de tamanho de grão da Tabela 2, seria esperado que o material redondo apresentasse maior tamanho de grão. Porém, no mesmo trabalho, os autores também mostraram que menores deformações no processo de conformação resultam em maiores tamanhos de grão. Sendo assim, para as fabricações dos materiais redondo e

**Tabela 2.** Tamanho de grão médio dos materiais fabricados

Material/Velocidade	Tamanho de Grão [ $\mu\text{m}$ ] médio e desvio padrão		
	4 rpm	8 rpm	12 rpm
Redondo	$18,9 \pm 2,8$	$23,1 \pm 2,8$	$22,4 \pm 2,4$
Retangular	$20,0 \pm 2,3$	$17,6 \pm 0,7$	$21,7 \pm 0,7$

retangular ocorreram, respectivamente, os fenômenos de maior temperatura e de menor deformação (redução da relação de extrusão), sendo esses fenômenos responsáveis por contribuir para o aumento do tamanho de grão. Nota-se ainda a existência de uma tendência de variação do tamanho de grão entre os materiais, porém essa diferença não é significativa, sugerindo-se que essa tendência de variação de tamanho de grão ocorre devido ao aumento da temperatura do processo, resultando em maior tamanho de grão final

por promover crescimento de grão de maneira correlata ao recozimento estático de materiais metálicos, porém embora haja essa tendência, pelos motivos expostos anteriormente [4] não foi encontrada variação significativa do tamanho de grão médio pelo efeito contrário causado pela razão de extrusão.

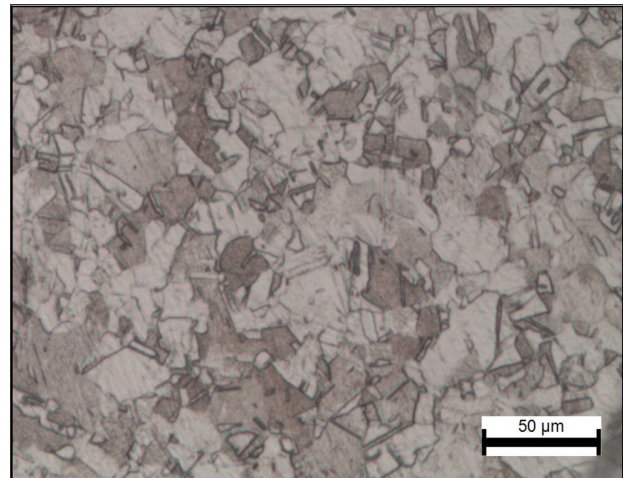
Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados de LE, LRT e alongamento para os materiais redondo e retangular, respectivamente, em função da velocidade da roda de extrusão. Na Figura 5, para o material redondo, observa-se que o aumento da velocidade de 4 para 8 rpm não exerceu nenhuma variação significativa no LE. Porém quando a velocidade foi aumentada para 12,5 rpm, ocorreu uma redução significativa do LE, sendo de aproximadamente 19%. Por outro lado, para o LRT e para o alongamento, não foi observada nenhuma variação significativa, sendo notado apenas uma tendência de redução do LRT em função do aumento da velocidade de extrusão.

Na Figura 6, para o material retangular, observa-se que o aumento da velocidade não exerceu nenhuma variação significativa no LE, LRT e no alongamento. Nota-se apenas uma tendência de redução do LE e do LRT em função do aumento da velocidade de extrusão.

Comparando os resultados da Tabela 2 com os resultados das Tabelas 3 e 4, não se observa uma variação significativa das propriedades mecânicas e do tamanho de grão em função da velocidade de extrusão para um mesmo material. Por outro lado, ao comparar os materiais, nota-se uma variação significativa apenas do alongamento, sendo que o material Retangular apresentou maior do que o material Redondo, indicando assim maior ductilidade do material Retangular. Porém, os demais resultados não explicam essa fenômeno, sendo que para maiores valores de alongamento era de se esperar menores valores de LRT.

Avaliando-se os resultados de tamanho de grão (Tabela 2) e de propriedades mecânicas (Tabelas 3 e 4), foi levantada a hipótese de que o fato de o material ser resfriado rapidamente e imediatamente após a conformação pela matriz, não existiu tempo suficiente para que ocorresse o processo de crescimento de grão. Sendo assim, foi fabricado material sem utilização de água de resfriamento, submetido a um resfriamento lento em atmosfera ambiente, em torno de 24°C. Para essa condição foi fabricado apenas o material retangular com velocidade de rotação da roda de extrusão de 4 rpm. Na Tabela 5 é apresentada uma comparação entre os resultados de tamanho médio de grão para o material com resfriamento em água e o material sem resfriamento forçado. Na Figura 6 é apresentada a micrografia do material produzido sem resfriamento forçado.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5 e na Figura 6, conclui-se que o tamanho de grão não é influenciado pelo resfriamento.



**Figura 6.** Microestrutura do material retangular produzido sem resfriamento forçado com velocidade de 4 rpm.

**Tabela 3.** Limite de escoamento, limite de resistência a tração e alongamento em função da velocidade da roda de extrusão para o material redondo

Velocidade	LRT [kgf/mm <sup>2</sup> ]	LE [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Alongamento [%]
4 rpm	23,4 ± 0,10	5,4 ± 0,20	61,2 ± 4,7
8 rpm	23,1 ± 0,03	5,7 ± 0,07	62,0 ± 5,4
12,5 rpm	22,8 ± 0,10	4,6 ± 0,10	61,5 ± 4,5

**Tabela 4.** Limite de escoamento, limite de resistência a tração e alongamento em função da velocidade da roda de extrusão para o material retangular

Velocidade	LRT [kgf/mm <sup>2</sup> ]	LE [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Alongamento [%]
4 rpm	22,9 ± 0,05	6,3 ± 0,09	71,7 ± 1,6
8 rpm	22,6 ± 0,03	6,0 ± 0,16	71,5 ± 1,4
12,5 rpm	22,7 ± 0,03	5,9 ± 0,10	71,3 ± 0,6

**Tabela 5.** Tamanho médio de grão dos materiais, com e sem resfriamento com velocidade de 4 rpm

Material	Tamanho médio de grão e desvio padrão [μm]
Retangular Resfriado em água	20,3 ± 2,5
Retangular sem resfriamento	20,1 ± 2,6

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos de tamanho de grão, LRT, LE e alongamento em função da velocidade de extrusão do processo Conform, permite concluir que o aumento da velocidade não exerce influência significativa nas propriedades mecânicas de materiais fabricados com diferentes relações de extrusão. A homogeneidade microestrutural também não foi influenciada pela velocidade de extrusão.

O aumento de temperatura em função do aumento da velocidade de extrusão apresentou maior variação e maiores valores para o material redondo, com menor área de seção transversal, sendo encontrada uma temperatura 12,5% maior em comparação ao material retangular. Porém para todos os materiais não ocorreu diferença no tamanho de grão final, mostrando assim que essa variação de temperatura, de aproximadamente 12,5%, não exerce influência durante o processo de recristalização dinâmica.

Destaca-se, de acordo com os parâmetros utilizados e com os resultados obtidos, que o processo Conform foi capaz de promover aumento de produtividade propiciado

pelo aumento de velocidade, o que resulta em uma maior produção por unidade de tempo, sem que ocorram perdas de qualidade do produto, sendo que, independente da velocidade de trabalho, o material produzido apresentou as mesmas propriedades mecânicas e microestruturais.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Paranapanema SA pelo apoio a pesquisa e por permitir a divulgação deste e de outros trabalhos.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Song L, Yuan Y, Yin Z. Microstructural evolution in Cu-Mg alloy processed by conform. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*. 2013;2(03):100-105. <http://dx.doi.org/10.4236/ijnm.2013.23014>.
- 2 Khawaja K, Seneviratne L, Althoefer K. Wheel-tooling gap measurement system for conform extrusion machinery based on a capacitive sensor. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2005;127(2):394. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1870004>.
- 3 Wu P, Xie S, Li H, Yan M, Huang G, Cheng L. Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming process of copper concave bus bar. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007;17(2):280-286. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60085-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60085-5).
- 4 Huang K, Logé RE. A review on dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Materials & Design*. 2016;111:548-574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012>.
- 5 American Society for Testing and Materials. ASTM B187 / B187M-16: standard specification for copper, bus bar, rod, and shapes and general purpose rod, bar, and shapes. West Conshohocken: ASTM; 2016.

Recebido em: 10 Fev. 2017

Aceito em: 7 Ago. 2017