

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO INICIAL NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FIO DE COBRE FABRICADO PELO PROCESSO CONFORM

Resumo: O processo de conformação contínua, Conform, é amplamente utilizado na fabricação de fios, barras e perfis de cobre. Como matéria-prima são utilizados vergalhões fabricados por diferentes métodos de fundição, destacando-se fundição contínua horizontal com posterior laminação a quente (Contirod) e fundição contínua (Upcast). Dentre esses métodos, a principal diferença está presente na estrutura obtida, sendo que o primeiro apresenta microestrutura refinada com grãos recristalizados e, por outro lado, o segundo apresenta uma estrutura bruta de fundição, marcada pela presença de grãos colunares. Durante o processo Conform o material passa por grande deformação e aquecimento gerado pelo atrito entre o vergalhão e a roda extrusora, resultando em recristalização dinâmica. Neste trabalho foi avaliada a influência do tamanho de grão inicial dos diferentes vergalhões, nas propriedades mecânicas dos fios manufacturados pelo processo Conform. A caracterização das microestruturas antes e após a conformação foi realizada em microscópio óptico. Ensaios de limite de resistência a tração, escoamento e alongamento foram realizados nos fios produzidos. Foram encontradas microestruturas similares para ambos os materiais fabricados. Notou-se ainda, que o tamanho de grão inicial não exerce influência no limite de resistência a tração, escoamento e alongamento. A explicação para tal fato é que o vergalhão laminado a quente, com menor tamanho de grão, apresenta grande quantidade de contornos de grão, que são sítios para nucleação de grãos; porém, o material bruto de fundição apresenta maior tamanho de grão e conseqüente maior formação de heterogeneidades de deformação, como bandas de cisalhamento e de deformação, que também são sítios para nucleação de grãos. Assim, para os níveis de deformação e temperatura do processo, ambos os processos dão origem a tamanho de grão iguais após conformação.

Palavras-chave: Processo Conform, Tamanho de grão, Cobre.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria de transformação do cobre, o processo Conform, “Continuous Forming”, classificado como um método de extrusão é utilizado para transformar a matéria-prima utilizada, vergalhão, em um novo produto, com dimensional diferente, apresentando excelente acabamento superficial e propriedades homogêneas. Essa matéria-prima utilizada pode ser obtida por métodos diferenciados de fundição, em geral pelo modo contínuo, sendo os mais usuais a fundição contínua horizontal com ou sem laminação a quente posterior, conhecido como Contirod e o processo Upcast.

No processo Upcast o conjunto do ferramental, composto por uma matriz refrigerada, fica submerso no metal líquido na parte superior do forno, forçando o metal a preencher a matriz (Fig. 1). Em geral, a matriz é composta de grafite revestida por um anel de cobre, sendo este refrigerado a água, criando assim uma condição de troca térmica que permite a solidificação do metal. Após solidificado o metal é então puxado verticalmente e continuamente (Costa e Eklin, 2005).

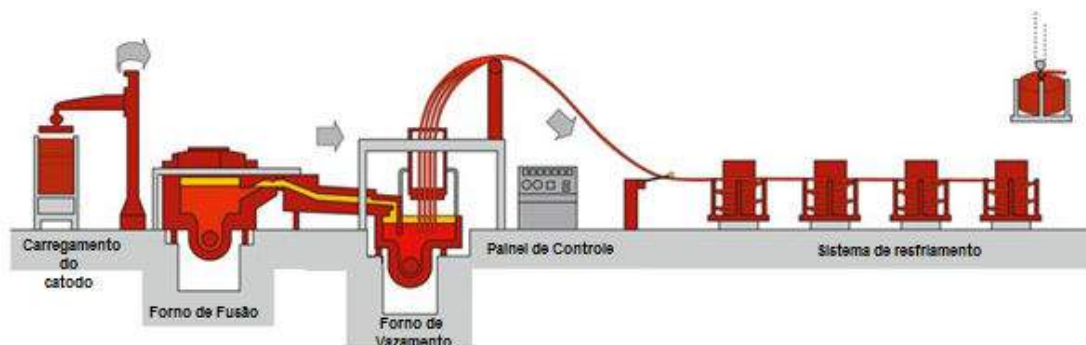


Figura 1. Esquema do processo Upcast (adpatado de KGHM, 2015).

Na fundição contínua horizontal de vergalhões de cobre (Contirod), dentre os métodos mais utilizados destaca-se o método da roda, que consiste em direcionar o metal líquido para uma roda que contém um canal central que garante o formato do produto a ser fundido, sendo que a solidificação ocorre no interior deste canal. Nesse processo, devido às limitações dimensionais e de acabamento superficial torna-se necessário etapas posteriores, de laminação a quente e decapagem mecânica ou química (Fig. 2).

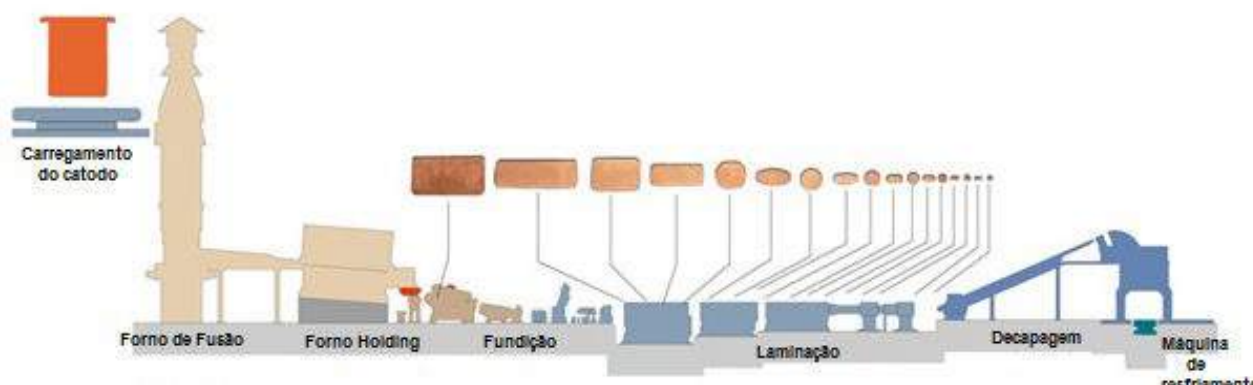


Figura 2. Esquema do processo Contirod (adaptado de KGHM, 2015)

Esses vergalhões são a matéria-prima base utilizada no processo de conformação contínua de cobre. Durante o processo Conform ocorre uma alteração microestrutural do material, devido às condições de conformação garantirem energia suficiente para que o processo de recristalização dinâmica aconteça. Segundo Huang et al (2016), para que ocorra o processo de recristalização dinâmica é necessário existir simultaneamente temperatura acima da de recristalização e elevada deformação, garantindo assim uma microestrutura com grão recristalizados.

No processo Conform (Fig. 3) o vergalhão é direcionado para o canal de uma roda de extrusão, sendo este comprimido por uma roda superior. Devido a deformação e ao atrito entre o material e o canal da roda de extrusão, ocorrer o aumento de temperatura do vergalhão deformado, atingindo o máximo valor na região final da placa de alimentação, permitindo assim o preenchimento da câmara de acumulação e posteriormente da matriz de extrusão, sendo esta última responsável por garantir a geometria final do produto fabricado.

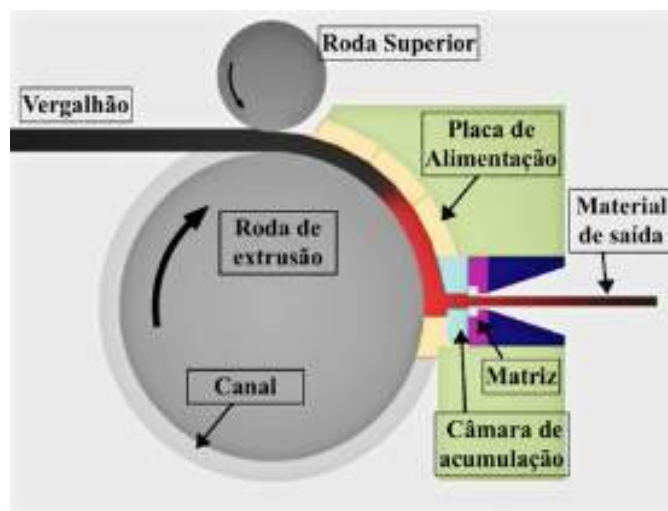


Figura 3. Esquema de funcionamento e principais partes do equipamento Conform.

Os materiais utilizados no presente estudo são vergalhões Contirod liga UNS C11000, conhecidos também como cobre ETP (Electrolytic Tough Pitch) e Upcast liga UNS C10200 conhecidos como OF (Oxygen Free), diferenciando-se pelo processo inicial de fabricação e, portanto, tamanho de grão inicial e pelo teor de oxigênio contido nas ligas. A norma ASTM B-187 especifica para a liga UNS C11000 um teor mínimo de cobre de 99,90% incluindo a prata, já para a liga UNS C10200 a norma especifica um teor de cobre mínimo de 99,95% e limita o teor de oxigênio em no máximo 0,0010% (10 ppm), segundo Pops (1985) a presença do oxigênio diminui a temperatura de recristalização do cobre,

podendo também formar precipitados com as impurezas presentes, tornando mais fácil a cinética de recristalização, pois as impurezas em solução sólida impactam a cinética de recristalização.

Wright (2011) descreve que a maioria do oxigênio contido na liga ETP, está presente na forma de óxidos, podendo ser considerado como um elemento de liga utilizado para remoção de elementos de soluto que diminuem a condutividade elétrica, caso se encontrem em solução sólida. Estes vergalhões são vulneráveis a formação de bolhas de hidrogênio quando utilizados em processos de soldagem e em determinadas atmosferas de tratamentos térmicos.

A presença de Cu₂O no cobre ETP durante o processo de tratamento térmico a alta temperatura inibe o crescimento do grão, desta forma a homogeneidade do cobre ETP é superior ao cobre OF. Ainda, a presença de Cu₂O na microestrutura pode alterar algumas propriedades como a ductilidade do fio produzido pelo vergalhão Contirod, pois os óxidos possuem diâmetros em torno de 0,50 µm e podem estar presentes na microestrutura e, portanto, durante a aplicação diminuir a ductilidade do fio. (Walkowicz, 2012).

Neste trabalho será analisada a influência do tamanho de grão inicial da matéria-prima, vergalhão, utilizado no processo Conform para a fabricação de um mesmo produto, um fio de seção circular, sendo avaliada a microestrutura e as propriedades mecânicas deste produto final.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram fabricados fios com seção circular, com diâmetro médio de 9,52 mm, fabricados pelo processo Conform. Foram investigadas duas condições, sendo que todos os parâmetros de processo, como velocidade de rotação (4 rpm), matriz (9,52mm), volume da câmara de acumulação (30 mm) e distância entre a roda de extrusão e a placa de alimentação (0,50 mm) não foram variados, com exceção da matéria-prima utilizada.

Dois tipos de matéria-prima foram utilizadas, sendo estas obtidas por processos diferentes, fundição contínua horizontal com laminação a quente (Contirod) e fundição contínua (Upcast). Ambas matérias-primas foram produzidas como vergalhão de seção circular e diâmetro médio de 12,50 mm.

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

Vergalhão	[%]				
	Cu	O ₂	Fe	Pb	Ni
Upcast	99,9987	0,0009	0,0001	0,0002	0,0001
Contirod	99,9678	0,0321	0,0001	0	0

Avaliando os valores de composição química dos vergalhões, não foram observadas diferenças significativas entre os resultados, sendo que o elemento que mais se diferenciou foi o teor de oxigênio, variando de 9 ppm para o vergalhão Upcast, para 321 ppm para o vergalhão Contirod. As duas ligas podem ser classificadas de acordo com a norma ASTM B-187, como liga UNS C11000, porém o vergalhão Upcast também pode ser classificado como liga UNS C10200, devido ao seu baixíssimo teor de Oxigênio, especificado para essa liga em 10 ppm máximo.

2.2. Análise metalográfica e de propriedades mecânicas

Amostras dos vergalhões e dos materiais fabricados foram retiradas e submetidas à preparação metalográfica, sendo essas desbastadas nas lixas de granas #220 até #1200, seguindo para polimento em pasta de diamante com grana de 9 a 1 µm. As microestruturas foram reveladas por imersão em trióxido de cromo durante 5 segundos. A análise da microestrutura foi realizada em microscópio óptico. Para avaliação da microestrutura do vergalhão utilizou-se o método comparativo de imagens de acordo com o proposto pela norma ASTM E-112. Para os materiais acabados os tamanhos de grão foram quantificados por meio da utilização do software Image-J, realizou-se a medição do perímetro de 100 grãos de cada amostra, ou seja, de cada liga estudada e calculou-se o diâmetro médio dos grãos.

Para a avaliação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de limite de resistência a tração (LRT), limite de escoamento (LE em 0,2%) e de alongamento após ruptura, sendo realizadas 5 repetições para cada condição, utilizando-se uma máquina universal de ensaios. O alongamento foi obtido pela diferença entre marcas realizadas inicialmente com uma distância de 50,8 mm e após o ensaio.

3. RESULTADOS

Na Fig. (4) são apresentadas as microestruturas dos vergalhões. Nota-se que o material fundido pelo método Upcast apresenta microestrutura mais grosseira, com grãos colunares e maiores quando comparados aos grãos refinados do material Contirod.

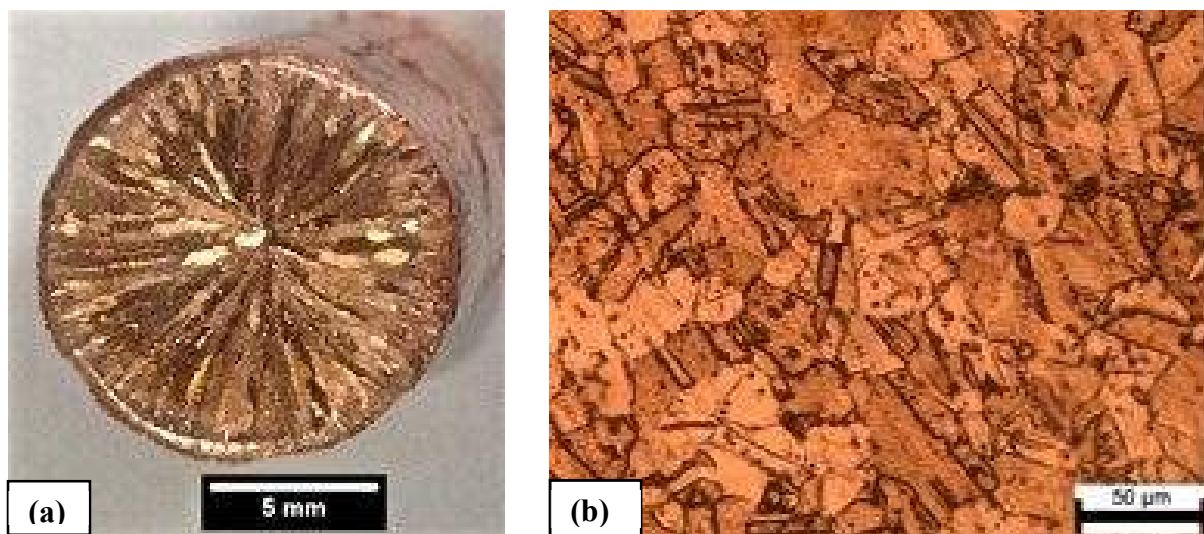


Figura 4. Estrutura do material na seção transversal do vergalhão: (a) Upcast e (b) Contirod.

Devido ao tamanho e formato dos grãos do vergalhão fundido pelo método Upcast, não é possível determinar o seu tamanho de grão pelo método comparativo, porém considerando que o material apresenta 12,50 mm, foi realizada uma contagem de grãos, sendo obtidos, em média, 4 grãos ao longo do diâmetro, obtendo assim, aproximadamente, um tamanho de grão médio de 3,12 mm. Por outro lado, o material Contirod apresenta grãos recrystalizados de tamanho médio 20 µm, obtido pelo método comparativo de análise. Essa diferença de tamanho de grão é de 99,4%.

Na Fig. (5) são apresentadas as micrografias dos materiais fabricados pelo processo Conform. Comparando as duas imagens não é observada diferença entre as microestruturas. Esse fato é confirmado pelas medições de tamanho de grão, conforme apresentado na Tab. (2), mostrando que ambos os materiais apresentaram o mesmo tamanho de grão médio.

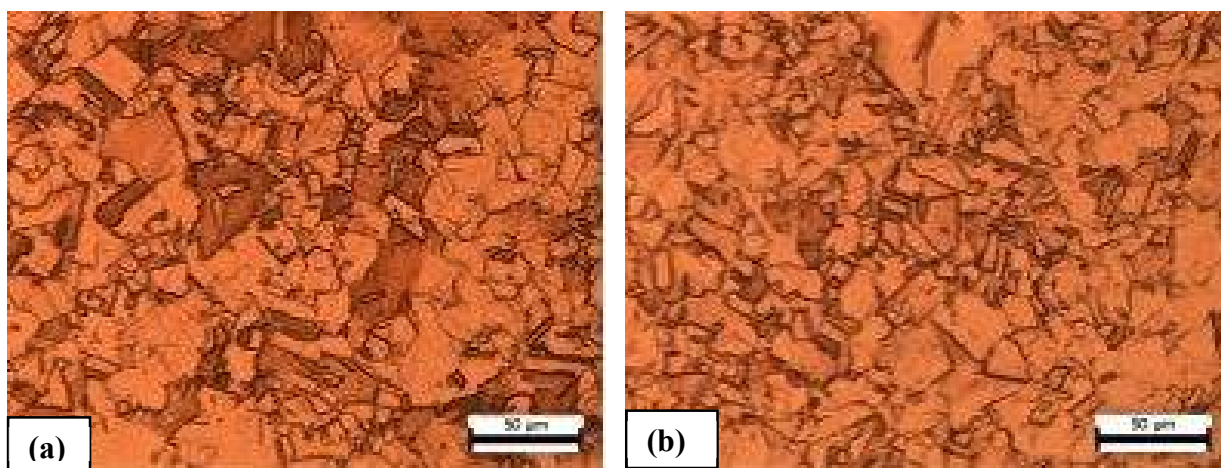


Figura 5. Microestrutura dos materiais produzidos utilizando vergalhão: (a) UpCast e (b) Contirod.

Tabela 2. Tamanho de grão médio dos materiais após o processo Conform

Material	Tamanho de grão médio [µm]	Desvio padrão [µm]
Upcast	10,11	3,25
Contirod	10,44	3,37

No trabalho de Huang et al (2016), os autores estudaram ligas de Mg e concluíram que o tamanho de grão inicial não influencia o tamanho de grão final em processos de recrystalização dinâmica, como mostrado neste trabalho. Os autores justificam pelo fato da matéria-prima com menor tamanho de grão apresentar grande quantidade de contornos de grão, que são sítios para nucleação de grãos; porém, a matéria-prima no estado bruto de fundição apresenta maior

tamanho de grão e consequente maior formação de heterogeneidades de deformação, como bandas de cisalhamento e de deformação, que também são sítios para nucleação de grão. Assim, para os níveis de deformação e temperatura do processo, ambos os processos dão origem a tamanho de grão iguais após conformação.

Ensaio de LRT, LE e alongamento foram realizados e o resultados são apresentados na Fig. (6). Assim como o tamanho de grão não sofreu variação, o LRT e o LE também não sofreram variações, apresentado valores similares. Por outro lado, o material Contirod apresentou menor valor de alongamento.

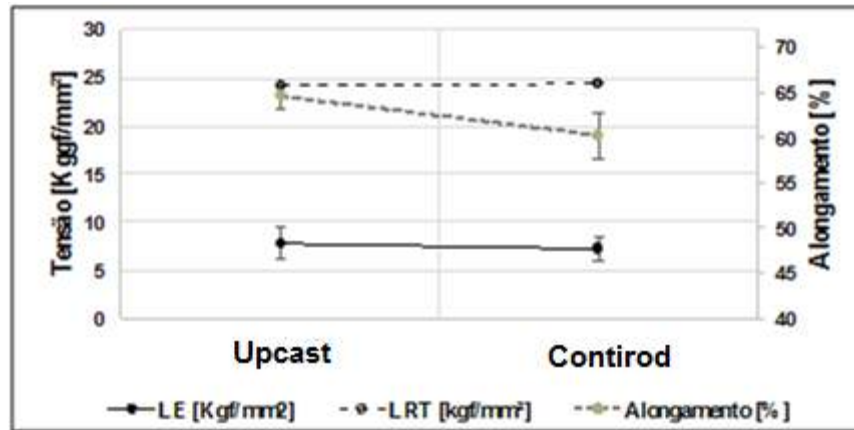


Figura 6. Resultados de propriedades Mecânicas: LRT, LE e Alongamento

Comparando os resultados de alongamento encontrados para os materiais produzidos, observa-se uma diferença de 6,7%, sendo que o material Upcast apresentou maior valor. Essa diferença é explicada pela presença do teor de oxigênio contido no vergalhão Contirod, favorecendo a formação de Cu₂O o qual segundo Walkowicz (2012) é responsável pela queda da ductilidade dos vergalhões ETP. Essa é uma diferença entre os dois processos de fundição, sendo que devido ao conceito do processo Upcast permite-se obtenção de ligas com baixíssimo teor de oxigênio, em geral menor do que 10 ppm.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados conclui-se que o tamanho de grão da matéria-prima não influencia o tamanho de grão final bem como as propriedades mecânicas do cobre quando conformado no processo Conform, Uma possível explicação para o fenômeno está no fato de o vergalhão com menor tamanho de grão, laminado a quente, contém maior quantidade de contornos de grão, estes sendo sítios para nucleação de grãos; por outro lado, o material com maior tamanho de grão, bruto de fundição, está susceptível a maior formação de heterogeneidades de deformação, como bandas de cisalhamento e de deformação, que também são sítios para nucleação de grão. Assim, para os níveis de deformação e temperatura estudados, ambos os processos dão origem a tamanho de grão iguais após conformação, não afetando também os limites de resistência a tração e o escoamento. Por outro lado, o alongamento apresentou uma variação, sendo esta decorrente da formação de Cu₂O, devido ao teor de oxigênio contido na liga Contirod e não em decorrência do tamanho de grão inicial dos vergalhões.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Paranapanema SA pelo incentivo a pesquisa e por permitir este e outros trabalhos.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM INTERNATIONAL. E 112-13: 2013, "Standard Test methods for determining average grain size. West Conshohocken", 28p.
- ASTM INTERNATIONAL. B 187-16: 2016, "Standard Specification for copper bar, bus bar, rod and shapes. West Conshohocken", 7p.
- Costa, R.S., Eklin, L., 2005, "Processo UPCAST, produção de bobina de vergalhões e fios de cobre de alta pureza", 12 CONAF, Congresso de Fundição, São Paulo, Brasil.
- Huang, K., Logé, R.E., 2016, "A review on dynamic recrystallization phenomena in metallic materials", Material Design. KGHM Corpotate, 2015, "Down-stream processing". Disponível em: <<http://kgbm.com/en/our-business/processes/down-stream-processing>>, acesso em 05 de fevereiro de 2017.
- Pops, H., 1985, "Nonferrous wire hndbook", Principles and practice, The wire association international, Volume 3.

Walkowicz, M., 2012, "The influence of parameters of the casting process on shaping of material properties of oxygen-free copper for highly advanced applications in electronics and electrical engineering", AGH University of Science and Technology, Krakow.

Wright, R. N., 2011, "Wire technology process engineering and metallurgy", Editora Elsevier, United States of America.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

INFLUENCE OF INITIAL GRAIN SIZE IN MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER WIRE MANUFACTURED BY THE PROCESS CONFORM

Resumo: The continuous forming process, Conform, is widely used in the manufacture of copper wires and bars. The rod are used as raw material, and are manufactured by different methods of casting, horizontal continuous casting with subsequent hot rolling and continuous casting UpCast. Among these methods, the main difference is in the structure obtained, the first one presents refined microstructure with recrystallized grains and, on the other hand, the second presents a casting structure, marked by the presence of columnar grains. During the Conform process the material undergoes great deformation and heating due to friction, resulting in dynamic recrystallization. In this work the influence of the rod grain size was evaluated, being made by the previously mentioned processes, in the mechanical properties of copper wires produced by the Conform process. The characterization of the microstructures before and after the conformation was performed under an optical microscope. Limit tensile strength, flow and elongation tests were performed on the produced wires. Similar microstructures were found for both fabricated materials. It was also observed that the initial grain size does not influence the limit of tensile strength, flow and elongation. The explanation for this phenomenon is that the hot rolled rod, with smaller grain size, presents a great amount of grain contours, which are sites for nucleation of grains; However, the casting material has a larger grain size and consequently greater formation of deformation heterogeneities, such as shear bands and deformation bands, which are also sites for grain nucleation. Thus, for the deformation and process temperature levels, both processes give rise to the same grain size after conformation.

Palavras-chave: Conform Process, Grain size, Copper.