

# Influência do grau de dureza da matéria-prima e da temperatura do processo na laminação de fios de cobre

*Influence of the raw material hardness and process temperature on lamination of copper wires*

**Rodrigo de Oliveira**

Msc. Eng/PGCEM/UDESC. WEG Equipamentos Elétricos S.A.  
Motores. Departamento de Fabricação de Fios  
Rua Rosa Dalçoquio, 100, 88311-720, Itajaí, SC, Brasil  
rodrigoo@weg.net

**Guilherme Ourique Verran**

Dr. Eng. Professor do Departamento de Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica - PGCEM-CCT/UDESC  
Campus Universitário s/n, Bairro Bom Retiro  
89223-100, Joinville, SC, Brasil  
gverran@joinville.udesc.br

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência da dureza da matéria-prima utilizada e da temperatura de laminação sobre o comportamento de deformação na fabricação de fios de cobre retangulares. Foram laminadas diversas amostras usando diferentes combinações dos parâmetros acima mencionados para possibilitar a avaliação do comportamento da deformação do material. A avaliação da deformação foi realizada utilizando o cálculo da relação entre as deformações axial e radial (parâmetro de Anisotropia), adicionalmente foram realizados ensaios mecânicos e análises metalográficas das matérias-primas e das amostras laminadas. Os resultados obtidos indicaram influencia significativa da dureza da matéria prima e da temperatura de laminação sobre o comportamento de deformação, mostrando incrementos no parâmetro de Anisotropia com a redução na dureza da matéria prima e com o acréscimo na temperatura de laminação.

**Palavras-chave:** cobre, laminação, microestruturas, propriedades mecânicas.

## Abstract

The present study was undertaken to investigate the influence of the raw materials hardness and process temperature on deformation behavior of rolled copper flat wires. Several samples were laminated using different combinations of the parameters above mentioned in order to evaluate the deformation behavior. Deformation was evaluated by calculation of axial and radial deformation relationship (Anisotropy parameter), additionally mechanical and metallographic characterization of the experimental samples and raw materials were realized. The results indicated significant influence of the raw material hardness and rolling temperature on the copper deformation behavior, showing increases in Anisotropy parameter with decrease in hardness and increase in rolling temperature.

**Key words:** copper, lamination, microstructures, mechanicals properties.

## 1. Introdução

A fabricação dos enrolamentos que compõem geradores e transformadores é realizada utilizando uma

linha de laminação, que tem como função reduzir a área de seção transversal dos fios retangulares de cobre, sendo que a matéria prima pode ser recebida em perfis redondos ou retangulares, comercialmente disponíveis no mercado. Os fios retangulares permitem um melhor arranjo dimensional nos enrolamentos, por isso são preferidos na montagem dos equipamentos. Nesta trabalho são descritos os resultados de uma pesquisa realizada em parceria entre a WEG Motores Elétricos – Departamento de Fios e o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais do Centro de Ciências Tecnológicas-UDESC (Oliveira, 2010). A Figura 1 apresenta um enrolamento utilizado em transformadores.

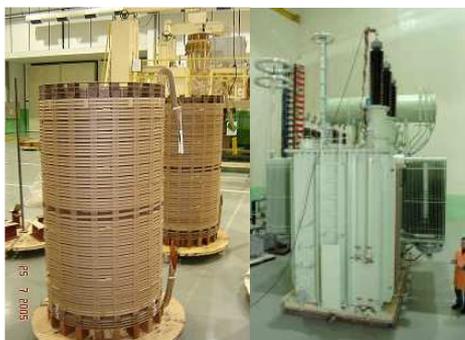


Figura 1: Enrolamento utilizado em transformadores (Oliveira, 2010).

Os fios retangulares possuem 03 características principais para a sua utilização. A dureza do produto final, a condutividade e as dimensões. A dureza do produto final define o grau de deformação mecânica ao qual o cobre pode ser submetido, uma vez que os enrolamentos são realizados mediante dobramentos e enrolados em espiras, umas sobre as outras, sendo isolados com diversos materiais como mica, papel ou verniz. O controle da dureza dos materiais é realizado com o tratamento térmico de recozimento (Krauss, 1989). Para a realização de um processo de conformação a frio, parte da energia gasta é armazenada na forma de defeitos cristalinos e estes defeitos causam um aumento significativo na dureza do material metálico (Dieter, 1984). A dureza da matéria prima utilizada para a laminação é uma característica importante para o processo de fabricação e será o foco principal do trabalho. A condutividade é uma propriedade intrínseca do material devido a sua composição química, sendo controlada basicamente através do monitoramento da matéria prima. As dimensões são definidas durante o processo de laminação. A tolerância de fabricação para os fios retangulares de cobre é definida conforme padrão de fabricação de fios retangulares utilizados em geradores e transformadores e está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Tolerâncias dimensionais dos fios retangulares.

Espessura (mm)	Tolerância dimensional (mm)
1,00 -3,00	+0,03 / -0,01
3,15 - 5,00	+0,05 / -0,03
> 5,00	+0,06 / -0,04
Largura (mm)	Tolerância dimensional (mm)
3,00 -5,00	+0,03 / -0,01
5,00 - 8,00	+0,05 / -0,03
> 8,00	+0,06 / -0,04

A laminação é um processo mecânico/metalúrgico de conformação plástica dos metais e ligas em que ocorre a redução da área da seção transversal reta de corpos metálicos pela sua passagem entre dois ou mais cilindros, dotados de movimento de rotação (Cetlin e Helman, 2005).

O processo de laminação é classificado de acordo com a temperatura do material a ser laminado (laminação a quente e laminação a frio) e/ou a geometria do produto resultante (laminação plana e laminação não plana) (Meyers e Chawla, 1982).

A linha de laminação utilizada na realização do estudo é constituída de um sistema de desbobinamento para vergalhões e fios trefilados, cinco estágios de laminação, onde três destes estágios são utilizados para a redução do material no sentido radial (espessura) e dois estágios de laminação utilizados para a redução do material no sentido axial (largura) e um sistema de bobinamento. A Figura 2 apresenta a linha de laminação utilizada para fabricação dos fios retangulares.



*Figura 2: Linha de laminação utilizada para fabricação de fios retangulares (Oliveira, 2010).*

O material utilizado no processo de laminação pode possuir características distintas, dependendo do dimensional do produto final, o fio pode ser oriundo de vergalhões de cobre, primeiro passe de laminação ou do processo de trefilação, onde para cada processo, o fio é fornecido à laminação com diferentes características mecânicas e que devem ser definidas e controladas para que se possa conhecer o comportamento do material quando submetido à deformação (relação entre a deformação axial e radial – parâmetro de anisotropia). Na laminação de materiais anisotrópicos, como o caso do cobre, a razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço de tração (ou compressão) é conhecida como parâmetro de anisotropia (R) (Hosford e Caddell, 1993)

A matéria prima pode possuir diferentes características mecânicas (dureza), sendo necessário um estudo mais detalhado das características mecânicas do material utilizado na laminação e a sua influência no processo. Outro parâmetro de vital importância no processo de laminação é a temperatura de contato entre os rolos laminadores e o material, pois este parâmetro causa influência no comportamento do material quando submetido à deformação (relação entre a deformação axial e radial – parâmetro de anisotropia) e também será foco deste estudo.

## **2. Materiais e Métodos**

Para a realização dos experimentos foram utilizados fios de cobre retangulares com dimensões de 9,00 mm de largura e 4,00 mm de espessura, com diferentes valores de dureza. Para a variação da dureza do material, diferentes lotes de amostras foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento. Através

do controle do processo de recozimento foram obtidos fios de cobre com recozimento pleno, recozimento intermediário, além do material encruado (não submetido ao tratamento térmico). Foram realizadas avaliações das características mecânicas da matéria prima após o processo de recozimento utilizando os ensaios de tração, dureza e análise metalográfica do material.

Os resultados dos ensaios de tração realizados nas matérias primas com diferentes características mecânicas estão apresentados na Tabela 2 e indicam os efeitos do tratamento de recozimento sobre as propriedades mecânicas das amostras dos diferentes lotes em estudo, ou seja, o material com recozimento pleno apresentou menor valor de tensão de escoamento e tensão de tração máxima se comparado com os valores destas mesmas propriedades para os materiais com recozimento intermediário e encruado.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos diferentes lotes de matéria-prima.

Tipo de Amostra	Tensão Máx. (Mpa)	Tensão Esc. (Mpa)
Recozimento Pleno	230,0 (0,6491)	77,54 (2,698)
Recozimento intermediário	236,4 (2,709)	85,15 (1,651)
Encruado	395,7 (0,3938)	352,1 (11,13)

Para o ensaio de dureza do material foram realizadas 03 medições em cada corpo de prova e calculado a média destas medições. A carga utilizada para a realização do ensaio foi de 1000 gramas aplicadas por um período de 30 segundos. Os resultados do ensaio de dureza realizado na matéria prima com diferentes características mecânicas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de dureza do fio de cobre (matéria-prima).

Identificação	Amostras	Dureza Vickers
Fio encruado 9,02 x 4,01 mm	CP1	128
	CP2	126
	CP3	125
	CP4	127
	Média	126,5
Fio recozido intermediário 9,00 x 4,00 mm	CP1	57
	CP2	56
	CP3	56
	CP4	57
	Média	56,5
Fio recozido pleno 8,96 x 4,00 mm	CP1	51
	CP2	51
	CP3	50
	CP4	51
	Média	50,7

Analisando os resultados dos ensaios de dureza apresentados na Tabela 3, verifica-se que os materiais com recozimento apresentaram valores de dureza muito menores que as amostras não recozidas (encruadas), evidenciando novamente a eficiência do tratamento térmico realizado.

O tamanho do grão é um fator importante para avaliar as propriedades mecânicas de um material policristalino, em especial a dureza e o limite de escoamento (Baudin *et al.*, 2007). Materiais com grãos mais finos possuem maior dureza e resistência mecânica do que materiais com grãos grosseiros, pois os primeiros possuem maior número de contornos de grão (Ciupilnski *et al.*, 1997). A análise metalográfica foi

realizada para verificar as diferenças nos tamanhos dos grãos dos materiais utilizados neste trabalho. A Tabela 4 apresenta os resultados das análises metalográficas realizadas.

Tabela 4: Resultados da análise metalografica das amostras de matéria-prima.

Identificação	Nº amostras	Metalografia	Tamanho de Grão ( $\mu\text{m}$ )		
			Mínimo	Máximo	Médio
Material encruado	1	- Matriz de cobre $\alpha$ , grãos refinados.	3,5	7,6	5,5
	2		3,5	6,8	5,2
	3		3,1	6,1	4,6
	4		3,2	6,3	4,8
Material com recozimento intermediário	1	- Matriz de cobre $\alpha$ , grãos refinados distribuídos.	3,09	11,08	6,75
	2		3,48	9,36	7,01
	3		3,48	12,67	8,38
	4		3,33	18,25	9,99
Material com recozimento pleno	1	- Matriz de cobre $\alpha$ , com grãos grosseiros.	7,78	24,57	16,25
	2		6,62	29,58	16,61
	3		7,13	28,97	15,61
	4		6,44	38,42	17,62

Os resultados apresentados na Tabela 4 confirmam a existência de variações significativas entre os tamanhos dos grãos das amostras encruadas e as recozidas, observa-se também uma evidente diferença entre as amostras submetidas a recozimento pleno (grãos mais grossos) e as amostras com recozimento intermediário.

O processo de laminação a frio é realizado para a conformação do material, atingindo a precisão dimensional desejada na fabricação do fio retangular. Para a realização deste experimento, foi utilizado um trem contínuo de laminação equipado com 05 estágios de laminação, conforme apresentado na Figura 2. Para cada tipo de material, foi realizada a redução da espessura e aplicada à variação da temperatura do processo de laminação. A variação na temperatura de processo foi conseguida pela utilização de fluido refrigerante em quantidades diferentes para cada experimento, atingindo valor médio de 88°C para a não utilização de fluido refrigerante, 52°C para a utilização de fluido refrigerante em quantidade moderada e 27°C para a utilização do fluido em grande quantidade. A combinação de experimentos está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Combinações dos experimentos de laminação, para a redução de 1,00 e 2,00mm na espessura da amostra, com a variação dos parâmetros dureza e temperatura.

Experimento (nº)	Tipo de material (dureza)	Temperatura do processo (°C)
1	Encruado	27
2		52
3		88
4	Recozimento intermediário	27
5		52
6		88
7	Recozimento pleno	27
8		52
9		88

Um corpo, ao ser tracionado (ou comprimido como no caso da laminação), tende também a sofrer contrações (ou dilatações) laterais (Smith, 1998), conforme mostrado para o cubo da Figura 3, que é tracionado na direção  $X_3$ : estão indicadas no cubo a tensão  $\sigma_{33}$  e as deformações resultantes.

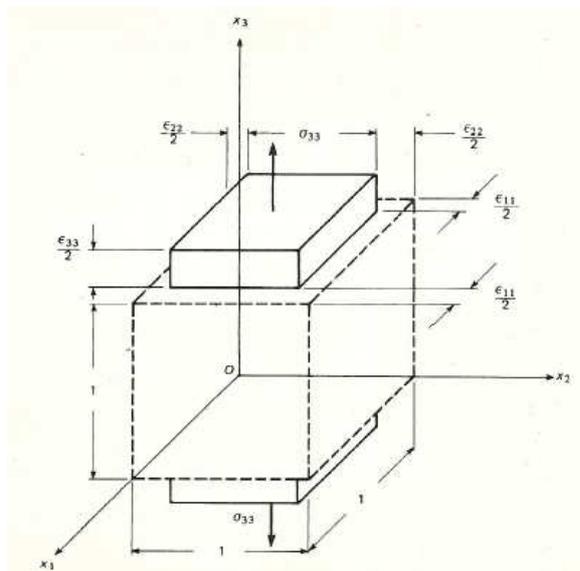


Figura 3: Cubo nas direções unitárias sendo tracionado na direção  $0x_3$  (adaptado de Smith, 1998).

Durante o processo de laminação ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação, conforme Figura 4.

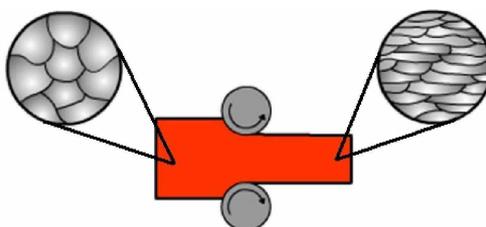


Figura 4: Alongamento dos grãos durante a laminação (adaptado de Schaeffer, 2004).

Calculando as deformações do material nas diversas direções e relacionando estas deformações, pode-se encontrar o parâmetro de anisotropia ( $R$ ) do material, que é a razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço de tração (ou compressão) e está descrito abaixo (Schaeffer, 2004).

$$R = - \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = - \frac{\ln(w_f / w_o)}{\ln(t_f / t_o)} \quad (\text{eq. 01})$$

Onde  $w_o$  e  $t_o$  são a largura e espessura iniciais respectivamente, e  $w_f$  e  $t_f$ , são a largura e espessuras finais.

Para os experimentos de laminação, as amostras foram analisadas dimensionalmente, sendo calculadas as deformações do fio laminado e o parâmetro de anisotropia.

O objetivo desta análise foi conhecer o comportamento da deformação do material com diferentes características mecânicas na laminação e relacionar estas variações de deformação com as variáveis do processo (temperatura) e matéria prima (dureza).

### 3. Resultados e Discussão

Para todas as combinações de experimentos, foram realizadas medições dimensionais em amostras laminadas com a variação dos parâmetros citados. A Tabela 6 apresenta os resultados da análise dimensional e o cálculo do parâmetro de anisotropia para a redução de 1,00mm na espessura do material, realizado no processo de laminação.

Tabela 6: Resultados da análise dimensional (cálculo do parâmetro de anisotropia).

<b>Tipo de material</b>	<b>Temperatura do processo (°C)</b>	<b>Parâmetro de anisotropia (R)</b>
Encruado	27	0,38
	52	0,42
	88	0,46
Recozimento Intermediário	27	0,42
	52	0,52
	88	0,58
Recozimento pleno	27	0,52
	5	0,55
	88	0,62

O gráfico da Figura 5 apresenta as variações do parâmetro de anisotropia com a variação da temperatura para os três materiais investigados, com a redução de 1,00mm na espessura do material.

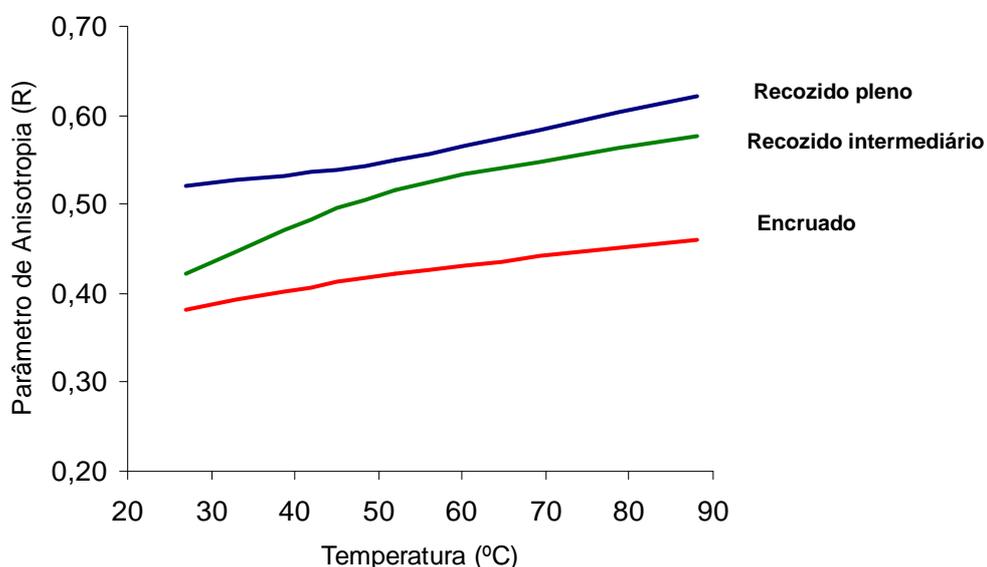


Figura 5: Variação do parâmetro de anisotropia com a temperatura de laminação para redução de 1,00mm na espessura do material

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise dimensional e o cálculo do parâmetro de anisotropia para a redução de 2,00mm na espessura do material, realizado no processo de laminação.

Tabela 7: Resultados da análise dimensional (cálculo do parâmetro de anisotropia).

<b>Tipo de material</b>	<b>Temperatura do processo (°C)</b>	<b>Parâmetro de anisotropia (R)</b>
Encruado	27	0,29
	52	0,32
	88	0,35
Recozimento Intermediário	27	0,31
	52	0,38
	88	0,42
Recozimento pleno	27	0,39
	52	0,41
	88	0,46

O gráfico da Figura 6 apresenta as variações do parâmetro de anisotropia com a variação da temperatura para os três materiais investigados, com a redução de 2,00mm na espessura do material.

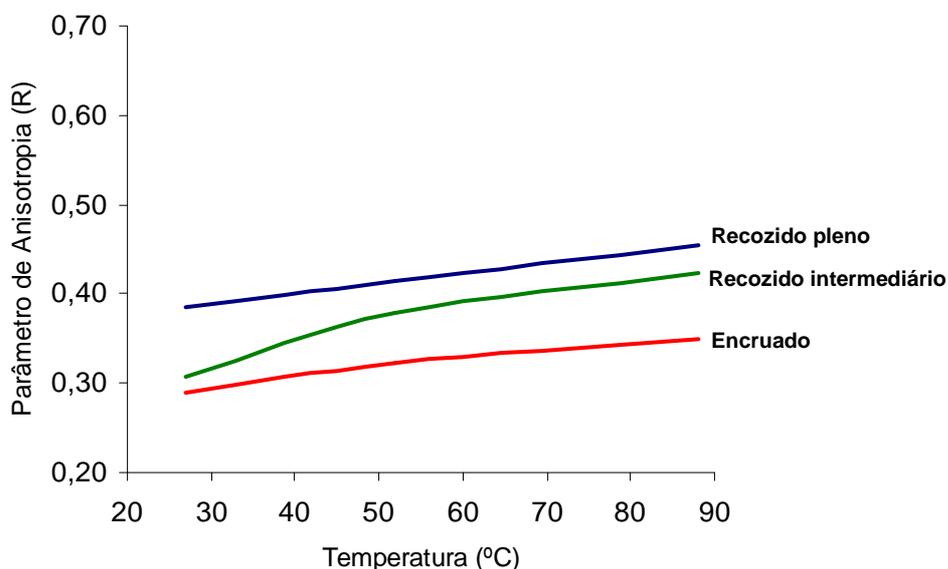


Figura 6: Variação do parâmetro de anisotropia com a temperatura de laminação para redução de 2,00mm na espessura do material.

Os resultados do cálculo do parâmetro de anisotropia (R) indicam a ocorrência de grandes variações na deformação do material utilizando como matéria prima cobre com diferentes valores de dureza e diferentes valores de temperatura do processo de laminação. Estas variações podem ser explicadas pela análise metalografica da matéria prima, onde observa-se que, para o material encruado, os grãos estão orientados no sentido longitudinal, sendo esta a direção preferencial no seu escoamento, quando aplicada a deformação. A Figura 7 mostra a microestrutura do material encruado, que apresenta um alinhamento preferencial dos grãos no sentido de deformação do mesmo.

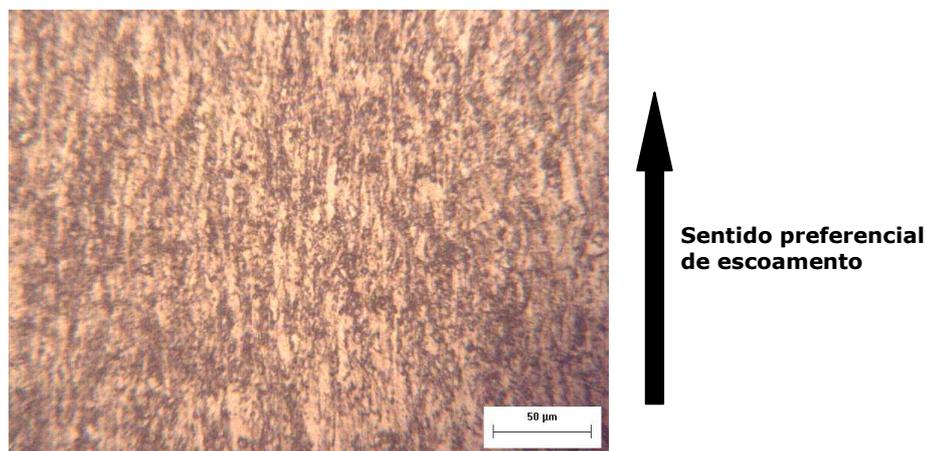


Figura 7: Micrografia mostrando o alinhamento dos grãos em amostra do material encruado.

Também pode-se observar que uma maior redução da espessura das amostras causou variações no valor do parâmetro de anisotropia, este comportamento também pode ser explicado por um maior encruamento do material quando aplicada maior deformação.

Quando aplica-se o tratamento térmico de recozimento ao cobre, os grãos, que antes estavam direcionados no sentido longitudinal quando encruados, tornam-se novamente equiaxiais (dimensões iguais em todas as direções), não havendo direção preferencial de escoamento, variando o comportamento durante a deformação e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de Poisson. A Figura 8 apresenta a microestrutura do material com recozimento pleno evidenciando a ocorrência de recristalização dos grãos em função do recozimento. Esta alteração na morfologia dos grãos é responsável pelas significativos incrementos observados nos valores do parâmetro de anisotropia ( $R$ ) para as amostras submetidas aos recozimentos pleno e intermediário.

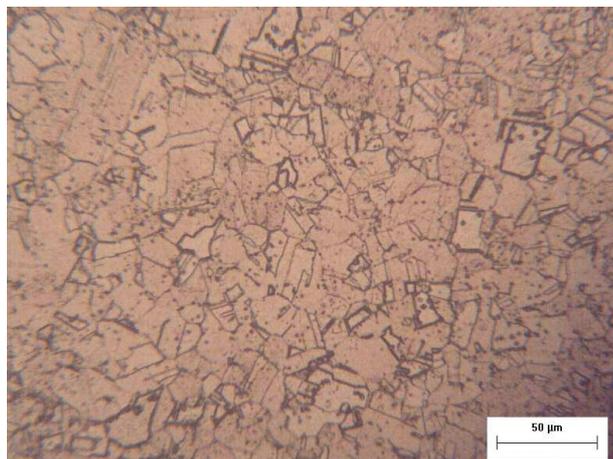


Figura 8: Microestrutura de amostra com recozimento pleno.

Analisando os resultados também pôde-se observar a ocorrência de variações na deformação do material com a mudança da temperatura do processo de laminação. Uma possível explicação para este comportamento seria o início da ocorrência de recuperação do material com o aumento da temperatura, já que os valores de temperatura alcançados no processo de laminação são bem menores que o valor de recristalização do cobre, que gira em torno de 250°C.

## 4. Conclusões

- A análise do processo de laminação, com a variação de parâmetros fundamentais como a dureza e a temperatura, proporcionou um melhor entendimento da influência destes na deformação do material, tornando possível a parametrização do procedimento (posicionamento) nos rolos laminadores, em um trem contínuo laminador.
- Foi observado que a dureza, a deformação aplicada e a temperatura influenciam diretamente no valor do parâmetro de anisotropia (R), quanto maior a dureza do material, maior a deformação aplicada e menor a temperatura do processo, menor será o valor do parâmetro.
- O estudo permitiu avaliar as diferenças de comportamento da deformação de materiais isotrópicos, os quais se deformam igualmente em todas as direções e de materiais anisotrópicos, os quais apresentam variação no escoamento do material nas diversas direções. Também foi possível verificar a influência da anisotropia no processo de laminação.
- O estudo permitiu o desenvolvimento de uma especificação técnica de recebimento da matéria prima para a utilização no processo de laminação, na qual é possível fixar o valor de temperatura e/ou dureza para a obtenção do produto final.

## Referências

- BAUDIN, T.; ETTER, A.L.; PENELLE, R. 2007. Annealing twin formation and recrystallization of cold – drawn copper wires from EBSD measurements. *Materials Characterization*, **58**(10):947-952. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.009>.
- CETLIN, P.R.; HELMAN, H. 2005. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. 2ª ed., São Paulo, Artliber, 263 p.
- CIUPILNSKI, L.; RALPH, B.; LURZYDLOWSKI, K.J. 1997. Methods for the characterization of grain size. *Materials Characterization*, **38**(3):177-185. [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803\(97\)00042-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803(97)00042-9)
- DIETER, G.E. 1984. *Workability testing techniques*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 356 p.
- HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. 1993. *Metal Forming: Mechanics and metallurgy*. 2ª ed., New Jersey, Prentice-Hall, 364 p.
- KRAUSS, G. 1989. *Heat treatment and processing principles*. Materials Park, ASM, 497 p.
- MEYERS, M.A.; CHAWLA, K. 1982. *Princípios de metalurgia mecânica*. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 505 p.
- OLIVEIRA, R. 2010. *Estudo do processo de laminação de fios de cobre: influência das propriedades mecânicas e da temperatura de processamento*. Joinville, SC. Dissertação de mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, 89 p.
- SCHAEFFER L. 2004. *Conformação de chapas metálicas*. Porto Alegre, Editora Imprensa Livre, 194 p.
- SMITH, W.F. 1998. *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo, McGraw Hill Interamericana do Brasil, 448 p.

Submissão: 18/07/2010  
Aceite: 07/11/2010