



## Efeito da Taxa de Deformação na Microestrutura e Microdureza do Cobre Eletrolítico

Everton Barbosa Nunes<sup>1</sup>, Antônio Rodolfo Paulino Pessoa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Campus Avançado do Pecém - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)  
Caixa Postal 62.670-000 – Pecém, CE – Brazil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia e Tecnologia – Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA) – Mossoró, RN - Brazil

everton.nunes@ifce.edu.br, rodolfopaulino@ufersa.edu.br

**Abstract.** *Copper and its alloys constitute one of the largest business groups, being widely used due to excellent thermal and electrical conductivity, good corrosion resistance and easy machinability. The aim of this study is to evaluate the influence of deformation on the microstructure and microhardness of electrolytic copper. First, annealing heat treatment was performed. Subsequently, two deformation rates (10 and 20%) were imposed by cold rolling in order to verify the influence these rates in relation to non-deformed material. Microstructural characterization and microhardness testing were performed, analyzing the normal and longitudinal sections in relation to the direction of rolling. The strain rate had an influence on the grain morphology, providing more elongated grain in relation to the longitudinal direction of rolling. Higher levels of microhardness were observed for the deformed conditions in comparison to the non-deformation condition. No significant differences of microhardness were observed in relation to the normal direction and the longitudinal direction of rolling for a 20% deformation rate.*

**Resumo.** *Cobre e suas ligas constituem um dos maiores grupos comerciais, sendo bastante utilizada devido à excelente condutividade térmica e elétrica, boa resistência à corrosão e fácil usinabilidade. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da deformação na microestrutura e microdureza do cobre eletrolítico. Primeiramente, foi realizado tratamento térmico de recozimento. Posteriormente, foram impostas duas taxas de deformações (10 e 20%) por laminação a frio, de modo a verificar a influência destas taxas em relação ao material não deformado. Foram feitas a caracterização microestrutural e ensaio de microdureza, analisando as seções normais e longitudinais à direção de laminação. A taxa de deformação teve influência na morfologia dos grãos, proporcionando grãos mais alongados em relação à direção longitudinal de laminação. Em relação à microdureza foram observados maiores níveis de microdureza para as condições deformadas em relação à condição sem deformação. Não foram observadas diferenças significativas de microdureza em relação à direção normal e longitudinal à direção de laminação para taxa de deformação de 20%.*



## 1. Introdução

As reservas brasileiras de cobre (aproximadamente 36 milhões de toneladas) chegam a 2,5% das reservas mundiais, o que faz com que o Brasil tenha uma das maiores reservas mundiais, ocupando o segundo lugar (9%) na participação entre as principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada, perdendo apenas para o ferro (IBRAM, 2019). Logo, é evidente pesquisas mais intensas na área de ciência e tecnologia em relação às suas aplicabilidades. No Brasil, a maioria da aplicação estão nos setores de eletrônica, civil, bélico, agricultura, transporte e saúde. Estes fatores credenciam o cobre a ser utilizado amplamente em escala industrial e, principalmente, na indústria de eletroeletrônicos. O cobre eletrolítico tem aplicações específicas, como: calhas, telhados, vedações, radiadores de automóveis, componentes elétricos, equipamentos de indústrias de processamento químico, entre outros (Ferreira, 2018).

O cobre é um metal mole, maleável, dúctil, boa resistência mecânica, boa trabalhabilidade e boa resistência à corrosão atmosférica, boa resistência à corrosão da água do mar e boa resistência à corrosão de reagentes químicos, e principalmente alta condutividade elétrica e térmica, características estas que o evidenciam na utilização em condutores elétricos (Ramanathan, 1988).

Embora haja algumas restrições em relação aos processos de fabricação do cobre e suas ligas, este é capaz de ser deformado ou usinado de forma desejada por qualquer um dos processos de fabricação comuns. Cobre geralmente pode ser laminado, prensado, estampado ou estirados a frio. Em elevadas temperaturas pode ser realizado o processo de laminação, extrusão ou forjamento. Caso seja necessária a obtenção de variedades funcionais ou acabamento decorativo pode ser utilizado o polimento, texturização ou chapeamento seguido de recobrimento. Resistência e ductilidade é uma combinação que faz do cobre o metal ideal para condutores. Normalmente quanto mais resistente é um metal, menos flexibilidade ele apresenta, algo não observado no cobre.

Durante a conformação a frio um bom controle das variáveis de processamento garante a mudança da forma geométrica, microestrutura e propriedades mecânicas. Pesquisas recentes vêm estudando o efeito do caminho de deformação na evolução microestrutural de metais e as alterações consequentes em suas propriedades mecânicas. Na superfície das chapas laminadas, além da compressão no estado plano, ocorrem deformações cisalhantes em sentidos opostos devido à mudança de direção da força de atrito que age na superfície da chapa, em função da posição dessa em relação aos cilindros laminadores (Zhang, 1998). Ao entrar na abertura dos cilindros de laminação o atrito puxa a camada superficial em direção ao sentido de laminação; após o plano neutro, a força de atrito muda de sentido. Quanto maior o coeficiente de atrito, maior a deformação cisalhante (Smith, 1998). Esses cisalhamentos são conhecidos como “deformação redundante”, uma vez que não contribui para mudança de dimensões, mas alteram a microestrutura e consequentemente as propriedades do material.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do cobre eletrolítico em relação à microestrutura e microdureza submetido à deformação, sendo um parâmetro importante na escolha do cobre em escala comercial.

## 2. Materiais e Métodos

O material utilizado foi o cobre eletrolítico (UNS C11000) com 2,45 mm de espessura. A composição química segundo o fabricante é de no mínimo 99,9% de cobre, podendo ter a presença de prata, oxigênio, enxofre e outras impurezas (ASTM B 224, 2016).

Primeiramente, foi realizado o tratamento térmico de recozimento a uma temperatura de 600 °C durante 10 min para alívio de tensões e recristalização dos grãos encruados (Davies, 1990). A chapa de cobre foi submetida à taxa de deformação de 10 e 20% em um laminador do tipo duo não reversível (marca Coelho modelo LB 100). Foram cortadas as seções normais e longitudinais à direção de laminação e posteriormente embutidas a quente.

O procedimento de preparação das amostras para a caracterização metalográfica do cobre consistiu no lixamento de 100 até 1200 *mesh* e realização de polimento manual com pasta de diamante na sequência 3 e 1  $\mu\text{m}$  de tamanho médio de partícula (amostras com 20% de deformação) ou alumina de 1  $\mu\text{m}$  (amostras com 10% de deformação), utilizando lubrificação com água destilada e limpeza adequada da amostra entre os polimentos. Foi realizado a preparação de todas as amostras na politriz e lixadeira da marca AROTEC, modelo AROPOL E 2V.

O reagente para o ataque do cobre foi o perclorato de amônio (10 g) e água destilada (100 mL), sendo que é um dos mais indicados para revelar os contornos de grão (Smith, 1998). O tempo de imersão do ataque variou de 1 min a 1 min e 40 s e foi interrompido com água corrente, de modo que a superfície de observação foi secada através da evaporação de álcool etílico absoluto, auxiliada por jato de ar quente.

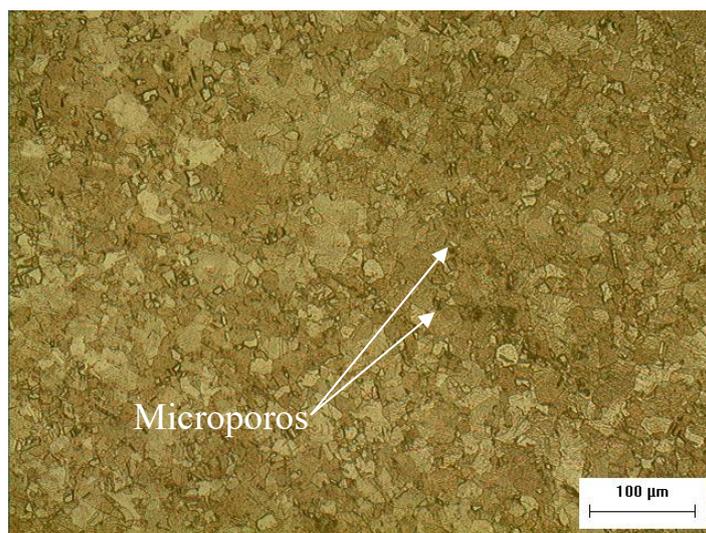
A caracterização metalúrgica das amostras foi feita por microscopia ótica com o registro das fotos realizado com a ajuda de software acoplado ao microscópio Olympus GX41. Os aumentos utilizados foram de 200x e 500x, de acordo com as especificidades.

As medições de microdureza realizadas no trabalho foram feitas com a utilização de carga de 100 g durante 30 s com espaçamento de 0,4 mm, segundo a norma ASTM E384 (ASTM, 2009) com o microdurômetro SHIMADZU modelo MHV-2. Para uma melhor avaliação foram realizadas 10 medições para cada amostra.

## 3. Resultados e Discussão

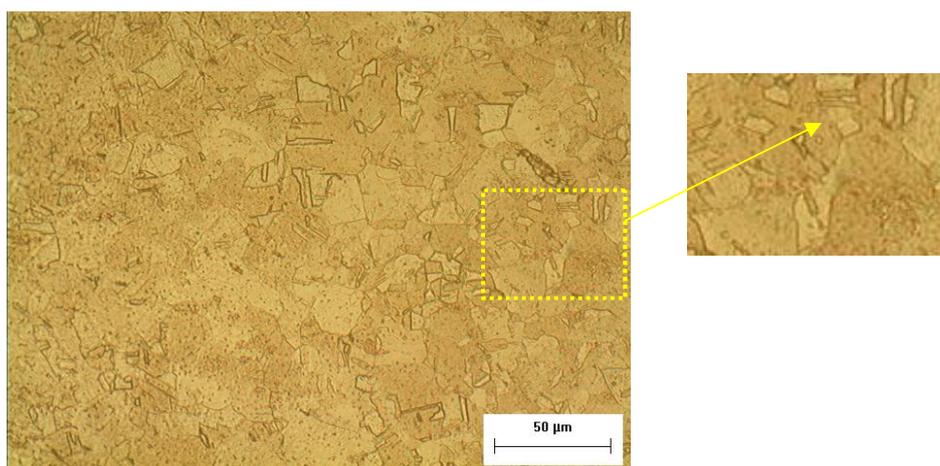
### 3.1 Microestrutura

Na Figura 1 é mostrada a microestrutura do cobre eletrolítico recozido.



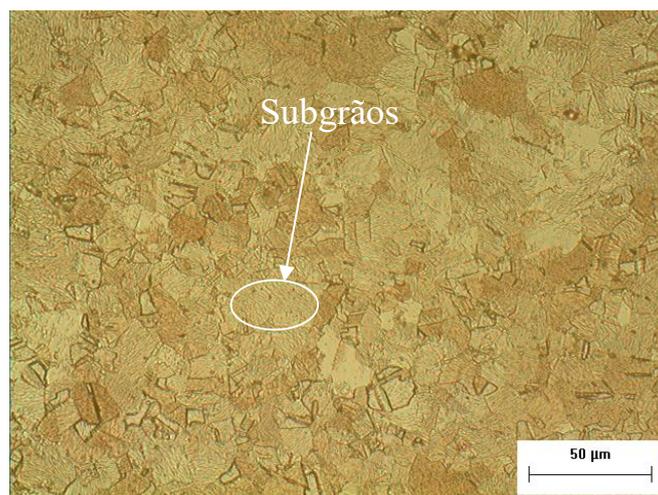
**Figura 1. Microestrutura do cobre sem deformação (Autor, 2021).**

Foram observadas na condição recozida maclas de recozimento provenientes do crescimento do grão, como mostrada na Figura 2. Vale salientar que a relação da orientação da macla com a da matriz é a mesma da macla mecânica.



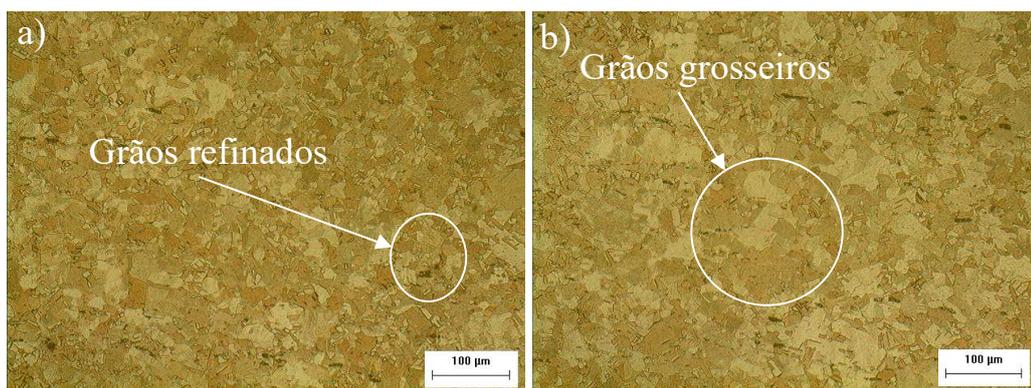
**Figura 2. Microestrutura do cobre sem deformação (Autor, 2021).**

Foram observadas a presença de subgrãos em algumas regiões, como mostrado na Figura 3.



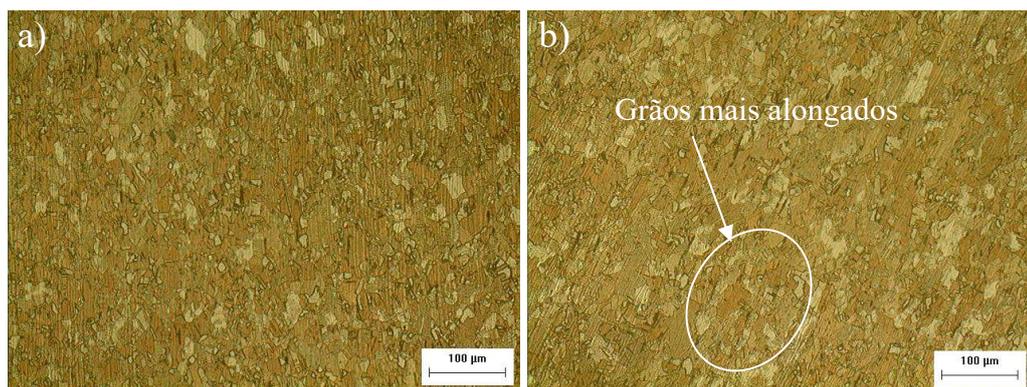
**Figura 3. Microestrutura do cobre não deformado com formação de subgrãos (Autor, 2021).**

Na Figura 4 são mostradas as micrografias do cobre deformado em 10%, sendo observadas heterogeneidades ao longo da região (análise qualitativa), de modo que houve regiões com maior crescimento de grão (Figura 4b) em relação às outras regiões (Figura 4a).



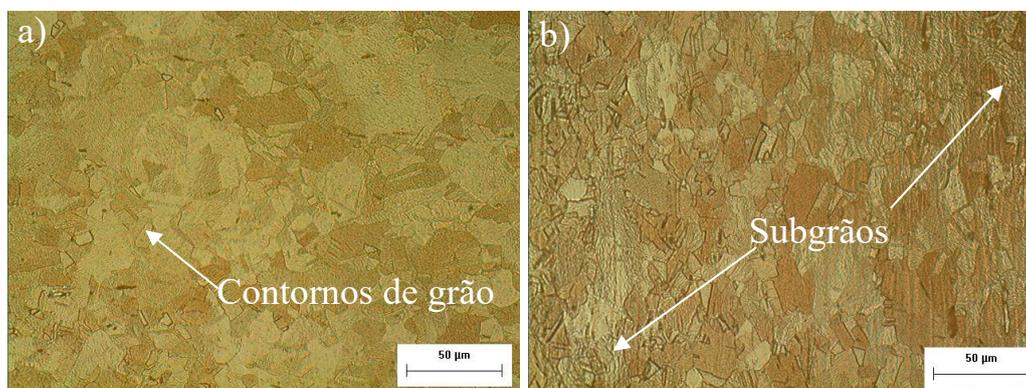
**Figura 4. Microestrutura do cobre laminado a 10% na direção normal à laminação (Autor, 2021). a) Grãos menores; b) Grãos maiores.**

Na Figura 5 são mostradas as microestruturas do cobre laminado a 10% na região próxima à superfície (Figura 5a) e no centro da seção da amostra (Figura 5b) na seção longitudinal à direção de laminação.



**Figura 5. Microestrutura do cobre laminado a 10% na direção longitudinal à laminação (Autor, 2021). a) Próxima à superfície; b) No centro.**

A Figura 6 ilustra a diferença de morfologia na direção longitudinal no material deformado a 10%.



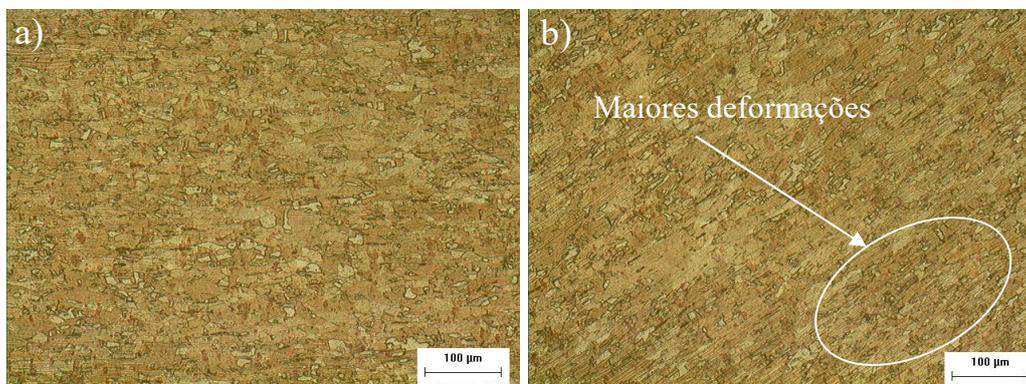
**Figura 6. Microestrutura do cobre laminado a 10% na direção longitudinal à laminação (Autor, 2021).**

Na Figura 7 é mostrada a microestrutura para o cobre laminado a 20% na direção normal à laminação.



**Figura 7. Microestrutura do cobre laminado a 20% na direção normal à laminação (Autor, 2021).**

Na Figura 8 são mostradas as microestruturas do cobre laminado a 20% na direção longitudinal à laminação.



**Figura 8. Microestrutura do cobre laminado a 20% na direção longitudinal à laminação (Autor, 2021). a) Na borda; b) No centro.**

Na Figura 1 foram verificados grãos equiaxiais recristalizados ao longo de toda a região, distribuídos de forma homogênea. De forma geral, ainda foram observadas pequenas cavidades, de modo que estes microporos são intrínsecos ao material (Srivatsan *et al.*, 2002).

Contornos de grãos mais revelados podem ser vistos (Figura 2), podendo estar relacionado ao emaranhamento de discordâncias, morfologia característica já observada na literatura. Blewitt (1953) identificou que as discordâncias (defeitos menos móveis) permanecem na microestrutura mesmo depois do recozimento e contribuem efetivamente para o encruamento. No entanto, é necessária uma análise mais criteriosa por Microscopia Eletrônica de Varredura ou de Transmissão.

Depois do recozimento (Figura 3), as paredes de células emaranhadas transformam-se numa estrutura de discordâncias mais regular, ou em contornos de baixo ângulo, diminuindo número de discordâncias no interior das células. As células, com o avanço do processo de recuperação, transformam-se em subgrãos, e neste estágio existe uma pequena alteração na escala da estrutura, de célula para o subgrão. A transição através das discordâncias emaranhadas nas paredes das células para formação dos contornos de baixo ângulo dos subgrãos pode ser considerada com uma etapa do processo de recuperação que envolve anulação de algumas discordâncias redundantes e rearranjo de outras dentro dos contornos de baixo ângulo.

O estado deformado (Figura 4) é caracterizado principalmente pela heterogeneidade da sua microestrutura, por exemplo: a presença de densas paredes de discordâncias (“DDW’s- “Dense Dislocation Walls”), contornos incidentais (“IDB’s- Incidental Dislocations Boundaries”), blocos de células (“CB’s-Cell Blocks”), microbandas (MB’s-Microbands”), bandas de transição, bandas de cisalhamento entre outras.

Foi observado na Figura 5 que na região central da amostra os grãos ficaram mais alongados devido à laminação, possuindo maior alinhamento da estrutura em comparação com a região próxima à superfície laminada.

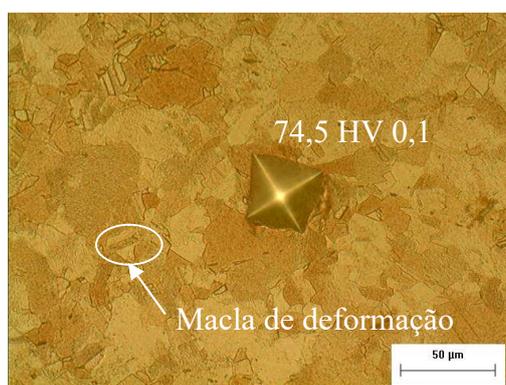
A diferença da morfologia dos grãos é proveniente do processo de laminação que provoca deformação biaxial, proporcionando encruamento. Foram observadas maiores quantidades de subgrãos, além da presença de grãos com contornos mais evidentes (Figura 6).

De forma geral, para pequenas deformações (Figura 7) são encontradas células de discordâncias, paredes densas de discordâncias, microbandas, bloco de células, entre outros, sendo comprovado somente por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).

Maiores deformações nas regiões no centro da amostra foram observadas, de modo que as lamelas tenderam a alinhar-se paralelamente com a direção de laminação (Figura 8b). Também foram observadas menor quantidade de maclas com maior nível de deformações, pois grãos mais refinados requerem tensões mais elevadas de cisalhamento para a formação de maclas, de tal forma que podem superar as tensões de escorregamentos dos planos (Agnew, 2001).

### 3.2 Microdureza

Durante a deformação plástica há aumento da densidade de discordâncias, sendo que quanto maior esta densidade, maior a chance de interações entre estas, bloqueando seu movimento. Ao deformarmos plasticamente o metal, ocorre uma movimentação de discordâncias gerando campos de tensões que interagem entre si tornando mais difícil a deformação plástica em relação ao metal puro, ou em nosso caso, o cobre eletrolítico. Este campo de tensão aumenta a dureza e pode-se diminuir esta tensão provocando a queda da dureza mediante um tratamento térmico denominado alívio de tensões. Os campos de tensão associados às discordâncias indicam o aumento da energia do sistema metálico, sendo esta fornecida durante a deformação plástica. Na Figura 13 é mostrada uma endentação realizada com microdureza obtida de 74,5 HV, além da presença de macla de deformação.



**Figura 9. Micrografia da amostra laminada a 10% na direção normal à laminação (Autor, 2021).**

Em relação à microdureza foram observados maiores níveis de microdureza com o aumento da taxa de deformação. Para a condição deformada de 10% houve diferença significativa da microdureza de acordo com a seção onde foram realizadas as impressões. A região longitudinal à direção de laminação obteve maior nível de microdureza, porém na condição deformada de 20% não houve diferença entre a condição normal e longitudinal à direção de laminação (Figura 14).

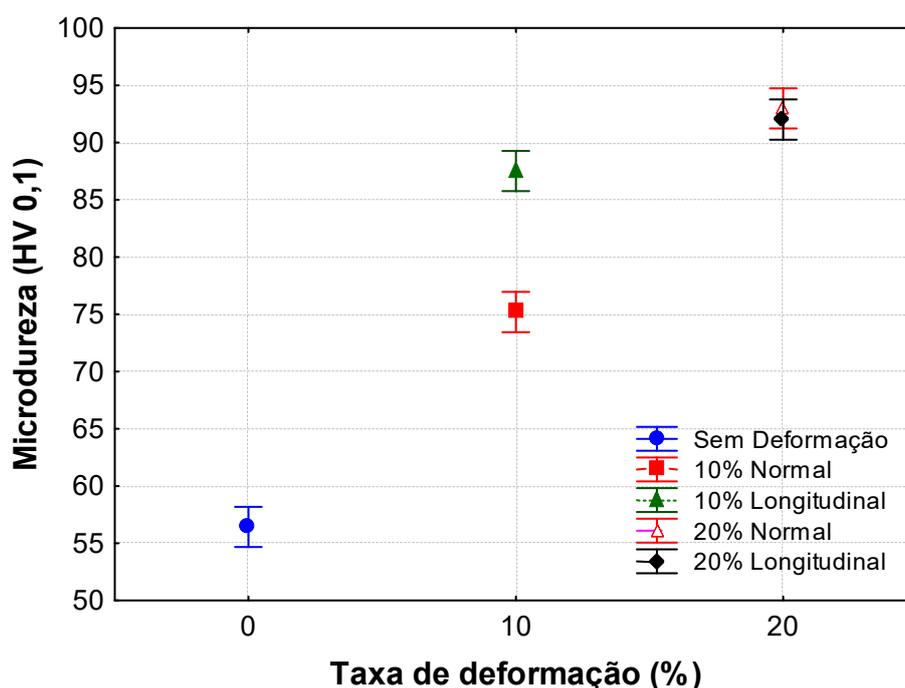


Figura 10. Microdureza para diferentes taxas de deformação (Autor, 2021).

#### 4. Conclusões

Este trabalho obteve as seguintes conclusões:

- Foram observados grãos alongados com a maior taxa de deformação para a seção longitudinal à direção de laminação, além de subgrãos e maclas provenientes da deformação, estas reduzidas como aumento da deformação;
- Nas regiões próximas à superfície não foram observadas grandes deformações, de modo que na região central das amostras a deformação dos grãos foram mais evidentes, além da presença de lamelas paralelas à laminação;
- Em relação à microdureza, foram observados maiores níveis de microdureza para maiores taxas de deformação;
- Para a condição deformada a 10% houve diferença significativa dos níveis de microdureza em relação às seções normais e longitudinais à direção de laminação;
- As maiores taxas de deformação utilizadas neste trabalho (20%) proporcionaram microestruturas mais homogêneas em relação ao tamanho de grão e os mesmo níveis de microdureza em ambos os sentidos (normal e longitudinal) à direção de laminação, tornando esta taxa de deformação mais adequada para aplicações industriais cujo produto final necessite de propriedades mecânicas e microestruturais semelhantes para diferentes direções do material.



## 5. Referências

- AGNEW, S.; YOO, M.; TOMÉ, C. (2001). Application of Texture Simulation to Understanding Mechanical Behavior of Mg and Solid Solution Alloys Containing Li or Y. *Acta Materialia*, v. 49, p. 4277-4289.
- American Society for Testing and Materials. ASTM B224 (2016) “Standard Classification of Coppers”. ASTM International, 3 p.
- American Society for Testing and Materials. ASTM E384 (2009) “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”. 8 p.
- BLEWITT, T. H. (1953). Deformation of Copper Single Crystals at 300°K and 78°K. *American Physical Society*, v. 91, n. 5.
- DAVIES, J. R. (1990). “Properties of Wrought Coppers and Copper Alloys”, In: Metals Handbook. Properties e selection. 10<sup>th</sup> ed. Ohio, ASM International. v. 2. 1328 p.
- FERREIRA, F. R. R. (2018) “Estudo da recristalização do cobre em liga comercialmente pura”. 36 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Instituto Brasileiro de Mineração. IBRAM (2019). “Relatório Anual de Atividades”.
- RAMANATHAN, L. V. (1988) “Corrosão e seu controle”. São Paulo: Hemus.
- SMITH, W. F. (1998) “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”. São Paulo: McGraw Hill Interamericana do Brasil.
- SRIVATSAN, T. S.; RAVI, B. G.; NARUKA, A. S.; PETRAROLI, M.; KALYANARAMAN, R.; SUDARSHAN, T. S. (2002) Influence of Consolidation Parameters on the Microstructure and Hardness of Bulk Copper Samples Made from Nanopowders. *Materials e Design*, v. 23, p. 291-296.
- ZHANG, X. J. (1998) “The effect of strain history on properties and structure of deformed metals”. 186 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Materials Engineering, Monash University.