



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Lourenço de Moraes Thomasi Pena

**“EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO COBRE COMERCIALMENTE PURO RECOZIDO E PROCESSADO
POR LAMINAÇÃO A FRIO”**

Ouro Preto

2025

Lourenço de Moraes Thomasi Pena

“Evolução microestrutural e propriedades mecânicas do cobre
comercialmente puro recozido e processado por laminação a frio”

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Metalúrgico.

Orientadora: Prof.^a Dra. Paula Cibely Alves
Flausino

Coorientadora: Prof.^a Dra. Nayara Aparecida
Neres da Silva

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P397e Pena, Lourenco de Moraes Thomasi.

Evolução microestrutural e propriedades mecânicas do cobre comercialmente puro recozido e processado por laminação a frio. [manuscrito] / Lourenco de Moraes Thomasi Pena. - 2025.

37 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Paula Cibely Alves Flausino.

Coorientadora: Profa. Dra. Nayara Aparecida Neres da Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Cobre - Metalurgia. 2. Metais - Tratamento térmico - Recozimento. 3. Deformações (Mecânica) - Laminação a frio. 4. Microestrutura. I. Flausino, Paula Cibely Alves. II. Silva, Nayara Aparecida Neres da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669.1

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lourenço de Moraes Thomasi Pena

Evolução Microestrutural e Propriedades Mecânicas do Cobre Comercialmente Puro Recozido e Processado por Laminação a frio

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 26 de agosto de 2025

Membros da banca

[Doutora] - Paula Cibely Alves Flausino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutora] - Nayara Aparecida Neres da Silva - Coorientado(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutora] - Maria Aparecida Pinto - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutor] - Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Paula Cibely Alves Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Nayara Aparecida Neres da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/09/2025, às 19:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0982602** e o código CRC **21DC8A1C**.

Dedico este trabalho, com especial carinho, à minha mãe, Aparecida, por seu amor e apoio incondicional; a Deus, pelo dom da vida; aos amigos que se tornaram irmãos ao longo dessa jornada; ao meu pai, Pedro Lúcio; aos docentes e técnicos do DEMET, pelo compartilhamento do conhecimento; e a Regina, por sua força e incentivo.

RESUMO

A laminação a frio é amplamente utilizada na indústria metalúrgica como processo de conformação mecânica para modificar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos metais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a evolução microestrutural e o comportamento mecânico do cobre comercialmente puro submetido a tratamento térmico de recozimento e posterior laminação a frio em múltiplos passes. Amostras no estado de entrega foram recozidas a 600°C por 2 horas, com resfriamento no forno, visando obter uma microestrutura equiaxial recristalizada e livre de tensões residuais. Em seguida, corpos de prova no estado de entrega e recozidos foram submetidos a ensaio de tração e análise fractográfica por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A caracterização microestrutural por microscopia óptica e os ensaios de microdureza Vickers foram realizados nas amostras recozidas e nas laminadas a frio em 1, 2 e 3 passes consecutivos, com controle da deformação acumulada. O recozimento reduziu a dureza de 99HV para 52HV e aumentou a ductilidade em aproximadamente 92% em relação à condição inicial laminada a quente. As fraturas das amostras recozidas apresentaram morfologia dúctil, com *dimples* distribuídos uniformemente, enquanto as do estado de entrega revelaram transição entre fratura dúctil e frágil. A laminação progressiva das amostras recozidas resultou em encruamento cumulativo, elevação da dureza (atingindo 129HV após três passes) e alongamento dos grãos na direção da laminação. As análises microestruturais e de dureza confirmaram a correlação entre o grau de deformação plástica, a morfologia dos grãos e o endurecimento do material, em consonância com os mecanismos clássicos de trabalho a frio descritos na literatura.

Palavras-chave: Cobre de pureza comercial, recozimento, laminação a frio, microestrutura, dureza.

ABSTRACT

Cold rolling is widely used in the metallurgical industry as a mechanical forming process to modify the microstructure and mechanical properties of metals. This study aimed to evaluate the microstructural evolution and mechanical behavior of commercially pure copper subjected to annealing heat treatment and subsequent multi-pass cold rolling. As-received samples were annealed at 600°C for 2 hours with furnace cooling to obtain a recrystallized equiaxed microstructure free from residual stresses. Subsequently, specimens in the as-received and annealed conditions were subjected to tensile testing and fractographic analysis by scanning electron microscopy (SEM). Microstructural characterization using optical microscopy and Vickers microhardness testing was performed on annealed samples and on samples cold rolled through 1, 2, and 3 consecutive passes, with controlled accumulated deformation. Annealing reduced the hardness from 99HV to 52HV and increased ductility by approximately 92% compared to the initial hot-rolled condition. The fracture surfaces of the annealed samples exhibited a ductile morphology with uniformly distributed dimples, whereas those of the as-received condition revealed a transition between ductile and brittle fracture. Progressive cold rolling of the annealed samples resulted in cumulative strain hardening, increased hardness (reaching 129HV after three passes), and grain elongation in the rolling direction. Microstructural and hardness analyses confirmed the correlation between the degree of plastic deformation, grain morphology, and work hardening, consistent with classical cold working mechanisms described in the literature.

Keywords: Commercially pure copper, annealing, cold rolling, microstructure, hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Forno para tratamento térmico de recozimento.....	18
Figura 4.2: Corpos de prova de tração do cobre no estado como recebido (a) e após recozimento (b) e CPs de laminação antes (c) e após 1, 2 e 3 passes (d)	19
Figura 4.3: Máquina Universal para ensaios de tração.....	19
Figura 4.4: Laminador piloto	20
Figura 4.5: Microscópio Óptico Leica DMRX.....	20
Figura 4.6: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA3.	21
Figura 4.7: Microdurômetro Pantec.....	22
Figura 5.1: Curvas tensão-deformação convencionais obtidas no ensaio de tração para os CP 1 (estado de entrega) e CP 6 (amostra recozida).....	23
Figura 5.2: Comparação de resistência e ductilidade do cobre de pureza comercial no estado de entrega (laminado a quente) e recozido.....	24
Figura 5.3: Micrografias por MEV das amostras: (a) e (b) no estado de entrega e (c) e (d) na condição recozida	25
Figura 5.4: Curva tensão-deformação verdadeira do CP 6	27
Figura 5.5: Micrografia das amostras no estado de entrega (a, b) e após recebimento (c, d) . .	30
Figura 5.6: Aspecto microestrutural das amostras L1 (a), L2 (b) e L3 (c), submetidas a 1, 2 e 3 passes de laminação a frio, respectivamente	32
Figura 5.7: Microdureza Vickers para amostras de cobre no estado como recebido, recozida e submetida a 1, 2 e 3 passes de laminação	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Equação de Hollomon para os materiais	28
Tabela 5.2: Parâmetros para o cálculo da carga de laminação.	29

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCOBRE – Associação Brasileira do Cobre

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

CFC – Cúbica de Face Centrada

CP – Corpo de Prova

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

EBSD – *Electron Backscatter Diffraction* (Difração de Elétrons Retroespalhados)

ImageJ – Software de análise de imagens microestruturais

L₀ – Comprimento inicial do corpo de prova

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

N – Número de passes de laminação

OriginLab – Software de gráficos científicos e análise estatística

R – Raio do cilindro de laminação

SE – *Secondary Electrons* (Elétrons Secundários)

SPD – *Severe Plastic Deformation* (Deformação Plástica Severa)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

LISTA DE SÍMBOLOS

A0 – Área da seção transversal inicial do corpo de prova (mm²)

dg – Tamanho de grão médio (μm)

d0 – Diâmetro inicial do corpo de prova de tração (mm)

d1 – Diâmetro final (após fratura) (mm)

d – Diagonal média da impressão no ensaio de microdureza (mm)

F – Força aplicada no ensaio de tração e dureza (N)

h – Espessura da amostra (mm)

HV – Microdureza Vickers

L0 – Comprimento inicial do corpo de prova

ΔL – Variação do comprimento durante o ensaio de tração (mm)

μ – Coeficiente de atrito

N – Número de passes de laminação

R – Raio do cilindro de laminação (mm)

T – Temperatura (°C)

Tf – Temperatura de fusão

ε – Deformação de engenharia (%)

εf – Deformação na fratura (%)

σ – Tensão de engenharia (MPa)

σy – Limite de escoamento (MPa)

σu – Tensão de resistência à tração (MPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo Geral.....	10
2.2 Objetivos Específicos	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Laminação.....	11
3.2 Encruamento e Processos de Restauração Microestrutural.....	12
3.3 Técnicas de Caracterização	13
3.3.1 Metalografia	13
3.3.2 Ensaios de Microdureza Vickers.....	14
3.3.3 Ensaio de Tração.....	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5.1 Ensaios de Tração Uniaxial e Análise da Superfície de Fratura	23
5.2 Determinação das Curvas de Fluxo e Carga de Laminação.....	26
5.3 Avaliação Microestrutural do Cobre no Estado de Entrega e Recozido	30
5.4 Avaliação da Evolução Microestrutural e Dureza do Cobre Laminado a Frio.....	32
6 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

A conformação mecânica é uma etapa essencial no processamento de metais, permitindo não apenas a obtenção de geometrias específicas, mas também a modificação intencional de suas propriedades mecânicas e microestruturais (Dieter, 1981). Entre os processos de conformação, a laminação a frio é amplamente utilizada na indústria metalúrgica para alterar a microestrutura dos metais e otimizar seu desempenho mecânico. Nesse processo, esforços compressivos aplicados entre cilindros laminadores reduzem a espessura do material, ao mesmo tempo em que modificam a morfologia dos grãos e introduzem defeitos cristalinos, como aumento da densidade de discordâncias e refinamento subestrutural (Helman; Cetlin, 2010).

Essas alterações resultam no encruamento, fenômeno caracterizado pelo aumento da resistência mecânica e da dureza, mas acompanhado da redução da ductilidade, o que pode comprometer a conformabilidade do metal. Para restaurar a capacidade de deformação e evitar fragilização prematura, recorre-se a tratamentos térmicos como o recozimento, que envolve recuperação, recristalização e crescimento de grão, ajustando as propriedades do material conforme os requisitos de aplicação (Meyers; Chawla, 1982).

O cobre, metal de transição com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e energia de falha de empilhamento intermediária (Humphreys; Hatherly, 2004), apresenta excelente condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão e boa conformabilidade, sendo amplamente empregado em aplicações elétricas, eletrônicas e de condução térmica. Sua versatilidade o torna indispensável no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, desde dispositivos eletrônicos avançados até veículos elétricos. Além disso, desempenha papel estratégico na transição energética, compondo sistemas como painéis solares e turbinas eólicas (ABCOBRE, 2022). As propriedades mecânicas do cobre podem ser ajustadas por meio de tratamentos termomecânicos, como a laminação a frio e o recozimento, para atender a diferentes demandas industriais.

A avaliação das modificações microestruturais e mecânicas decorrentes desses processos pode ser realizada por ensaios de tração, medidas de dureza e análises microestruturais. Complementarmente, a análise fractográfica das superfícies de fratura, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), fornece informações detalhadas sobre os mecanismos de

fratura atuantes, permitindo correlações entre o comportamento mecânico, microestrutura e comportamento mecânico de fratura.

O presente estudo tem como objetivo analisar a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas do cobre comercialmente puro submetido a tratamento térmico de recozimento e posterior laminação a frio em diferentes graus de deformação (1, 2 e 3 passes). Ensaio de tração e análises fractográficas via MEV foram conduzidos para as amostras no estado de entrega e recozidas, enquanto a evolução microestrutural e as alterações de dureza foram investigadas para todas as condições processadas. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica, permitindo avaliar os efeitos do processamento sobre a estrutura e o desempenho mecânico do material.

Destaca-se que os resultados apresentados neste trabalho foram previamente divulgados no Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2025), sob o código COBEF2025-0431, no trabalho intitulado “Evolução Microestrutural e Propriedades Mecânicas do Cobre de Pureza Comercial Recozido e Processado por Laminação a Frio”. A presente versão amplia e aprofunda a análise experimental e a discussão dos resultados, mantendo o foco na correlação entre as modificações microestruturais e as variações nas propriedades mecânicas decorrentes do recozimento e da laminação a frio em múltiplos passes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar quantitativa e qualitativamente os efeitos da laminação a frio com um, dois e três passes sobre a microestrutura e a dureza do cobre comercialmente puro recozido, correlacionando a deformação plástica acumulada com as modificações observadas. Adicionalmente, avaliar o efeito do recozimento aplicado à condição de entrega, a fim de constatar a eficiência do processo na restauração da microestrutura e das propriedades mecânicas, estabelecendo uma condição de referência para comparação com os estados deformados.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Realizar o recozimento do cobre comercialmente puro na condição de entrega (laminado a quente), visando obter microestrutura equiaxial recristalizada;
- Realizar ensaio de tração nas amostras no estado de entrega e recozidas, permitindo comparar o efeito do recozimento sobre resistência mecânica e ductilidade;
- Analisar, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a superfície de fratura dos corpos de prova tracionados, identificando os mecanismos de fratura predominantes nessas condições;
- Submeter amostras recozidas a um, dois e três passes consecutivos de laminação a frio, com reduções de espessura acumuladas controladas, para induzir diferentes níveis de deformação plástica e encruamento progressivo;
- Caracterizar a evolução microestrutural e a microdureza Vickers das amostras recozidas e laminadas a frio, identificando mudanças na morfologia dos grãos, correlacionando-as com o endurecimento por deformação e força de laminação;
- Comparar os resultados obtidos com dados da literatura, destacando a influência do recozimento e do número de passes de laminação sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do cobre comercialmente puro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A investigação dos efeitos da laminação a frio e do subsequente recozimento em metais com estrutura cúbica de face centrada (CFC), como o cobre, é tema consolidado na metalurgia física há décadas, sendo abordada em diferentes contextos no Brasil e no exterior. Obras clássicas, como a de Dieter (1981), estabeleceram fundamentos sobre a relação entre deformação plástica, encruamento e processos de restauração microestrutural, incluindo recuperação, recristalização e crescimento de grão. No cenário nacional, Padilha e Siciliano Jr. (2005) detalharam os mecanismos de recuperação, recristalização e crescimento de grãos, destacando a influência direta da temperatura e do tempo de recozimento sobre a redução da densidade de discordâncias, a estabilidade microestrutural e as propriedades mecânicas. No contexto específico da conformação mecânica por laminação, Helman e Cetlin (2010) analisaram a influência da deformação acumulada no endurecimento por encruamento, ressaltando que o número de passes e a redução acumulada são variáveis determinantes para o controle da dureza final do material.

3.1 Laminação

A laminação é um dos processos de conformação mecânica mais utilizados na indústria metalúrgica, aplicando esforços compressivos entre cilindros giratórios para reduzir a espessura do material e, simultaneamente, modificar suas propriedades mecânicas e microestruturais (Helman; Cetlin, 2010). No caso do cobre, metal com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e alta ductilidade, a laminação é amplamente empregada para obtenção de geometrias precisas.

O regime térmico aplicado durante a laminação influencia diretamente os mecanismos metalúrgicos envolvidos. Na laminação a quente, realizada em temperaturas homólogas (T_h) superiores a 0,5, a elevada mobilidade atômica favorece a ocorrência de mecanismos de restauração microestrutural, como recuperação e recristalização, permitindo maiores reduções por passe. Contudo, este regime pode comprometer o acabamento superficial e a precisão dimensional, devido à formação de óxidos e às variações térmicas associadas ao aquecimento e resfriamento (Dieter, 1981). Já na laminação a frio, realizada em $T_h < 0,3$, a atuação de processos de restauração dinâmica é limitada, havendo acúmulo progressivo de discordâncias e aumento da densidade de defeitos cristalinos. Esse encruamento eleva a

resistência e a dureza do material, mas reduz sua ductilidade e pode gerar tensões residuais (Meyers; Chawla, 1982; Padilha; Siciliano Jr., 2005).

Nessas condições, tratamentos térmicos como o recozimento tornam-se essenciais para restaurar a conformabilidade e a tenacidade do metal. No cobre, o recozimento promove recuperação, recristalização e, dependendo dos parâmetros de tempo e temperatura, crescimento de grão (Humphreys; Hatherly, 2004), ajustando as propriedades mecânicas às exigências de aplicação.

Entre os parâmetros que controlam a laminação a frio, destacam-se o número de passes, a redução por passe, o raio dos cilindros, a velocidade de rotação e o atrito metal-cilindro, pois influenciam diretamente a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas finais. Neste trabalho, o foco recai sobre a análise do efeito do recozimento em amostras no estado de entrega e a investigação da influência de 1, 2 e 3 passes de laminação a frio em amostras recozidas, utilizando microscopia óptica, microdureza Vickers e, para as amostras tracionadas, análise fractográfica por MEV.

3.2 Encruamento e Processos de Restauração Microestrutural

Durante a deformação plástica a frio, como na laminação, ocorre o fenômeno de encruamento (*work hardening*), caracterizado pelo aumento progressivo da densidade de discordâncias na estrutura cristalina. Esse acúmulo de defeitos dificulta o movimento das discordâncias, elevando a tensão necessária para o escoamento plástico. Como consequência, a resistência mecânica e a dureza aumentam, enquanto a ductilidade e a capacidade de deformação adicional diminuem (Meyers; Chawla, 1982; Padilha; Siciliano Jr., 2005).

No cobre comercialmente puro, cuja estrutura cúbica de face centrada (CFC) favorece a mobilidade das discordâncias, o encruamento é particularmente pronunciado, refletindo-se em aumentos significativos de microdureza (Garcia; Spim; Santos, 2012; Helman; Cetlin, 2010). À medida que o grau de deformação acumulada cresce, a elevação da dureza evidencia a forte influência do processamento mecânico sobre a resposta do material.

Para reverter parcialmente os efeitos do encruamento, utiliza-se o tratamento térmico de recozimento, composto por três etapas: recuperação, recristalização e crescimento de grão.

- **Recuperação:** ocorre em temperaturas relativamente baixas, reorganizando as discordâncias e reduzindo tensões internas sem alterar significativamente a morfologia dos grãos, resultando em pequena melhoria nas propriedades mecânicas (Padilha; Siciliano Jr., 2005).
- **Recristalização:** em temperaturas mais elevadas, promove a nucleação e crescimento de novos grãos equiaxiais livres de deformação, restaurando a ductilidade e reduzindo dureza e resistência mecânica (Humphreys; Hatherly, 2004; Dieter, 1981).
- **Crescimento de grão:** se o tratamento for prolongado ou em temperaturas muito altas, os grãos recristalizados aumentam de tamanho, o que pode comprometer a resistência mecânica e a estabilidade dimensional (Padilha; Siciliano Jr., 2005).

Vale mencionar que, neste trabalho, a aplicação do recozimento ao material no estado de entrega teve como objetivo padronizar a condição inicial da microestrutura, eliminando o encruamento prévio e permitindo uma avaliação controlada dos efeitos de 1, 2 e 3 passes de laminação a frio. Nessas amostras laminadas, a análise concentrou-se na evolução da microestrutura e da microdureza, possibilitando correlacionar o nível de deformação plástica acumulada com o endurecimento do material.

3.3 Técnicas de Caracterização

Para a análise da evolução microestrutural e das propriedades mecânicas do cobre comercialmente puro submetido à laminação a frio, utilizam-se diferentes técnicas de caracterização, que permitem a observação direta da microestrutura e a quantificação das alterações induzidas pela deformação plástica. Dentre os métodos adotados neste trabalho, destacam-se a metalografia, os ensaios de microdureza Vickers e o ensaio de tração.

3.3.1 Metalografia

A metalografia é uma técnica fundamental para o estudo da microestrutura de materiais metálicos, permitindo a observação e caracterização de aspectos como tamanho e forma de grão, orientação cristalográfica, presença de defeitos e heterogeneidades estruturais (Padilha; Siciliano Jr., 2005). Sua aplicação é indispensável na análise dos efeitos de processos de conformação mecânica e tratamentos térmicos, uma vez que possibilita estabelecer correlações entre a microestrutura e as propriedades mecânicas.

Segundo Humphreys e Hatherly (2004), a metalografia desempenha papel central na compreensão dos mecanismos de restauração microestrutural — recuperação, recristalização e crescimento de grão — ao permitir a identificação visual e quantitativa das mudanças morfológicas decorrentes de diferentes condições de processamento. A utilização de técnicas de microscopia óptica e eletrônica, associada a métodos padronizados de quantificação, como o método dos interceptos lineares descrito na norma ASTM E112 - 1996, torna possível uma análise precisa da evolução microestrutural.

Assim, a metalografia é a técnica fundamental para o estudo da microestrutura dos materiais metálicos. Esse procedimento envolve etapas de preparação, como corte, lixamento, polimento e ataque químico das amostras, a fim de revelar as características internas do material, como tamanho de grão, orientação de grãos e presença de defeitos (Padilha; Siciliano Jr., 2005).

A preparação metalográfica envolve o uso de lixas de granulação progressiva e pastas abrasivas até atingir um acabamento superficial espelhado. Após o polimento, as amostras são submetidas ao ataque químico, processo que promove a revelação seletiva dos contornos de grão por meio da ação de um reagente apropriado. No caso do cobre, pode-se empregar o reagente “Di Cobre”, composto por ácido sulfúrico, dicromato de potássio, cloreto de sódio e água destilada, que proporciona contraste adequado para a análise por microscopia óptica.

3.3.2 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers é amplamente utilizado para avaliar a resistência superficial dos materiais à penetração, sendo especialmente útil na investigação de gradientes de dureza e dos efeitos localizados de processos de conformação mecânica ou tratamento térmico. O método baseia-se na aplicação de uma carga controlada sobre uma ponta de diamante com geometria piramidal de base quadrada, formando uma impressão na superfície do material. A dureza é determinada pela medição das diagonais dessa impressão, a partir da qual se calcula o valor de dureza Vickers (HV) (Meyers; Chawla, 1982).

A relação entre carga e dimensão da impressão é dada pela Equação 3.1.

$$HV = (1.854 \square F) / d^2 \quad (3.1)$$

em que:

- ✓ F é a carga aplicada (em kgf);
- ✓ d é o valor médio das diagonais da impressão (em mm).

3.3.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é a principal técnica utilizada para avaliar o comportamento mecânico global do material, fornecendo parâmetros como o limite de escoamento, a tensão máxima (resistência à tração) e o alongamento na fratura. O ensaio é realizado em máquina universal de ensaios, aplicando força axial crescente até a fratura do corpo de prova, registrando-se continuamente a relação entre força e alongamento (Garcia; Spim; Santos, 2012). A partir destes dados, medidas de resistência e ductilidade podem ser obtidas por meio das curvas tensão de engenharia (σ) e deformação de engenharia (e), determinadas pelas Equações 3.2 e 3.3.

Tensão de engenharia (σ):

$$\sigma = F / A_0 \quad (3.2)$$

Deformação de engenharia (e):

$$e = \Delta L / L_0 \quad (3.3)$$

em que:

- F é a força aplicada;
- A_0 é a área da seção transversal inicial;
- ΔL é a variação no comprimento;
- L_0 é o comprimento inicial da parte útil do corpo de prova.

Essas grandezas permitem a caracterização das propriedades mecânicas do material e constituem a base para a análise do comportamento sob carregamento uniaxial.

Adicionalmente, a partir da tensão e da deformação de engenharia, é possível calcular a tensão verdadeira (σ_v - Equação 3.4) e a deformação verdadeira (ϵ_v - Equação 3.5), grandezas que consideram as mudanças reais na seção transversal e no comprimento do

corpo de prova durante o ensaio. Essas relações são válidas entre a região elástica e o encruamento uniforme, até o limite de resistência do material (Garcia; Spim; Santos, 2012).

$$\sigma_v = \sigma_c \cdot (e + 1) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + e) \quad (3.5)$$

Nos processos de conformação mecânica, devido aos estados complexos de tensões geralmente envolvidos, utilizam-se as grandezas tensão efetiva (σ_{ef}) e deformação efetiva (ε_{ef}) para representar, de forma generalizada, os estados de tensão e deformação, independentemente do tipo de solicitação aplicada (uniaxial, biaxial ou triaxial). A tensão efetiva corresponde a uma medida escalar que expressa o efeito combinado das tensões atuantes no material, sendo calculada com base nas tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) por meio do critério de von Mises, conforme a Equação 3.6. Por sua vez, a deformação efetiva representa a deformação plástica acumulada ao longo do processo e, para incrementos sucessivos, é obtida a partir das deformações principais ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$), conforme a Equação 3.7 (Helman; Cetlin, 2010).

$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

$$d\varepsilon_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Assim, a curva de fluxo (σ_{ef} vs. ε_{ef}) descreve o comportamento plástico do material sob diferentes condições de carregamento. No caso da tração uniaxial, a curva tensão–deformação verdadeira coincide com a curva de fluxo até o ponto de carga máxima, antes do início da estricção localizada (Helman; Cetlin, 2010). Nesse intervalo, o comportamento plástico pode ser descrito pela equação de Hollomon (Equação 3.8):

$$\sigma_{ef} = k \cdot \varepsilon_{ef}^n \quad (3.8)$$

em que “k” é chamado de coeficiente de resistência (MPa) e “n” é o coeficiente de encruamento (Cetlin, 2024). O coeficiente de resistência indica o grau de resistência do material à deformação, enquanto o coeficiente de encruamento indica sua capacidade de distribuir a deformação plástica uniformemente ao longo do volume (Garcia; Spim; Santos, 2012).

A determinação experimental do coeficiente de resistência k e do coeficiente de encruamento “ n ” pode ser feita por meio da linearização da Equação 3.8, aplicando-se logaritmo natural em ambos os lados, como mostrado na Equação 3.9. Esta relação corresponde à equação de uma reta em um gráfico $\ln(\sigma)$ x $\ln(\varepsilon)$ em que o coeficiente angular fornece o valor de n e o intercepto no eixo $\ln(\sigma)$ corresponde ao logaritmo de k (Cetlin, 2024).

$$\ln(\sigma_{ef}) = \ln(k) + n \cdot \ln(\varepsilon_{ef}) \quad (3.9)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido por meio de uma pesquisa experimental, envolvendo a caracterização microestrutural e mecânica do cobre comercialmente puro submetido a laminação a frio e tratamento térmico de recozimento. Os experimentos foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Os corpos de prova (CPs) de tração e laminação, utilizados para o desenvolvimento do trabalho, foram obtidos a partir de uma barra de cobre comercialmente puro previamente laminada a quente. Parte dos CPs foram submetidos ao tratamento térmico de recozimento a 600°C por 2 horas e resfriados no forno (Figura 4.1)

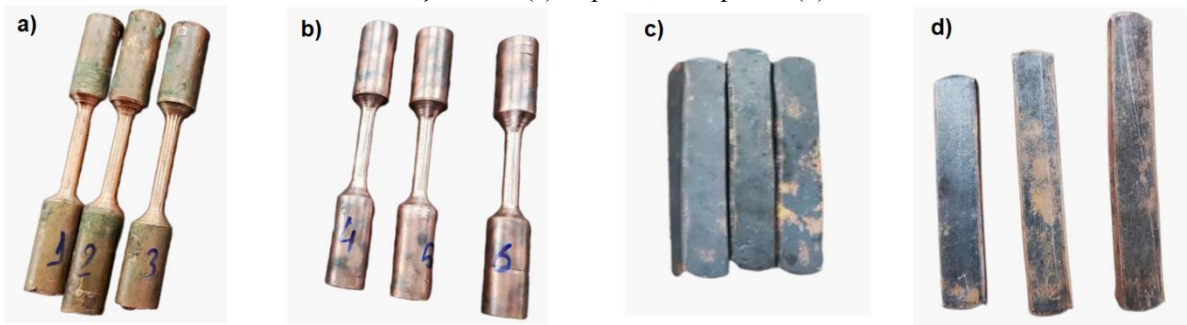
Figura 4.1: Forno para tratamento térmico de recozimento



Fonte: Próprio autor, 2025.

Para o ensaio de tração, foram usadas amostras no estado de entrega (CPs 1, 2 e 3 Figura 4.2a) e recozidas (CPs 4, 5 e 6 – Figura 4.2b) com comprimento inicial (L_0) igual a 25mm e diâmetro médio inicial (d_0) de 6,3mm. As amostras foram, então, submetidas a ensaios de tração empregando-se uma máquina universal de ensaios ALFRED&ANSLER (Figura 4.3) com capacidade de 5 toneladas para a determinação das curvas tensão-deformação (Garcia; Spim; Santos, 2012).

Figura 4.2: Corpos de prova de tração do cobre no estado como recebido (a) e após recozimento (b) e CPs de laminação antes (c) e após 1, 2 e 3 passes (d).



Fonte: Próprio autor, 2025.

As demais amostras recozidas (Figura 4.2c) nas mesmas condições dos corpos de prova de tração foram submetidas a 1, 2 e 3 passes de laminação a frio (doravante denominas L1, L2 e L3, respectivamente, Figura 4.2d) em um laminador (Figura 4.4) com cilindros de aço polido de raio 35mm e rotação de 20rpm, utilizando um empurrador, sem aplicação de tração avante ou à ré, e considerando-se atrito médio de $\mu \approx 0,1$ (Helman; Cetlin, 2010). A deformação elástica dos cilindros foi desprezada, assumindo-se ferramentas rígidas.

Figura 4.3: Máquina Universal para ensaios de tração.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 4.4: Laminador piloto.



Fonte: Próprio autor, 2025.

As amostras de cobre laminadas passaram pelas etapas de corte, na direção transversal, desbaste, lixamento até a lixa na granulometria 1200 e, por fim, polimento utilizando alumina de $1\mu\text{m}$ e, em sequência, pasta de diamante de $1\mu\text{m}$ e $0,25\mu\text{m}$. O ataque químico para revelar a microestrutura foi feito com o reativo “Di Cobre”, cuja composição tem 35ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 16g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 3g de cloreto de sódio (NaCl) e 800ml de água destilada.

Para a análise das microestruturas, foi utilizado o microscópio óptico Leica DMRX (Figura 4.5) e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN da série VEGA3 (Figura 4.6). Já o ensaio de microdureza foi conduzido utilizando o Microdurômetro Pantec (Figura 4.7), que permitiu avaliar a dureza das diferentes amostras em função do tratamento térmico e dos passes de laminação aos quais foram submetidas. A carga aplicada durante o ensaio foi de 500gf, com um tempo de aplicação de 15 segundos, com medições realizadas em um grid linear na seção transversal da amostra, com distância de 0,5mm das bordas entre as indentações, garantindo uma distribuição de valores representativa.

Figura 4.5: Microscópio Óptico Leica DMRX.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 4.6: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA3.



Fonte: Próprio autor, 2025.

A determinação do tamanho de grão foi realizada pelo método dos interceptos que é uma técnica consagrada para a determinação do tamanho médio de grão em materiais policristalinos, utilizada amplamente em metalurgia física e caracterização microestrutural. Seu princípio está fundamentado na contagem dos cruzamentos entre uma linha de medição (ou grade) e os contornos de grãos visíveis em micrografias ópticas ou eletrônicas. No presente estudo a análise foi realizada a partir de imagens obtidas por microscopia óptica.

O método baseia-se na Equação 3.10:

(3.10)

em que:

- tamanho médio de grão (μm);
- : comprimento total da linha de medição traçada sobre a imagem (μm);
- N: número de interseções da linha com os contornos de grão.

Para tornar os resultados mais robustos, a Norma ASTM E112 – 1996 recomenda o uso de várias linhas em diferentes orientações, com distância mínima entre elas para evitar superposição estatística. Em casos em que os grãos são anisotrópicos, como após laminação, a contagem deve ser realizada tanto na direção longitudinal quanto transversal.

Figura 4.7: Microdurômetro Pantec.



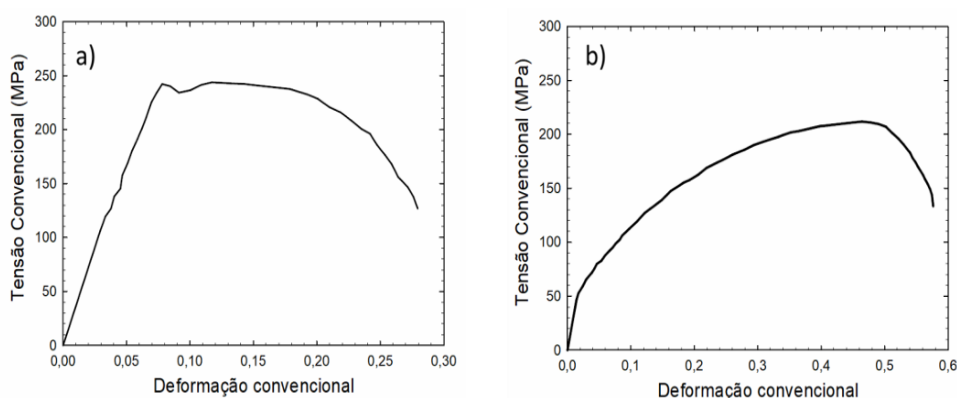
Fonte: Próprio autor, 2025.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio de Tração Uniaxial e Análise da Superfície de Fratura

As curvas tensão–deformação convencionais obtidas nos ensaios de tração para os corpos de prova 1 e 6, representativos das condições no estado de entrega e após recozimento, respectivamente, são apresentadas na Figura 5.1. Para sua construção, as tensões e deformações foram determinadas conforme as Equações 3.2 e 3.3, aplicadas aos dados experimentais registrados durante o ensaio.

Figura 5.1: Curvas tensão-deformação convencionais obtidas no ensaio de tração para os CP 1 (estado de entrega) e CP 6 (amostra recozida).



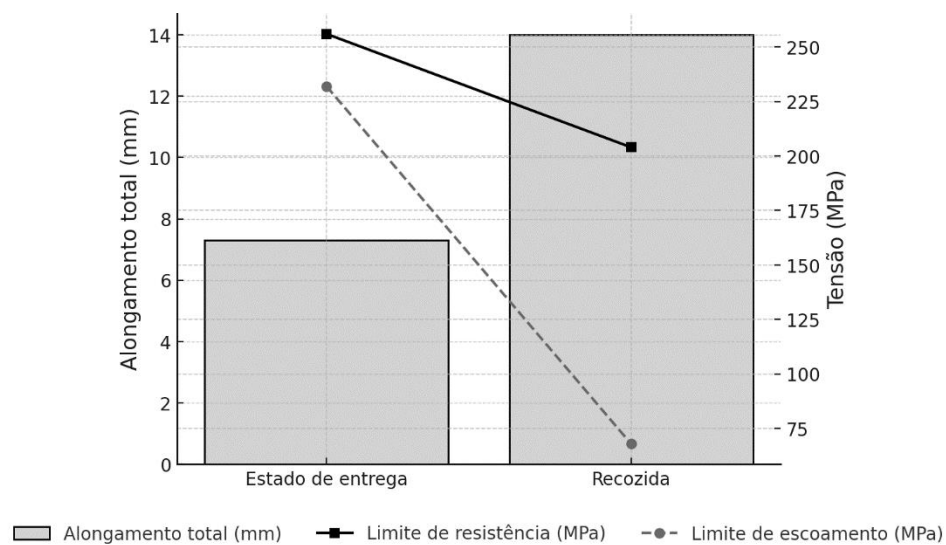
Fonte: Próprio autor, 2025.

Para os processos de conformação mecânica, a faixa da curva tensão-deformação situada entre o limite de escoamento e o limite de resistência é considerada a mais relevante, conforme destacado por Schaeffer (2004). O limite de escoamento foi determinado pela tensão correspondente a uma deformação plástica de 0,2%, enquanto o limite de resistência foi definido como a tensão máxima registrada durante o ensaio, imediatamente anterior ao início da estricção da seção do corpo de prova (Helman; Cetlin, 2010). Os valores médios desses parâmetros foram obtidos a partir dos resultados experimentais nas duas condições analisadas: estado de entrega e estado recozido e são apresentados na Figura 5.2.

A comparação entre as condições de entrega e recozida evidencia o efeito marcante do recozimento sobre o comportamento mecânico do cobre comercialmente puro. Observa-se uma redução significativa no limite de escoamento, de 232MPa para 68MPa (aproximadamente 71%), e no limite de resistência, de 256MPa para 204MPa (cerca de

20%). Paralelamente, o alongamento total aumentou de 7,3mm para 14,0mm, representando um ganho de ductilidade próximo de 92%. Esses resultados indicam que o recozimento promoveu a recuperação parcial das propriedades mecânicas, restaurando a capacidade de deformação plástica uniforme antes da fratura. A maior diferença entre os valores de limite de escoamento e limite de resistência na condição recozida confirma a ampliação da faixa de deformação plástica utilizável, coerente com a microestrutura recristalizada e menor densidade de discordâncias (Dieter, 1980).

Figura 5.2: Comparação entre a resistência e ductilidade do cobre de pureza comercial no estado de entrega (laminado a quente) e recozido.

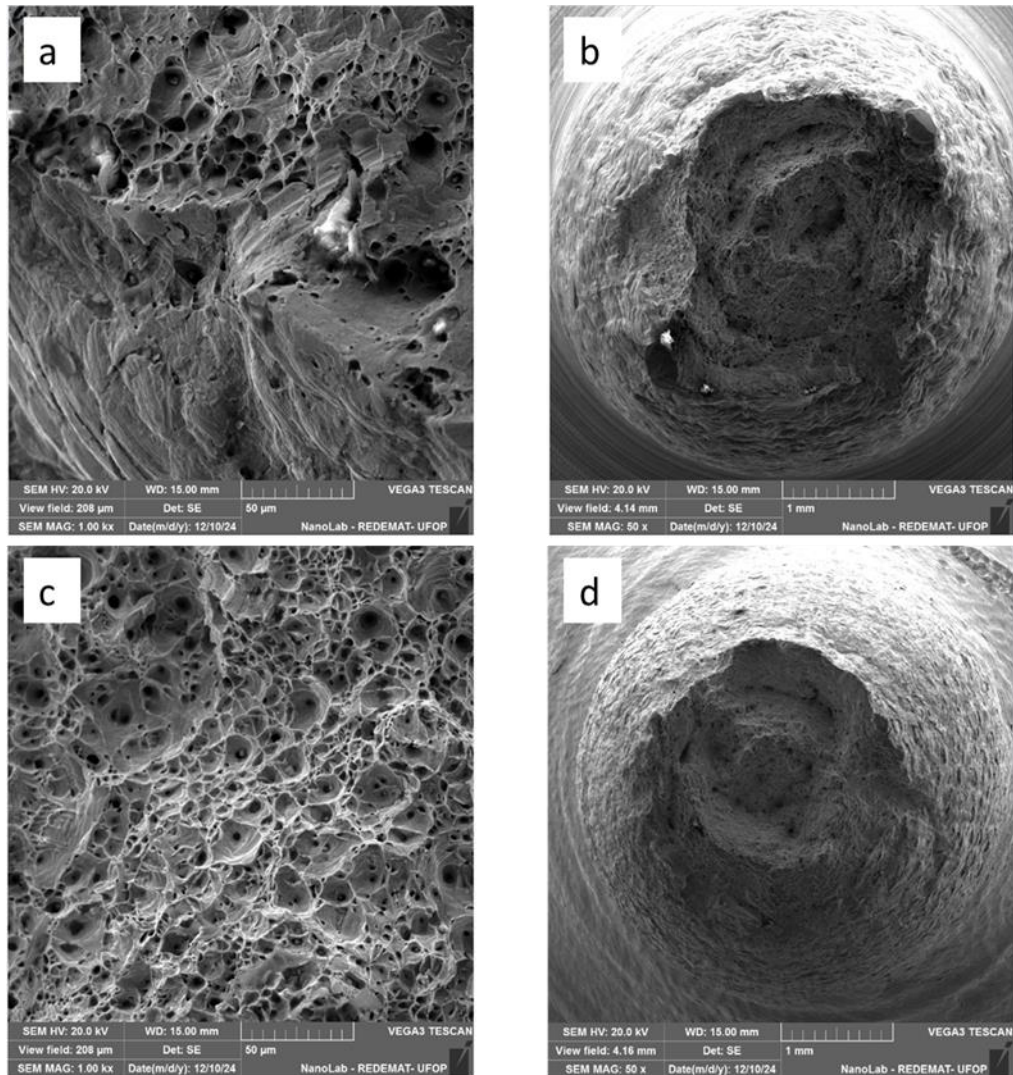


Fonte: Próprio autor, 2025.

Essa interpretação é reforçada pela análise da Figura 5.1, que evidencia, nos materiais no estado de entrega, uma menor diferença entre o limite de escoamento e o limite de resistência, característica típica de materiais com reduzida capacidade de encruamento (Garcia; Spim; Santos, 2012).

As fraturas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de identificar os mecanismos de fratura atuantes nas amostras nas condições de entrega e recozida. As micrografias obtidas dos corpos de prova 1 e 6 estão apresentadas na Figura 5.3. As imagens da vista superior foram capturadas com aumento de 1000x, enquanto as micrografias da base dos corpos de prova foram obtidas com aumento de 50x.

Figura 5.3: Micrografias por MEV das amostras: (a) e (b) no estado de entrega e (c) e (d) na condição recozida.



Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise fractográfica evidenciou diferenças significativas no micromecanismo de fratura entre as condições estudadas. No estado de entrega (Figuras 5.3a e 5.3b), observam-se *dimples* alongados intercalados com regiões facetadas, indicando a atuação de lamelas de cisalhamento e anisotropia local, ambas associadas ao histórico de deformação prévia do material. A visão geral (Figura 5.3b) revela uma superfície com regiões centrais mais rugosas, sugerindo concentração de deformação e propagação estável da trinca antes da fratura final. A morfologia observada é consistente com a combinação de dois mecanismos: fratura dúctil, caracterizada pela presença de *dimples* formados por deformação plástica, nucleação e coalescência de vazios, e fratura frágil localizada, possivelmente associada ao

cisalhamento ao longo de planos preferenciais, favorecida pela presença de inclusões e concentradores de tensão (Dieter, 1981; Meyers; Chawla, 2009). A micrografia de detalhe (Figura 5.3a) confirma que a nucleação, crescimento e coalescência de vazios ocorrem predominantemente na região central da seção, provavelmente em torno de partículas não metálicas ou impurezas, sob tensões tratativas elevadas.

Na condição recozida (Figuras 5.3c e 5.3d), a superfície de fratura apresenta *dimples* predominantemente equiaxiais e de maior tamanho médio, indicando maior capacidade de deformação uniforme antes da instabilidade. A visão geral (Figura 5.3d) revela uma superfície mais homogênea, compatível com a microestrutura recristalizada e a maior ductilidade observada nos ensaios mecânicos. Embora inclusões pontuais ainda sejam identificadas como sítios preferenciais para nucleação de vazios, a microestrutura mais homogênea, resultante do recozimento, reduziu a concentração localizada de tensões, favorecendo um comportamento plástico mais uniforme e distribuído (Dieter, 1981; Padilha; Siciliano, 2005). Essa morfologia de fratura, marcada por elevada absorção de energia e deformação significativa antes da ruptura, está alinhada com o aumento do alongamento e a redução do limite de escoamento observados experimentalmente, confirmando a influência direta do estado microestrutural na resistência e ductilidade do cobre.

5.2 Determinação das Curvas de Fluxo e Carga de Laminação

No estudo da conformação plástica dos metais, a curva de fluxo é uma ferramenta fundamental para descrever a relação entre a tensão efetiva (σ_{ef}) e a deformação efetiva (ϵ_{ef}) do material ao longo de um processo de deformação contínua. Essa curva é particularmente relevante em contextos industriais como laminação, extrusão e conformação a frio, nos quais os metais são submetidos a deformações plásticas significativas em múltiplas direções (Dieter, 1981;). O uso dessas grandezas possibilita a avaliação da severidade do processo de deformação sob uma ótica tridimensional, essencial para correlacionar os parâmetros operacionais da laminação, como número de passes e reduções por passe, tal como as respostas mecânicas e microestruturais observadas. Matematicamente, a curva de fluxo pode ser expressa pela Equação de Hollomon (Equação 3.8, aqui reproduzida: $\sigma_{ef} = k \epsilon_{ef}^n$). O parâmetro “k” reflete a resistência intrínseca do material à deformação plástica, sendo influenciado pela composição química, microestrutura, temperatura e histórico de processamento do metal (Meyers; Chawla, 1982;

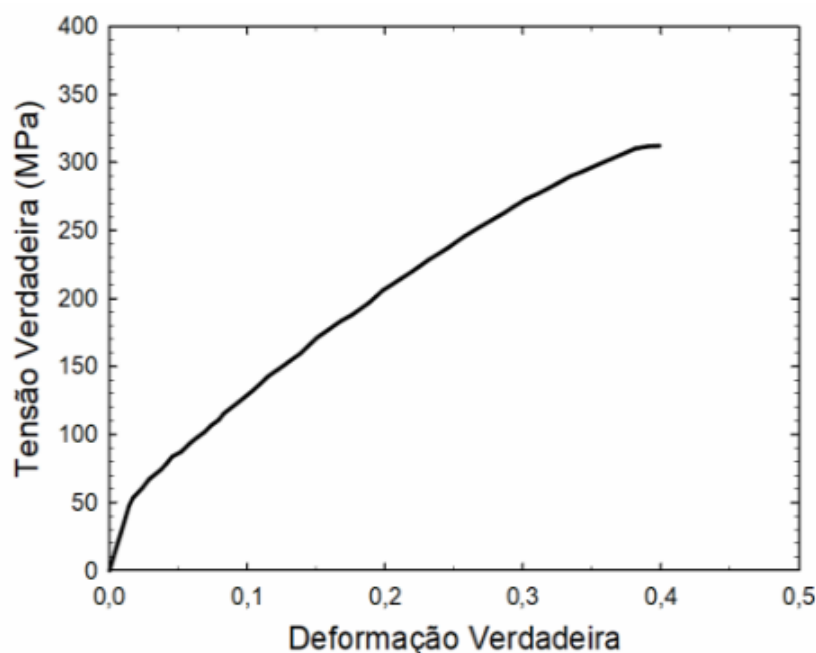
Callister; Rethwisch, 2012). Já o expoente “n” representa a capacidade do material de se encruar, ou seja, de aumentar sua resistência com o avanço da deformação. Valores elevados de “n” indicam boa distribuição da deformação e maior resistência à instabilidade plástica, enquanto valores baixos sinalizam maior propensão à estricção localizada (Garcia; Spim; Santos, 2012; Humphreys; Hatherly, 2004).

Conforme discutido na seção anterior, os coeficientes de resistência “k” e de encruamento “n” podem ser determinados experimentalmente a partir dos dados do ensaio de tração. Para isso, aplica-se a linearização da Equação 3.8, resultando na forma apresentada na Equação 3.9, a qual descreve uma relação linear em um gráfico $\ln(\sigma) \times \ln(\epsilon)$. O ajuste dos pontos experimentais a uma reta nesse sistema de coordenadas permite a obtenção dos valores de “k” e “n” (Cetlin, 2024).

Durante a tração uniaxial, a curva de tensão-deformação verdadeira coincide com a curva de fluxo até o ponto de máxima carga, também chamado de limite de resistência do material. Esse trecho corresponde ao regime de encruamento uniforme, no qual a deformação plástica se distribui de maneira homogênea ao longo do corpo de prova (Helman; Cetlin, 2010). Após esse ponto, ocorre a estricção e a curva verdadeira deixa de representar o comportamento global do material, pois a deformação se localiza em uma região específica da amostra.

Com base nas colocações anteriores, a curva tensão-deformação verdadeira (determinada a partir das Equações 3.4 e 3.5) é apresentada na Figura 5.4. As equações de fluxo desses corpos de prova são apresentadas na Tabela 5.1. Com base nos dados, o coeficiente de resistência “k” médio e o coeficiente de encruamento “n” médio do cobre recozido definidos experimentalmente neste estudo são, respectivamente, 529MPa e 0,575. Embora tais valores sejam coerentes com aqueles verificados em literatura, destaca-se que as diferenças no estado inicial dos materiais empregados e técnicas de ensaios podem fornecer valores diferentes para estes parâmetros (Cetlin, 2024).

Figura 5.4: Curva tensão-deformação verdadeira do CP 6



Fonte Próprio autor, 2025.

Tabela 5.1: Equação de Hollomon para os materiais

Corpo de prova (CP)	Equação de Hollomon
4	$\sigma_{ef} = 537,8 \cdot \varepsilon_{ef}^{0,58}$
5	$\sigma_{ef} = 521,97 \cdot \varepsilon_{ef}^{0,55}$
6	$\sigma_{ef} = 528,31 \cdot \varepsilon_{ef}^{0,58}$

Fonte: Próprio autor, 2025.

A determinação da curva de fluxo é fundamental para a resolução de problemas teóricos aplicados em conformação mecânica, uma vez que a análise dos processos depende diretamente do comportamento tensão-deformação do material. No presente estudo, a curva de fluxo foi empregada como base para a estimativa teórica da força (F) aplicada em cada passe de laminação.

Essa força pode ser calculada a partir da Equação 3.11, conforme proposta por Cetlin (2024), em que μ representa o coeficiente de atrito, h é a espessura média da chapa, w é a largura do corpo de prova, e L corresponde ao comprimento projetado do arco de contato entre o material e os cilindros. Este último é obtido a partir da Equação 3.12, em função do raio dos cilindros de laminação (R) e da variação de espessura no passe analisado ($\Delta h = h_i - h_f$).

Os valores estimados da força F para os passes 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 5.2. A tensão efetiva utilizada no cálculo foi obtida com base no teorema do valor médio, conforme descrito por Cetlin (2024).

$$F = \frac{Lw\sigma_{ef}(e^{\frac{\mu L}{h}} - 1)}{\frac{\mu L}{h}} \quad (3.11)$$

$$L = \sqrt{R\Delta h} \quad (3.12)$$

A Tabela 5.2 apresenta as espessuras iniciais e finais (h_i e h_f , respectivamente), bem como as larguras finais (w_f) e os valores de deformação efetiva obtidos para cada passe de laminação do cobre recozido. A espessura inicial de 13,0mm foi reduzida progressivamente para 11,0mm, 9,0mm e 7,5mm após o primeiro, segundo e terceiro passes, respectivamente. Concomitantemente, observou-se um pequeno aumento na largura, passando de 13,0mm para 13,3mm no primeiro passe, 13,5mm no segundo e 13,8mm no terceiro, indicando acomodação lateral da deformação. A deformação efetiva acumulada (ϵ_{ef}) evoluiu de 0,12 no primeiro passe para 0,26 no segundo e 0,39 no terceiro, refletindo o incremento contínuo de redução da seção transversal e a intensificação do encruamento do material.

Tabela 5.2: Parâmetros para o cálculo da carga de laminação.

Condição	H_i	h_f	w_f	ϵ_{ef}	σ_{ef} (Mpa)	F (N)
Passe 1	13,0	11,0	13,3	0,12	97	10.992
Passe 2	11,0	9,0	13,5	0,26	200	23.563
Passe 3	9,0	7,5	13,8	0,39	276	28.885

Fonte: Próprio autor, 2025.

Esse comportamento geométrico, e consequente aumento de deformação, resultou em aumento progressivo da tensão efetiva (σ_{ef}) de 97MPa para 276MPa no intervalo analisado. Como consequência desse endurecimento, foi necessário aplicar forças (F) cada vez maiores para promover a deformação, variando de 10.992N no primeiro passe até 28.885N no terceiro. Observa-se, ainda, que o incremento relativo de σ_{ef} foi mais acentuado nas primeiras reduções, indicando que o efeito do encruamento é mais pronunciado nas etapas iniciais da

laminação, tendendo a uma taxa de aumento mais moderada à medida que a deformação se acumula.

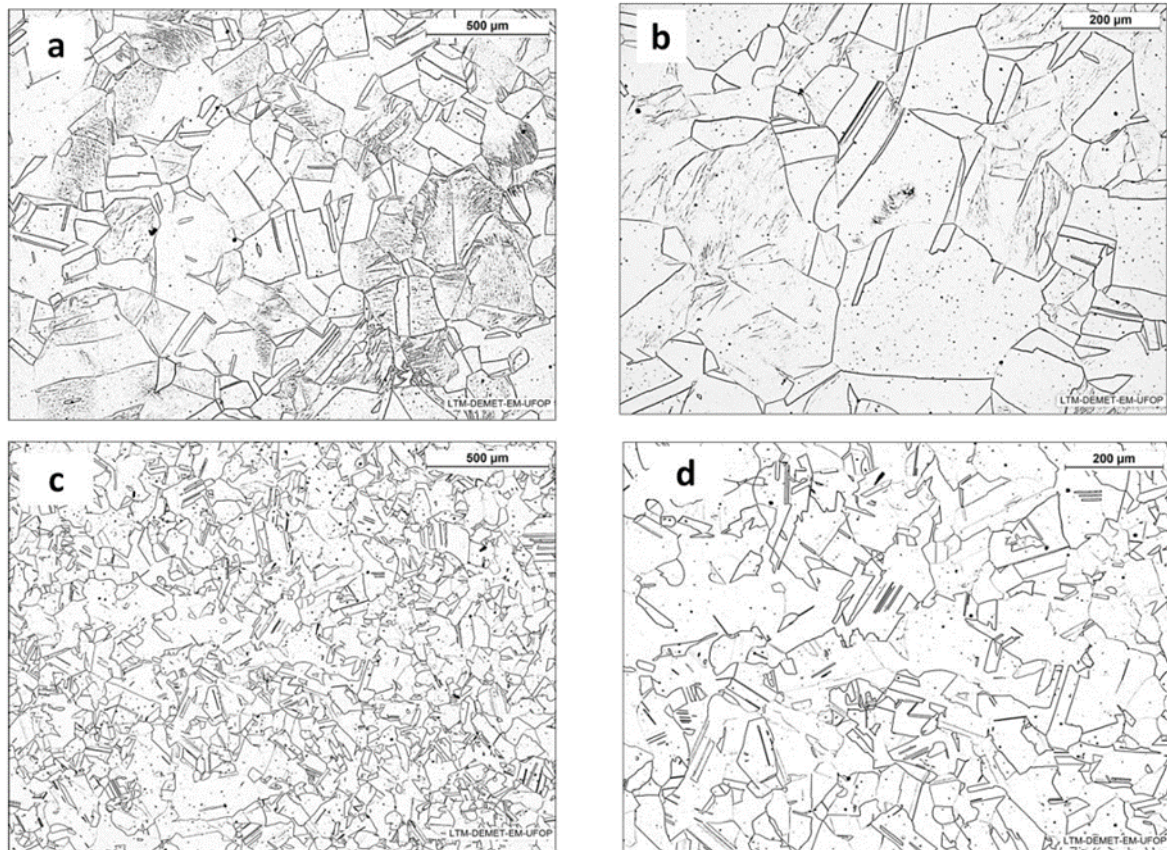
5.3 Avaliação Microestrutural do Cobre no Estado de Entrega e Recozido

A análise microestrutural das amostras de cobre nas diferentes condições revela alterações significativas na morfologia dos grãos. Na amostra no estado de entrega (Figura 5.5a e 5.5b) é possível observar grãos poligonais, bandas de deformação e algumas inclusões endógenas. Por outro lado, as Figura 5.5c e 5.5d apresentam o aspecto microestrutural da amostra de cobre submetida ao tratamento térmico de recozimento. Este tratamento promove a recuperação das propriedades mecânicas do material e, dependendo da temperatura e tempo de recozimento, pode levar à recristalização e posterior crescimento desses novos grãos (Padilha; Siciliano Jr., 2005).

Embora fosse esperado um crescimento de grão na amostra recozida em relação ao estado de entrega, observou-se um comportamento contrário: o cobre recozido apresentou uma microestrutura mais refinada, mesmo com o resfriamento realizado no interior do forno, em condição de baixa taxa de resfriamento (Padilha; Siciliano Jr., 2005). A caracterização quantitativa do tamanho de grão foi realizada por meio do método dos interceptos. Os resultados revelaram um tamanho médio de grão de 148,13 μ m para a condição de entrega e de 84,53 μ m para a condição recozida.

A resposta microestrutural observada nas amostras avaliadas neste estudo está condicionada ao histórico prévio de deformação plástica acumulada no material no estado de fornecimento. Ainda que os detalhes do processo termomecânico adotado na fabricação original das barras de cobre comercialmente puro (99,8%) não tenham sido disponibilizados, a análise microestrutural evidencia a presença de bandas de deformação, estruturas típicas de encruamento em ligas metálicas com estrutura cúbica de face centrada (CFC), como o cobre. Essas bandas indicam um acúmulo significativo de discordâncias, o que se manifesta macroscopicamente por meio de maior resistência mecânica e menor ductilidade, como confirmado nos ensaios de tração realizados em comparação com a condição recozida (Meyers; Chawla, 1982; Garcia; Spim; Santos, 2012).

Figura 5.5: Micrografia das amostras no estado de entrega (a, b) e após recebimento (c, d).



Fonte: Próprio autor, 2025.

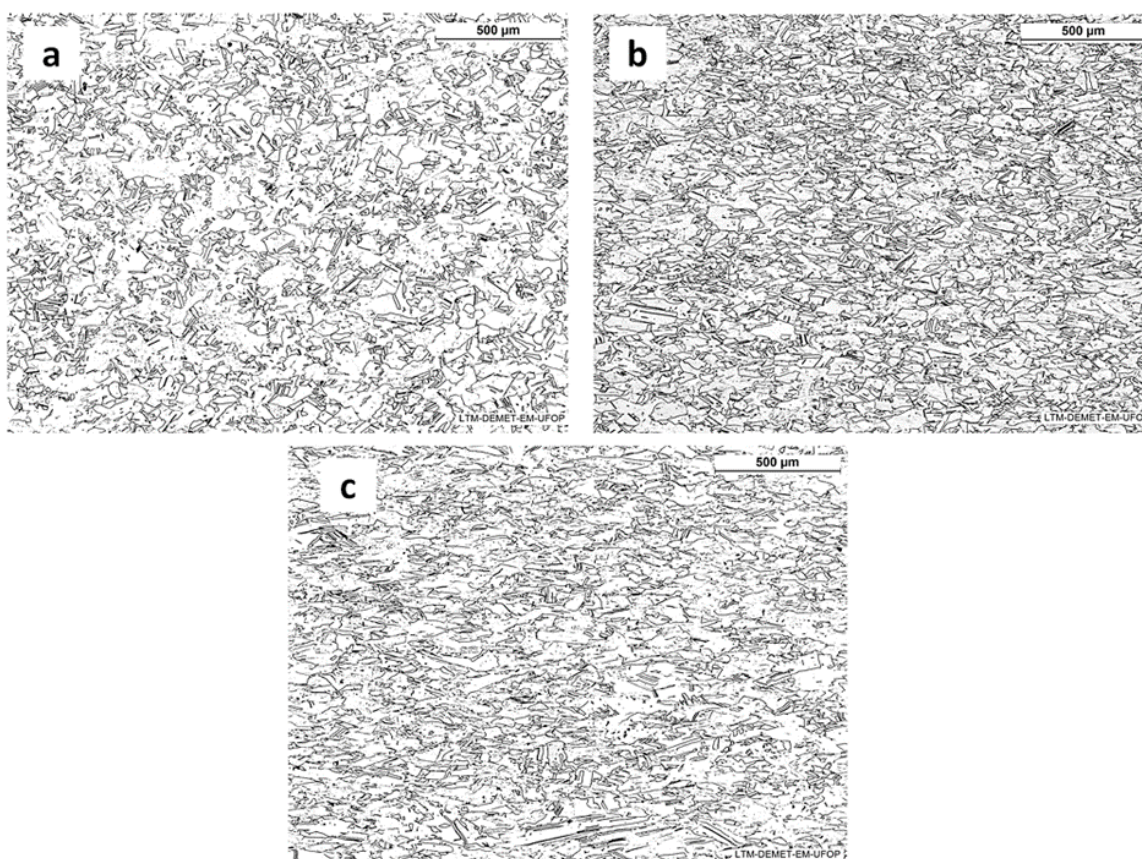
Do ponto de vista termodinâmico, o grau de deformação plástica acumulada está diretamente relacionado ao potencial de energia interna disponível para os processos de recuperação e recristalização durante o recozimento. Como discutido por Padilha e Siciliano Jr. (2005) e Humphreys e Hatherly (2004), em materiais com distribuição heterogênea de deformação, regiões mais intensamente deformadas, com alta densidade de discordâncias e maior energia armazenada, tendem a recrystalizar mais rapidamente, enquanto regiões menos deformadas passam predominantemente por recuperação estática. A velocidade de crescimento de grão, por sua vez, é proporcional à densidade de defeitos cristalinos e reduz-se com o avanço do tempo de recozimento, à medida que a fração recristalizada se aproxima da totalidade e o gradiente de energia livre diminui (Dieter, 1981; Humphreys; Hatherly, 2004).

O tamanho de grão final após o recozimento, portanto, depende de uma combinação de fatores: a energia de deformação acumulada, o tamanho de grão inicial, a temperatura e o tempo de exposição térmica, conforme descrito nos modelos cinéticos de recristalização clássicos (Padilha; Siciliano Jr., 2005)

5.4 Avaliação da Evolução Microestrutural e Dureza do Cobre Laminado a Frio

O aspecto microestrutural das amostras processadas por 1, 2 e 3 passes (L1, L2 e L3, respectivamente) é apresentado na Figura 5.6. Para a amostra L1 (Figura 5.6a) nota-se que alguns grãos começam a apresentar certo grau de achatamento, marcando o início do processo de deformação correspondente a $\epsilon_{ef} = 0,12$. Este achatamento é heterogêneo, ou seja, alguns grãos são mais alongados do que outros, indicando que a deformação não foi uniforme ao longo do material. Para a amostra L2 (Figura 5.6b), devido ao aumento da deformação ($\epsilon_{ef} = 0,26$), observa-se um achatamento mais pronunciado em comparação ao passe anterior. Após o terceiro passe (Figura 5.6c, $\epsilon_{ef} = 0,39$) o grau de achatamento se intensifica, levando a um estado microestrutural mais homogêneo.

Figura 5.6: Aspecto microestrutural das amostras L1 (a), L2 (b) e L3 (c), submetidas a 1, 2 e 3 passes de laminação a frio, respectivamente



Fonte: Próprio autor, 2025.

Dessa forma, observa-se que o número de passes de laminação influencia diretamente o grau de deformação acumulada no material e o alongamento preferencial dos grãos na direção da força aplicada. Após três passes, a microestrutura revela grãos significativamente alongados,

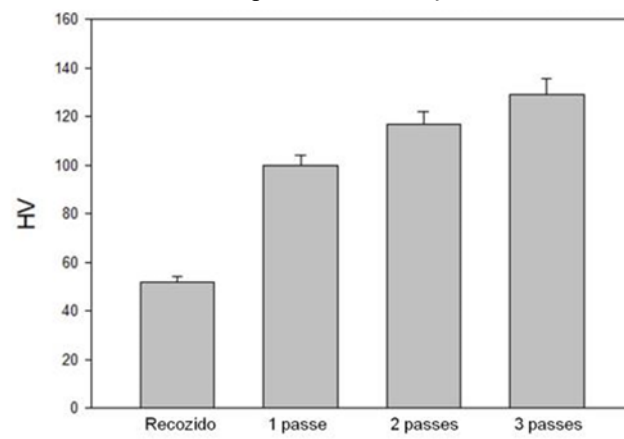
bem como uma distribuição mais homogênea da deformação, evidenciando a evolução do estado microestrutural em resposta à laminação progressiva.

Os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância com os dados da literatura. Gama (2003), ao investigar a transformação de fase em ligas de cobre submetidas a diferentes graus de deformação a frio, relatou que reduções sucessivas na espessura, mesmo com apenas 5% por passe, favorecem o alongamento dos grãos na direção de laminação, resultando em uma microestrutura mais uniforme ao final do processo. De modo semelhante, o estudo de Silvério (2008), embora realizado com aços microligados, demonstra que a laminação em múltiplos passes promove o alongamento progressivo dos grãos na direção do fluxo de material, alterando substancialmente a morfologia da microestrutura.

Essas observações microestruturais estão em perfeita concordância com os resultados de microdureza Vickers apresentados na Figura 5.7. Nota-se um aumento sistemático da dureza média em função do número de passes de laminação, evidenciando o efeito do encruamento por deformação plástica. A amostra recozida, com dureza média de aproximadamente 52HV, apresenta a menor resistência mecânica, o que está de acordo com sua estrutura recristalizada e baixa densidade de discordâncias. Por outro lado, as amostras laminadas demonstram aumento expressivo de dureza com o número de passes: 100HV após 1 passe, 117HV após 2 passes e 129HV após 3 passes, com desvio padrão relativamente pequenas, indicando boa reprodutibilidade dos dados.

Esse aumento progressivo da dureza reflete diretamente a elevação da densidade de defeitos cristalinos e o aumento da energia interna do material, fenômeno amplamente documentado em ligas metálicas submetidas a processos de deformação plástica acumulativa. Estudos da literatura reforçam essa tendência. Nassif (2019), ao investigar o comportamento mecânico do cobre comercialmente puro submetido ao forjamento multidirecional, observou que processos de deformação plástica severa, assim como a laminação em múltiplos passes, induzem uma elevada densidade de discordâncias, promovendo endurecimento significativo. De modo análogo, Castro (2014), ao estudar ligas de alumínio deformadas a frio via Extrusão Angular em Canais Iguais (ECAP), relataram um aumento da dureza de aproximadamente 54% já no primeiro passe de deformação, resultado da elevação da energia interna do material em virtude do acúmulo de defeitos cristalinos.

Figura 5.7: Microdureza Vickers para amostras de cobre no estado como recebido, recozida e submetida a 1, 2 e 3 passes de laminação.



Fonte: Próprio autor, 2025.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou, de maneira experimental e analítica, os efeitos do recozimento e da laminação a frio sobre a evolução microestrutural, a resistência mecânica e o comportamento de fratura do cobre comercialmente puro, utilizando ensaios de tração, medidas de microdureza Vickers, microscopia ótica e análise de fratura por MEV.

- ✓ No que tange ao tratamento térmico, observou-se que o recozimento a 600°C por 2 horas promoveu recristalização eficiente, resultando em grãos mais equiaxiais e em maior capacidade de encruamento subsequente. A redução da dureza de 99 HV (estado de entrega) para 52HV (estado recozido) e o aumento no alongamento total médio de 7,3mm para 14mm reforçam a efetividade do processo na recuperação da ductilidade;
- ✓ Os ensaios de tração realizados em amostras no estado de entrega e recozidas demonstraram diferenças marcantes no comportamento mecânico. O material no estado de entrega apresentou maior resistência mecânica (limite de escoamento $\approx$ 232MPa), resultado do encruamento residual. Em contrapartida, o cobre recozido exibiu menor limite de escoamento ($\approx$ 68MPa), evidenciando recuperação da ductilidade.
- ✓ As análises fractográficas realizadas por MEV permitiram identificar os mecanismos de fratura predominantes nas diferentes condições. A amostra recozida (CP6) apresentou fratura claramente dúctil, com presença homogênea de *dimples* e morfologia compatível com alta absorção de energia antes da falha. Já a amostra no estado de entrega (CP1) revelou uma transição entre fratura dúctil e frágil, com regiões de *dimples* superficiais e zonas centrais com aspecto fibroso e planar, sugerindo a atuação de mecanismos de cisalhamento localizados e menor ductilidade global.
- ✓ A laminação a frio, aplicada em um, dois e três passes consecutivos, com reduções de espessura progressivas, induziu diferentes níveis de deformação plástica e encruamento acumulado no cobre recozido. O aumento do número de passes resultou em incremento sistemático da dureza, da tensão efetiva e da força de laminação.

- ✓ A evolução microestrutural das amostras laminadas foi caracterizada por progressivo alongamento dos grãos na direção da laminação e a homogeneização da estrutura após múltiplos passes. A dureza média variou de 52HV na condição recozida para 129HV após três passes, demonstrando a correlação direta entre o grau de encruamento e o endurecimento mecânico local. A morfologia dos grãos evidenciou achatamento crescente e orientação preferencial à medida que a deformação se acumulava.
- ✓ Os resultados obtidos estão em concordância com estudos prévios, confirmando que a recristalização eleva a ductilidade e que a laminação a frio promove endurecimento progressivo e achatamento microestrutural crescente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCOBRE. *Anuário Brasileiro do Cobre*. 2022. Disponível em: <https://www.virapagina.com.br/abcobre2022/>. Acesso em: 18 mar. 2025, às 13h42.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. E3: *Standard guide for preparation of metallographic specimens*. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. E8/E8M-21: *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. E112-96: *Standard test methods for determining average grain size*. 1996.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

CASTRO, P. R. *Avaliação da textura cristalográfica em ligas de cobre conformados a frio*. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, 2014.

CETLIN, P. R. *Fabricação por Conformação Mecânica*. São Paulo: Artliber, 2024.

DIETER, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

GAMA, J. L. L. *Transformação de fase em ligas de cobre com memória de forma*. 124 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9536>. Acesso em: 30 jun. 2025, às 05h22.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. *Ensaaios dos Materiais*. 2ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HELMAN, H.; CETLIN, P. *Fundamentos de Conformação Mecânica dos Metais*. 2ed. São Paulo: Artliber, 2010.

HUMPHREYS, F. J.; HATHERLY, M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. 2 ed. Oxford: Pergamon, 2004. Acesso em: 09 jun. 2025, às 12h12.

MEYERS, M.; CHAWLA, K. *Princípios de Metalurgia Mecânica*. São Paulo: Blücher, 1982.

NASSIF, M. E. L. *Comportamento mecânico e evolução microestrutural do cobre comercialmente puro submetido ao forjamento multidirecional*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30859?utm_source. Acesso em: 24 jul. 2025, às 17h03.

PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. *Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura*. São Paulo: ABM, 2005.

SCHAEFFER, L. *Conformação Mecânica*. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre, 2004.

SILVÉRIO, V. A. *Estudo da evolução do tamanho de grão na laminação a quente de barras de aço médio carbono microligado ao vanádio – 38MnSiV5*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.academia.edu/48882370>. Acesso em: 31 jul. 2025, às 21h23.