



Universidade Estadual de Campinas



EM 740 A – Laboratório de Engenharia dos Materiais

Professor Rubens Caram Junior



Relatório - Experimento 2

ENCRUAMENTO E RECOZIMENTO

Grupo 2

Guilherme de Carvalho Costa	RA 198301
Henrique Saldanha Bueno	RA 198847
Vinícius Souza Ferreira Santos	RA 206892
Maria Júlia Cristofolletti de Souza	RA 183573
Leonardo Cunha Montechiesi	RA 171924

Campinas - SP

2021

1. Introdução

Segundo Callister (2016), o encruamento é um processo que altera a estrutura dos materiais e ligas por meio da deformação plástica realizada a frio, provocando o aumento de discordâncias, vacâncias, falhas de empilhamento e a transformação morfológica dos grãos cristalinos do material ou liga metálica e, conseqüentemente, o aumento do limite de escoamento e da dureza. Esse fenômeno está presente nos processos de forjamento, laminação, extrusão, trefilação e também nas etapas de conformação de chapas. A presença e o aumento dos defeitos cristalinos ocorre pois parte da energia empregada na deformação plástica é retida no interior do material, o que gera um estado de energia interna superior aos valores iniciais.

Se a temperatura aumenta, o material se torna cada vez mais termodinamicamente instável, resultando no fenômeno do recozimento. Tal tratamento térmico pode ser dividido em três etapas, em ordem de acontecimento: recuperação, recristalização e crescimento de grãos; e as propriedades do material são alteradas durante esse processo. O processo de recuperação é marcado pelo alinhamento das discordâncias e pela produção de regiões livres de deformação, chamadas de sub-grão, ocorrendo a recuperação das propriedades físicas do material sem mudança visível na microestrutura. As propriedades que são mais afetadas pela recuperação são aquelas sensíveis à defeitos pontuais, uma vez que o processo causa a diminuição da densidade de discordâncias no interior das células (TOTTEN et al, 2006).

Após a etapa da recuperação, vem a etapa da recristalização: substituição da estrutura deformada a frio por novos grãos livres de deformação. Ao contrário da etapa anterior, esse processo pode ser identificado através de métodos metalográficos e pode ser caracterizado pela diminuição da resistência mecânica, da dureza e pelo aumento da ductilidade do material (SILVA, 2010). Além disso, a energia proveniente do trabalho a frio é utilizada como força motriz para diminuir a densidade de discordâncias e eliminar os efeitos da deformação. Dentre as diversas variáveis que influenciam diretamente a recristalização, pode-se citar : quantidade inicial de deformação, tempo de duração do processo e temperatura, tamanho inicial do grão, composição e grau de recuperação .

Por fim, tem-se a etapa de crescimento de grãos, que acontece lentamente com a continuidade do tratamento térmico. Ao longo desta etapa a força motriz é inferior à das etapas anteriores e é proveniente da diminuição da energia livre da área de contorno de grão (SILVA, 2010). É possível acelerar o processo de crescimento de grãos através do aumento da temperatura, assim como é possível inibi-lo através da presença de partículas de segunda fase que atuam como empecilhos para o movimento dos contornos de grãos (CALLISTER, 2016).

2. Objetivos do experimento

2.1 Objetivos gerais

Analisar o efeito da deformação plástica e do recozimento na dureza de amostras de cobre eletrolítico, através do uso de amostras com diferentes deformações que sofrem recozimento a mesma temperatura durante o mesmo tempo, para se testar a variação que o recozimento leva a peças encruadas com diferentes reduções; e latão CLA, onde amostras com a mesma deformação passam pelo recozimento à mesma temperatura, em tempos diferentes, como investigar o quanto o tempo de recozimento altera as características.

2.2 Objetivos específicos

Observar como a deformação plástica e as condições na qual o procedimento de recozimento é realizado influenciam nas propriedades mecânicas e nas fases de recuperação, recristalização e crescimento de grão das amostras.

3. Metodologia experimental

Para a realização do experimento foram utilizadas cinco amostras de cobre eletrolítico (pureza 99,9%) e cinco de latão CLA 360 (60-63% Cu; 35% Zn; 0,35% Fe; 0,3% Sn; 2,5-3,7% Pb). Ambos tipos de material foram previamente submetidos ao processo de recozimento (550 °C por 1h seguido de resfriamento em água).

Na primeira etapa do experimento foram medidas as respectivas durezas do cobre (Rockwell F) e do latão (Rockwell B) após eles terem sido recozidos. Em seguida, submetemos as amostras a um processo de deformação plástica. No caso do cobre as amostras tiveram uma redução na altura de 10, 20, 30, 40 e 50% e as amostras de latão uma redução de 30%. As amostras foram lixadas visando a redução de imperfeições superficiais e suas durezas foram novamente medidas.

Para medir as durezas, foi utilizado o durômetro PANTEC- RBS cujos parâmetros estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para a determinação da dureza das amostras

	Cobre	Latão
Escala	F	B
Penetrador	Esfera de 1,588 mm	Esfera de 1,588 mm
Carga	60 Kfg	100 Kfg

Pré-carga	10 kg	10 kg
Leitura	Escala vermelha	Escala vermelha

Na parte final, todas as amostras foram recozidas. As amostras de cobre foram submetidas a uma temperatura de 450 °C por 15 min, enquanto que as amostras de latão foram recozidas à temperatura de 550 °C por 3, 7, 15, 30 e 60 minutos. Logo em seguida, as amostras foram resfriadas rapidamente em água, lixadas e, por fim, tiveram suas durezas medidas.

4. Resultados e discussões



4.1. Cobre

Umavez das amostras de cobre deformadas a frio a 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de suas alturas, foram realizados os ensaios de dureza sobre as mesmas e posteriormente realizado o processo de recozimento a 450°C durante 15 minutos. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 2 e podem ser também visualizados na figura 1, com as amostras antes do recozimento, figura 2, amostras após o recozimento, e figura 3, em que se obteve uma cura aproximada dos dados para comparação das durezas pré e pós recozimento.

Tabela 2. Medidas de dureza das amostras de cobre pós-deformação e pós-recozimento.

	Deformação	0% (inicial)	10%	20%	30%	40%	50%
Deformada a frio	Dureza média [HRF]	22	52	64	78	83	89
	Desvio padrão [HRH]	1	2	1	3	2	2
Recozida	Dureza média [HRF]	-	25	29	35	43	48
	Desvio padrão [HRH]	-	2	3	1	2	1

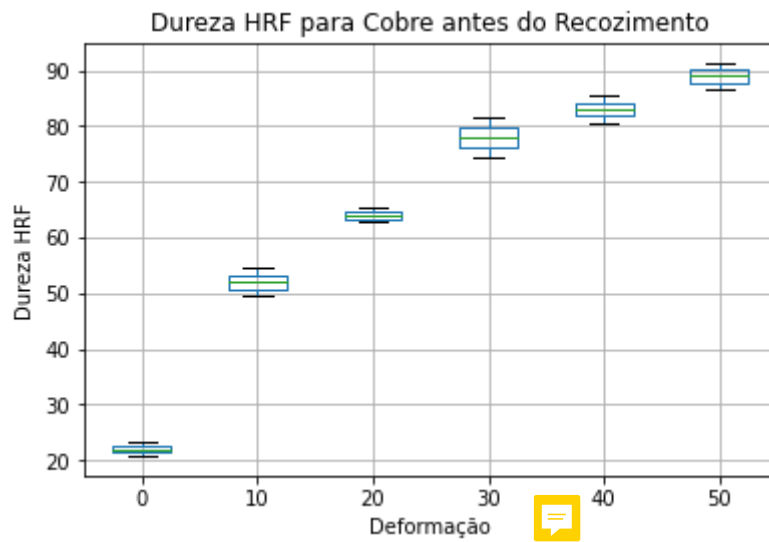


Figura 1. Dureza das diferentes amostras de cobre em função de seus níveis de deformação antes do recozimento.

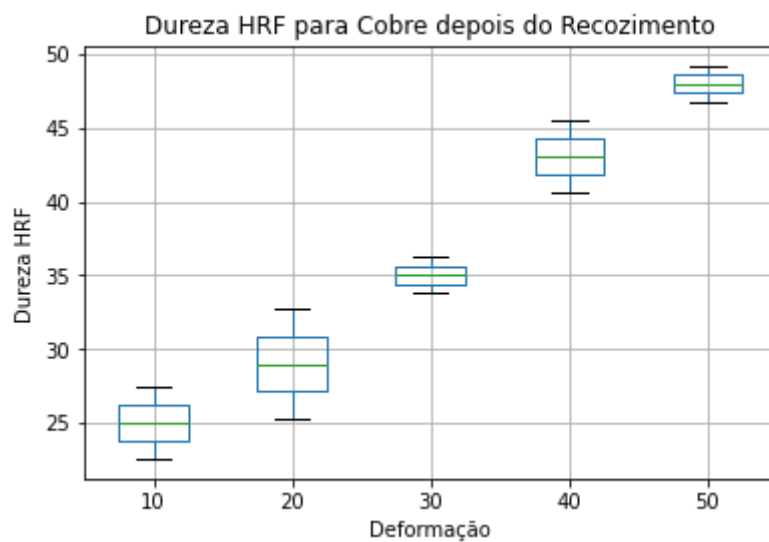


Figura 2. Dureza das diferentes amostras de cobre em função de seus níveis de deformação após o recozimento.

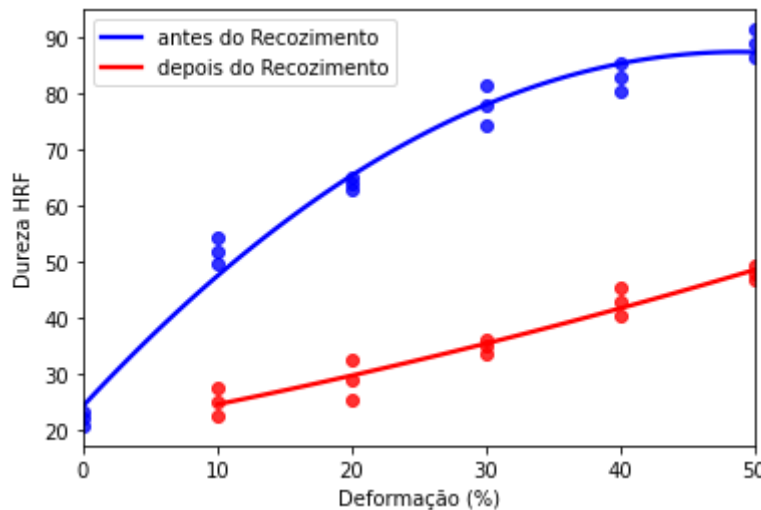


Figura 3. Curvas de dureza em função de deformação para as amostras pré e pós recozimento.

Como esperado, podemos facilmente visualizar na figura 1 o aumento de dureza nas amostras após a deformação a frio, consequência do fenômeno de encruamento e resultado de processos como o “achatamento” de grãos e introdução de defeitos na estrutura, tais como discordâncias, falhas de empilhamento e vacâncias. Além disso, pode-se notar no gráfico da figura 1 um comportamento assintótico da curva pré recozimento, o que indica que, para deformações maiores que 50%, haverá pouca mudança no aumento de dureza da amostra para um mesmo intervalo de deformação. Podemos então concluir que há, provavelmente, um valor máximo de dureza que possa ser alcançado através de deformação plástica a frio para uma peça de cobre e o mesmo não deve ser muito superior à 90 HRF. Vale lembrar que, apenas de elevada dureza e resistência mecânica, as amostras deformadas a frio apresentam baixa ductilidade, motivo pelo qual é realizado o processo de recozimento.

Quanto à figura 2, nota-se, também como esperado, a menor dureza das amostras após o recozimento quando comparadas às mesmas amostras pré-recozimento, a variação pode ser melhor visualizada através da figura 3. Uma vez que o nível de deformação é fator determinante para o comportamento do processo de recristalização, as amostras com diferentes níveis de deformação podem ter alcançado diferentes níveis entre recuperação, recristalização e crescimento de grãos. Como a diminuição na densidade de discordâncias que ocorre durante a recuperação afeta muito levemente a dureza da amostra e todas amostras apresentaram variações significativas de dureza pré e pós recozimento, concluímos que todas as amostras passaram pelo processo de recuperação e entraram no nível de recristalização, quando novos grãos (livre de deformações) são formados, diminuindo defeitos e a densidade

de discordâncias na matriz e, conseqüentemente, diminuindo a dureza e resistência mecânica do material.

Para a peça deformada a 10%, nota-se uma dureza após recozimento muito próxima à dureza inicial, o que indica que a amostra não só passou pelo processo de recristalização, mas também apresentou elevado nível de crescimento de grãos, de forma que as discordâncias são aniquiladas e a amostra volta a ter comportamento semelhante ao apresentado pré-deformação.

Para as amostras deformadas a 20%, 30%, 40% e 50% nota-se um aumento gradativo da dureza após o recozimento em relação ao nível de deformação, sendo a amostra deformada a 20% pouco mais dura que a amostra deformada a 10%, enquanto a amostra deformada a 50% apresenta uma dureza quase 2 vezes superior à peça deformada a 10%. Não é possível determinar a qual nível de recristalização e de crescimento de grãos cada amostra chegou, entretanto pode-se afirmar que as amostras menos deformadas apresentaram maiores níveis de recozimento. Tal fato comprova a influência do nível de deformação no comportamento da recristalização, de modo que para maiores deformações (a uma dada temperatura) o processo tende a ocorrer mais lentamente.

4.2. Latão

Após as amostras de latão serem deformadas a 30% da sua altura inicial, as mesmas foram recozidas a 550°C durante 3, 7, 15, 30 e 60 minutos e resfriadas em água. Foram então realizadas as amostras de dureza pré e pós recozimento. Os resultados encontram-se na tabela 3 e nas figuras 4, que representa os valores da tabela graficamente, e 5, que tenta estabelecer uma curva dos valores obtidos.

Tabela 3. Resultados das diferentes medidas de dureza das amostras de latão.

			Recozida				
	Inicial	Deformada (30%)	3 min	7 min	15 min	30 min	60 min
Dureza média [HRB]	59	75	74	68	58	48	47
Desvio padrão [HRB]	2	2	1	2	1	1	2

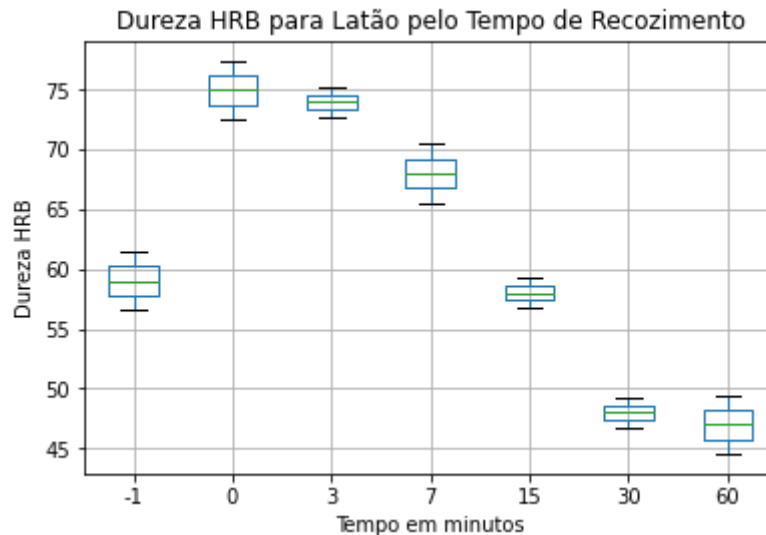


Figura 4. Dureza média das amostras de latão em função do tempo de recozimento a 550°C. O ponto de abscissa (-1) representa a amostra original não deformada. Os demais pontos representam as amostras deformadas em 30%, sendo o ponto de abscissa 0 a amostra não recozida.

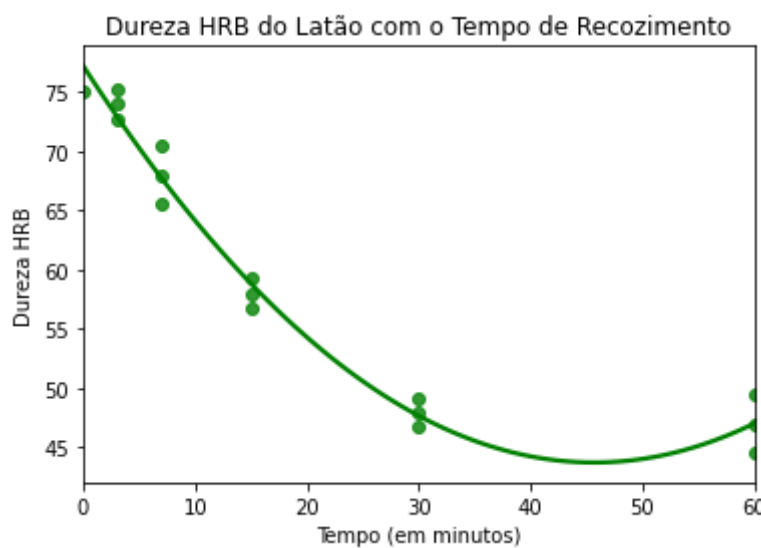


Figura 5. Curvas de dureza em função de deformação para a amostra de Latão

Percebe-se novamente, na figura 4, o aumento de dureza após deformação plástica a frio, mais uma vez devido ao encruamento e introdução de defeitos na matriz do material. Variamos dessa vez o tempo de recozimento, que por sua vez é outro fator determinante para o processo de recristalização. Como esperado, as amostras recozidas não só apresentaram menor dureza quando comparadas à amostra não recozida, mas também apresentaram maior diminuição de dureza para maiores intervalos de recozimento (comprovando a influência do tempo no comportamento da recristalização).

Dada a pequena variação de dureza apresentada pela amostra recozida durante 3 minutos (seu desvio padrão está até mesmo dentro do intervalo do desvio padrão da peça não recozida), concluímos que a mesma iniciou apenas o processo de recuperação, diminuindo sua densidade de discordâncias na matriz, mas trazendo pouca mudança ao seu comportamento.

Quanto às demais peças, as maiores diminuições de suas respectivas durezas indicam a presença de recristalização e crescimento de grãos. Nota-se, inclusive, que as peças com tempo de recozimento superior a 15 minutos apresentam dureza inferior à peça inicial, indicando que a mesma não só passou pelo crescimento de grãos, mas chegou a um nível de tamanho de grãos e de ausência de discordâncias/defeitos superior ao da amostra inicial. Tal fato pode ser devido à presença de uma deformação não prevista na amostra inicial, a qual já apresentava um certo nível de encruamento (ou então a erros de medidas, seja na amostra inicial, seja nas amostras recozidas com tempo superior a 15 minutos).

Além disso, nota-se também um comportamento assintótico para as amostras conforme o tempo de recozimento aumenta, o que indica que há uma dureza mínima que pode ser atingida por uma peça da liga em questão e que não deve ser muito inferior a 47 HRB.


5. Conclusões



Neste experimento foi possível estudar o efeito do encruamento e do recozimento na dureza de amostras de latão e de cobre. No caso do cobre, as amostras foram submetidas a diferentes variações de altura; para o Latão, foi analisada a influência do tempo de recozimento.

A partir da análise das amostras de Cobre, observou-se um aumento da dureza após a deformação a frio, explicitando a existência do encruamento e, conseqüentemente, o efeito do achatamento de grãos e introdução de defeitos. Ponto a ser destacado foi o comportamento aproximadamente constante do valor de dureza para deformações a partir de 50%, indicando a possibilidade do valor de dureza ser máximo nessa região - por volta de 90 HRF. Após o recozimento das amostras, observou-se a redução da dureza, acompanhada de um maior nível de recozimento para os corpos de provas menos deformados, explicitando assim, a influência desse parâmetro no experimento. Já para o caso do latão, foi possível observar que intervalos maiores de recozimento resultam em uma maior diminuição da dureza das amostras deformadas, demonstrando a influência da variável para o recozimento. Ponto relevante é o

comportamento aproximadamente constante do valor de dureza para tempos de recozimento acima de 15 minutos.

Sendo assim, o experimento explicita a importância de se conhecer sobre o efeito do encruamento e do recozimento na dureza dos materiais, propriedade que é de suma importância para diversas aplicações da engenharia 

6. Referências bibliográficas

CALLISTER Jr, W.D. “**Materials Science and Engineering: An Introduction**”, J. Wiley & Sons. Seções sobre encruamento, recuperação, recristalização e crescimento de grãos. 9ª edição. 2016.

TOTTEN, G. E; GOPINATH ,N.; PYE ,D. **Steel Heat Treatment Handbook**. CRC Press. November 14, 2006.

SILVA, A.L.V.C. e MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. Editora Edgard Blucher, 3ª ed, São Paulo/SP, pp. 561-584, 2010

Crítérios	Nota Máxima	Nota Atribuída
1. Revisão bibliográfica (máximo 1 página)	1,00	1,00
2. Definição dos objetivos	1,00	1,00
3. Descrição da metodologia	1,00	1,00
4. Apresentação e discussão dos resultados	2,00	2,00
5. Conclusões e comparação com objetivos	2,00	2,00
6. Citações no texto e referências bibliográficas	1,50	1,50
7. Formatação do relatório	1,00	1,00
8. Precisão gramatical e ortográfica	0,50	0,40
Total	10,00	9,90

Em caso de dúvida, mandar a mesma para nanda.melo_f@hotmail.com