



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**NATÁLIA MARA DE OLIVEIRA LEONEL**

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO**  
**NA RECRISTALIZAÇÃO DO LATÃO CuZn34**

**BELO HORIZONTE**

**2012**

NATÁLIA MARA DE OLIVEIRA LEONEL

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO  
NA RECRISTALIZAÇÃO DO LATÃO CuZn34**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Wellington Lopes

Coorientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2012

NATÁLIA MARA DE OLIVEIRA LEONEL

**ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO  
NA RECRISTALIZAÇÃO DO LATÃO CuZn34**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 12/11/12

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Wellington Lopes – Orientador

---

Prof. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

---

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas

“Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto Willians Leonel e Patrícia Batista de Oliveira Leonel, pois sem eles nada teria começado.”

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em especial ao meu orientador, Wellington Lopes, pelo apoio, carinho e paciência nestes meses de muito trabalho que estivemos juntos. Agradeço também a todos os professores e funcionários que acreditam na instituição CEFET-MG, e portanto me proporcionaram laboratórios de qualidade, livros gratuitos na biblioteca e aulas esclarecedoras.

## RESUMO

A recristalização é um fenômeno que compreende a formação de grãos novos, isentos do histórico de deformação anterior a essa condição de tratamento térmico. Este fenômeno exige uma energia mínima para ocorrer, sendo temperatura, tempo, material e estado de deformação prévia do material como variáveis desse processo. Com o objetivo de avaliar a influência do processamento mecânico na cinética de recristalização do latão CuZn34, este material foi tracionado de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do seu alongamento uniforme total. Em seguida, uma amostra de cada valor de pré-deformação em tração foi submetida ao dobramento de  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$ , assim como amostras sem nenhuma deformação prévia. Após o processamento mecânico, o latão foi recozido a  $450^\circ\text{C}$  durante 15 minutos. Os resultados mostraram que a quantidade de grãos recristalizados aumentou significativamente com o dobramento de  $+90^\circ$  e de  $-90^\circ$ . Observou-se ainda que o esforço combinado de tração e de dobramento ocasionou quantidade maior de grãos recristalizados quando comparado com o esforço monotônico em tração para a mesma quantidade de deformação plástica. Por fim, percebeu que a quantidade e o tipo de deformação sofrida antes do recozimento influenciaram a fração de grãos recristalizados durante o tratamento térmico, sendo detectada uma quantidade mínima de energia na forma de deformação para a observação desse efeito.

## ABSTRACT

The recrystallization comprehends a phenomenon characterized by the appearing of new grains, free of the deformation history that was applied before this heat treatment. This phenomenon requires a minimum energy and the temperature, the time, the material and the previous deformation condition are the main variables of this process. Considering these approaches to describe the recrystallization, the aim of this work was evaluate the influence of mechanical processing conditions on the recrystallization kinetic of CuZn34 brass that was tensioned up 5%, 20%, 50% and 80% of uniform elongation. After the tension tests, samples of each prestrain value in tension and in as received condition were submitted to bending ( $+90^\circ$  and  $-90^\circ$ ). After the mechanical processing, the brass was annealed at  $450^\circ\text{C}$  during 15 minutes. The results showed that the amount of recrystallized grains increased with the bending. It was observed also that when that tension was followed by bending, the amount of recrystallized grains was larger than that detected in monotonic tension tests for the same plastic deformation value. Finally, it was observed that the amount and the deformation mode applied before the annealing influenced the fraction of recrystallized grains during the heat treatment and it is necessary a minimum energy, represented by the deformation value to begin the CuZn34 brass recrystallization.

**LISTA DE FIGURAS**

3.1	Diagrama de fase Cobre e Zinco. (TOTTEN, 2006)	23
3.2	Fluxograma dos tipos de conformação dos metais.	25
3.3	Descrição do esquema de forças atuantes durante os principais processos de conformação mecânica- a) forjamento, b) laminação, c) trefilação, d) extrusão, e) embutimento, f) estiramento, g) dobramento e h) corte por cisalhamento (SILVA, 2010).	28
3.4	Ilustração da variação da deformação com a direção (CETLIN, 2005).	28
3.5	Gráfico de propriedades mecânicas versus redução a frio (SILVA, 2010).	31
3.6	Gráficos do trabalho a frio versus tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência à tração e ductilidade para o latão, o aço SAE 1040 e o cobre. (CALLISTER, 2008).	31
3.7	Esquemas do arranjo das discordâncias- (a) discordâncias em material encruado e (b) discordâncias organizadas após a poligonização (TOTTEN, 2006).	34
3.8	Ilustração de contornos de alto e baixo ângulo (CALLISTER, 2008).	34
3.9	Ilustração da recristalização dinâmica e da recristalização estática (SILVA, 2010).	35



3.10	Gráfico da temperatura de recristalização versus a temperatura de fusão de alguns metais puros (TOTTEN, 2006).	36
3.11	Decréscimo da temperatura de recristalização do ferro com o aumento do trabalho a frio (CALLISTER, 2008).	37
3.12	Ilustração do avanço da recristalização em tempo crescente (TOTTEN, 2006).	38
3.13	Fotomicrografias do latão encruado e em diferentes estágios de recristalização. (CALLISTER, 2008)	39
3.14	Temperatura de recristalização do ferro $\alpha$ e do ferro $\gamma$ em função da deformação a frio em termos percentuais, % (TOTTEN, 2006).	40
3.15	Gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ) durante a recristalização dinâmica (SILVA, 2010).	41
3.16	Redução da dureza durante a recristalização de um aço com 0,03% de carbono (TOTTEN, 2006).	44
3.17	Simulação da cinética de recristalização.	46
3.18	Fração da recristalização estática versus o tempo em diferentes situações de trabalho a frio em uma liga de nióbio (BARTOLOMÉ, 2002).	47
3.19	Gráfico isotérmico genérico sobre a temperatura em função do logaritmo do tempo na recristalização (TOTTEN, 2006).	48

3.20	Tamanho de grão, ductilidade e limite de resistência à tração em função da temperatura de recozimento (CALLISTER, 2008).	49
3.21	Ilustração de um gráfico gerado após a conclusão de um ensaio de tração (GARCIA, 2008).	50
4.1	Corpo de prova para tração do latão no estado como recebido.	54
4.2	Medidas (em mm) do corpo de prova da figura 4.1.	55
4.3	Representação do patamar de escoamento de um material, ou seja, região de deslizamentos de discordâncias (GARCIA, 2008).	56
4.4	Cortadeira metalográfica (cut-off) do laboratório de metalografia do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.	57
4.5	(a) Acrílico auto-polimerizante no estado sólido e líquido, respectivamente. (b) Molde de silicone.	57
4.6	Lixadeira Struers do laboratório de Metalografia do CEFET-MG.	58
4.7	Esquema do processo de lixamento das amostras.	58
4.8	Politriz Struers do laboratório de Metalografia do CEFET-MG.	59
4.9	Esquema da sequência do polimento e posterior ataque químico.	59

4.10	Microscópio óptico do laboratório de metalografia do CEFET-MG.	60
4.11	Sequência de processos para a metalografia.	60
4.12	Espectrômetro <i>RayNy</i> EDX-720 Shimadzu do laboratório de caracterização de materiais do departamento de Engenharia de Materiais CEFET-MG.	61
4.13	Equipamento usado para a análise térmica das amostras do latão CuZn34, <i>Simultaneous DTA-TG Aparatus, Shimadzu</i> , do laboratório de caracterização de materiais do departamento de Química Tecnológica do CEFET-MG.	62
4.14	Dobradeira mecânica do laboratório de Calderaria do CEFET-MG.	63
4.15	Estágios do dobramento realizados no estudo sendo a região circulada da amostra a região que realmente foi dobrada.	63
4.16	Amostra do latão no estado como recebido dobrada de 90° e em seguida, desdobrada em 90°, evidenciando a área dobrada e a área adjacente.	64
4.17	Forno <i>Novus NI040</i> do laboratório de tratamento térmico do CEFET-MG.	66
4.18	Forno Heraeus da marca Brasimet do laboratório de tratamento térmico do CEFET-MG.	66
4.19	Malha de pontos usada para o cálculo da fração recristalizada.	67

5.1	Curva tensão convencional versus deformação convencional do latão no estado como recebido.	69
5.2	Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão no estado como recebido.	71
5.3	Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão no estado como recebido.	71
5.4	Curva tensão convencional versus deformação convencional para os quatro valores e pré-deformação em tração do latão CuZn34.	72
5.5	Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 5% de alongamento uniforme.	73
5.6	Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 20% de alongamento uniforme.	74
5.7	Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 50% de alongamento uniforme.	74
5.8	Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 80% de alongamento uniforme	75
5.9	Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 5% do valor do alongamento uniforme.	76
5.10	Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 20% do valor do alongamento uniforme.	76

5.11	Varição da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 50% do valor do alongamento uniforme.	77
5.12	Varição da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 80% do valor do alongamento uniforme.	77
5.13	Fotomicrografias do latão CuZn34- a) estado como recebido e b) após recozimento a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	78
5.14	Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de $e = 0,026$ (5% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	79
5.15	Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de $e = 0,105$ (20% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	79
5.16	Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de $e = 0,262$ (50% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	80
5.17	Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de $e = 0,418$ (80% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	80
5.18	Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de $e = 0,026$ , e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.	81

- 5.19 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,105$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 82
- 5.20 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,262$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 83
- 5.21 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,418$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 84
- 5.22 Fração recristalizada em função da quantidade de pré-deformação em tração, expressa em termos do percentual de deformação em termos do alongamento uniforme do latão CuZn34 tracionado e recozido. 85
- 5.23 Fotomicrografia do latão CuZn34 na região dobrada e desdobrada de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 86
- 5.24 Fotomicrografia do latão CuZn34 na região adjacente à dobrada e desdobrada de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 86
- 5.25 Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,026$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 87

- 5.26 Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,105$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 88
- 5.27 Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,262$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 88
- 5.28 Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,418$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 89
- 5.29 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 no estado como recebido em seguida, dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 90
- 5.30 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,026$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 91
- 5.31 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,105$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre. 92

- 5.32 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 93  
pré-deformado em tração de  $e = 0,262$ , dobrado e desdobrado  
de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio  
óptico, ataque com reativo DiCobre.
- 5.33 Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 94  
pré-deformado em tração de  $e = 0,418$ , dobrado e desdobrado  
de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio  
óptico, ataque com reativo DiCobre.
- 5.34 Gráfico da fração recristalizada em função do valor de pré- 95  
deformação em tração expresso pelo percentual do  
alongamento uniforme para o latão CuZn34 tracionado,  
dobrado/desdobrado de  $90^{\circ}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15  
minutos.
- 5.35 Gráfico da fração recristalizada em função da pré- 96  
deformação em tração em termos do percentual do  
alongamento uniforme para o latão: (I) pré-deformado em  
tração e recozido e (II) pré-deformado em tração, dobrado e  
desdobrado de  $90^{\circ}$  e recozido.



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AU	Alongamento uniforme
EBSD	<i>Electron Back Scattering diffraction</i>
GO	Grão Orientado
Log	Logaritmo

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	20
2. OBJETIVOS .....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Latão.....	23
3.2. Processamento Mecânico (Conformação Mecânica).....	24
3.2.1. Trabalho ou conformação mecânica a quente.....	29
3.2.2. Trabalho ou conformação mecânica a frio .....	30
3.3. Recozimento.....	32
3.3.1. Recuperação.....	32
3.3.2. Recristalização e crescimento de grão .....	34
3.4. O fenômeno da recristalização e as propriedades dos materiais .....	42
3.5. Cinética de recristalização .....	45
3.6. Recozimento para recristalização .....	48
3.7. Caracterização de Materiais.....	50
3.7.1. Caracterização Mecânica.....	50
3.7.2. Caracterização Térmica .....	52
4. METODOLOGIA.....	54
4.1. Material .....	54
4.2. Caracterização Mecânica .....	54
4.3. Caracterização Microestrutural.....	56
4.4. Caracterização Química.....	60
4.5. Análise Térmica .....	61
4.6. Processamento Mecânico .....	62
4.7. Tratamento Térmico .....	65
4.8. Previsão da fração recristalizada.....	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
5.1. Caracterização Mecânica .....	69
5.2. Caracterização Química.....	70
5.3. Caracterização Térmica .....	70
5.4. Processamento mecânico .....	72
5.4.1. Pré-deformação em tração .....	72
5.5. Escolha da temperatura e do tempo de recozimento .....	73
5.6. Processamento mecânico versus arranjo microestrutural .....	78
5.7. Cinética de Recristalização do Latão .....	79

6. CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS.....	100

## 1. INTRODUÇÃO

A transformação mecânica dos diferentes tipos de materiais requer, dentre outros aspectos, a aplicação de esforços mecânicos com o intuito de alterar a forma e as dimensões dos mesmos, ocasionando normalmente, o endurecimento pela deformação plástica (encruamento). Essa mudança de forma é auxiliada pelo aquecimento do material, seja este proveniente das perdas associadas à aplicação do esforço mecânico ou pela condução de tratamentos térmicos que também modificam as propriedades dos materiais.

Dentre os diversos tipos de tratamentos térmicos, destaca-se o recozimento, usado, dentre outros objetivos, para restituir a ductilidade reduzida pelas diversas operações de conformação mecânica que provocam o aumento da resistência à deformação plástica pelo encruamento. Em termos estruturais, este tratamento térmico compreende a execução de três etapas subsequentes, a recuperação, a recristalização e o crescimento do tamanho de grão. Contudo, a conclusão dessas três etapas não é exigência para a execução desse tratamento térmico, sendo isso feito de acordo com os objetivos ao término do tratamento térmico.

A recuperação ocorre quando o material recupera parte das propriedades físicas existentes antes da deformação plástica, sendo praticado, por exemplo, quando o objetivo do recozimento é para reduzir as tensões residuais (TOTTEN, 2006).

A recristalização consiste no aparecimento de grãos novos, isentos do histórico de processamento mecânico e térmico anteriores à condução do tratamento térmico de recozimento, sendo usado, dentre outros objetivos, para reduzir a resistência mecânica e para obter propriedades eletromagnéticas específicas. Esta etapa do tratamento térmico de recozimento é comumente utilizada para classificar as operações de conformação mecânica em termos da temperatura de aquecimento do material, sendo assim, reconhecida a classificação de trabalho a quente (trabalho mecânico conduzido acima da temperatura necessária à recristalização do material) e de trabalho a frio (esforço mecânico realizado abaixo da temperatura de recristalização) (TOTTEN, 2006).

Por fim, o crescimento de grão ocorre quando a temperatura de processamento ultrapassa a temperatura de recristalização de um material, provocando assim, a redução dos contornos de grão e deste modo, a redução deste mecanismo de aumento da resistência

mecânica. Deste modo, nota-se para materiais trabalhados a frio o aumento da ductilidade dos mesmos com a conseqüente redução da resistência mecânica dos mesmos.

O aparecimento de grãos novos é um processo difusivo que depende do gradiente químico entre os meios envolvidos, da temperatura e tempo adotados no tratamento térmico. Contudo, para a ocorrência desse fenômeno é necessária a existência de uma quantidade mínima de energia para ativar esse processo. Neste caso, a deformação plástica prévia consegue reduzir a temperatura e/ou o tempo necessário à recristalização de um material.

Desta forma, o controle da quantidade e do modo de deformação plástica constitui assim, uma variável para o controle da cinética de recristalização de um material.

Diante do exposto, este trabalho pretende investigar a influência da quantidade de deformação prévia em tração e da combinação dos esforços mecânicos de tração e de tração/compressão (dobramento) na cinética de recristalização do latão CuZn34, simulando assim, o efeito das diferentes etapas de processamento mecânico na cinética de recristalização desse material.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo específico deste trabalho foi investigar a influência das condições de processamento mecânico na recristalização do latão CuZn34 para uma mesma condição de tratamento térmico (aquecimento a 450°C acompanhado por tempo de encharque de 15 minutos com resfriamento no interior do próprio forno). Deste modo, fez-se o estudo da recristalização em função das seguintes variáveis:

- a) do modo de deformação plástica: tração (ensaio de tração) e tração/compressão (dobramento);
- b) da combinação dos modos de deformação, ou seja, mediante a pré-deformação em tração acompanhada pela condução do dobramento;
- c) da quantidade de pré-deformação em tração: sendo o material pré-deformado em tração de 4 valores percentuais do alongamento uniforme deste material (5%, 20%, 50% e 80%).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Latão

O latão é uma liga metálica composta por cobre e por zinco. Em algumas situações, outros elementos de liga são adicionados em pequenas quantidades para modificar propriedades específicas.

A temperatura de fusão estimada para o latão com 34% de Zinco é de aproximadamente 950°C, conforme pode ser observado na figura 3.1, (TOTTEN, 2006).

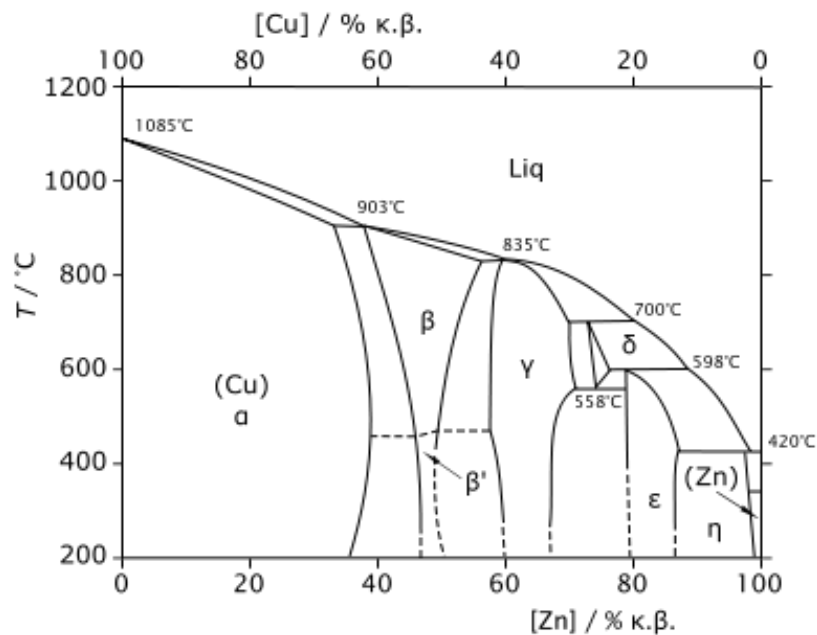


Figura 3.1- Diagrama de fase Cobre e Zinco. (TOTTEN, 2006)

O cobre é um metal não ferroso de grande importância devido à quantidade de ligas que produz. É o segundo melhor condutor de calor e eletricidade, perdendo apenas para a prata. Este metal apresenta ainda facilidade para ser conformado e resistência à corrosão alta. O latão é uma das ligas de cobre mais conhecidas, assim como o bronze (CHIAVERINI, 2003).

Quando o cobre recebe a adição de até 15% de zinco, tem-se um latão com maior resistência à corrosão comparada ao cobre puro. Acima de 15% de zinco, o latão fica susceptível a sofrer corrosão sob tensão e à dezincificação (COUTINHO, 1992).

A fabricação mais antiga que se sabe do latão é de 30 a.C. pelos romanos. O latão era produzido através do aquecimento de uma mistura de cadmia com cobre. Em seguida, para fabricar objetos usava-se a fundição ou o forjamento. (SHOCKMETAIS, 2011).

Considerando as principais propriedades desta liga, destaca-se o fato de o mesmo ser reconhecido por ser facilmente conformado a frio quando comparado com outras ligas metálicas, apresenta ainda resistência à corrosão adequada em determinadas situações e ser capaz de sofrer a retirada de material por diferentes processos de usinagem (ASHBY, 2007).

Em termos das principais aplicações do latão, destaca-se o uso desta liga nas indústrias mecânica, bélica e de instrumentos musicais, dentre outras. Nestes casos, os produtos comuns são rebites, pinos, parafusos, molas, bijuterias, artefatos para decoração ornamental, cartuchos para munição, refletores, dentre outros.

### **3.2. Processamento Mecânico (Conformação Mecânica)**

O objetivo da conformação mecânica é mudar a forma de um objeto mediante a aplicação de esforços mecânicos com ou sem o auxílio do aquecimento do material acima da temperatura necessária ao aparecimento de grãos novos (temperatura de recristalização).

Os esforços mecânicos adotados nas diversas operações de conformação mecânica provocam a orientação cristalográfica dos materiais, provocando o aparecimento de uma orientação preferencial que pode ser identificada por técnicas de análise microestrutural. Além dessa orientação, que depende da quantidade e do tipo de esforço mecânico aplicados ao material, verifica-se, junto com a prática de ciclos de aquecimento e de resfriamento controlados, a redução do tamanho de grão, o qual pode ser modificado caso o material seja aquecido durante a etapa de processamento. Por outro lado, caso o material seja mantido em temperaturas baixas após a conformação, o grão permanecerá do mesmo tamanho (MOORE, 1981)



Segundo CAMPOS apud GARCIA (2008), a classificação dos processos de conformação dos metais pode ser representada de acordo com o exposto na figura 3.2.

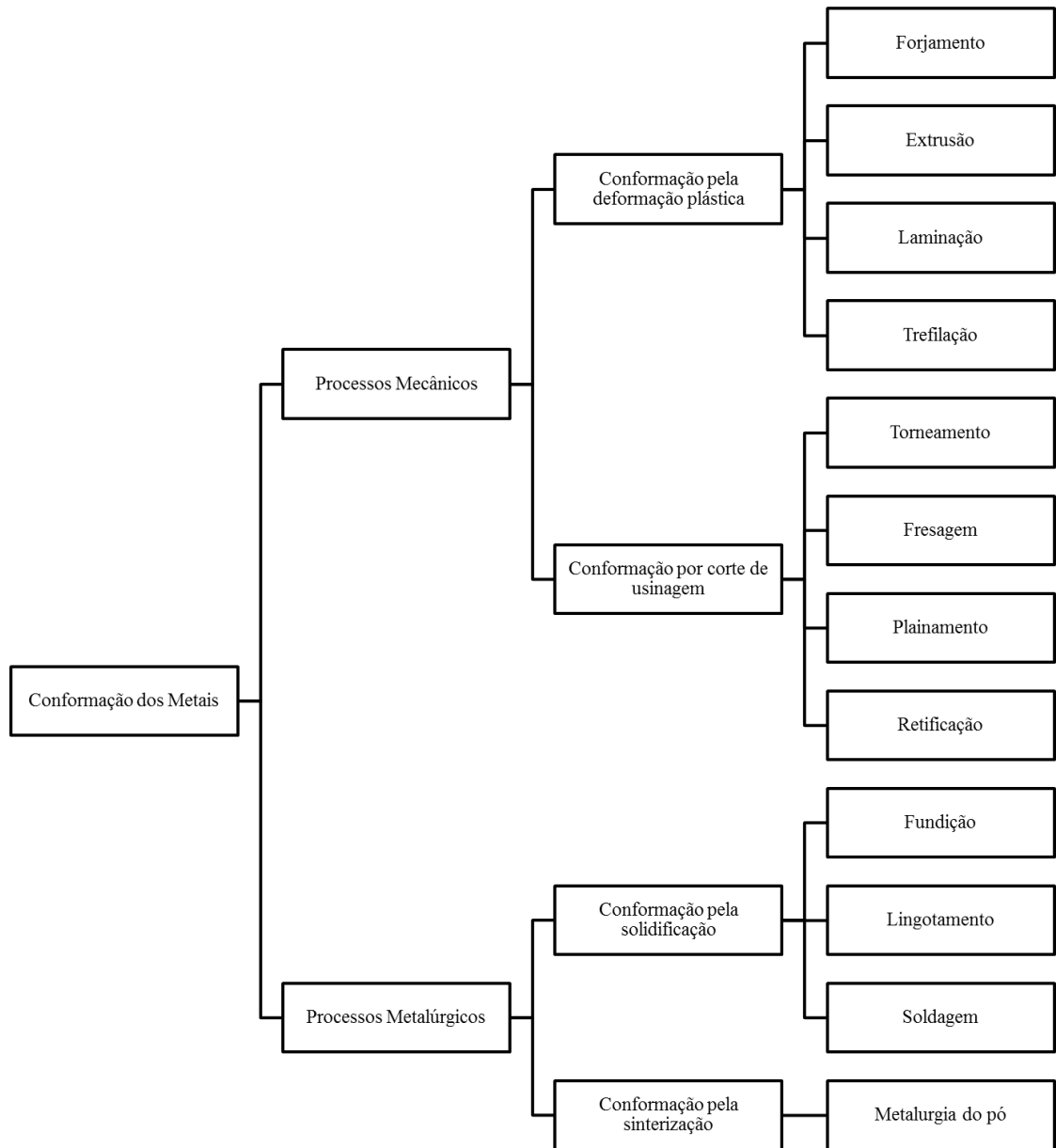


Figura 3.2- Fluxograma dos tipos de conformação dos metais.

Os processos mecânicos são caracterizados pela aplicação de esforço mecânico (carga) em uma área específica (tensão). Desta forma, quando a tensão aplicada é menor que a tensão limite de resistência à tração do material, tem-se a conformação por deformação plástica. Caso contrário, tem-se a conformação por corte (usinagem). Já os processos metalúrgicos são caracterizados pelo aquecimento do material acima da temperatura de recristalização do referido material.

Se a temperatura de aquecimento do material for maior que a temperatura de fusão, tem-se a conformação por solidificação e sendo esta temperatura menor, tem-se a conformação por sinterização (GARCIA, 2008).

Outra classificação dos processos de conformação é apresentada por DIETER *apud* SILVA 2010, que considera as forças que são aplicadas durante a deformação plástica do material. Neste caso, cinco grupos de processos são reconhecidos:

- a) Processos de compressão direta;
- b) Processos de compressão indireta;
- c) Processos de tensão;
- d) Processos de dobramento e
- e) Processos de cisalhamento.

Como exemplo, nos processos de compressão direta, a força é aplicada na superfície e o metal é deformado na direção perpendicular à usada para a aplicação da força, assim como ocorre no forjamento e na laminação. Na compressão indireta, a força que atua diretamente sobre o material é de tração, mas este se deforma por compressão em pelo menos uma das direções principais. Como exemplo de compressão indireta cita-se a trefilação, a extrusão e o embutimento (SILVA, 2010).

Já os processos de tensão são aqueles que a força atuante é de tração e a deformação gerada é linear, como consequência direta da aplicação desta força.

Nos processos de dobramento as tensões observadas são de tração e de compressão. Observa-se ainda a existência de uma região em que a tensão atuante é nula, a linha neutra.

A linha neutra é a transição de tensões de tração e de compressão. As tensões são simétricas em relação à linha neutra e nesta há apenas deformação elástica. Nas demais áreas verificam-se a ocorrência de deformação plástica e elástica. Esta situação está registrada, como exemplo, na figura 3.3(g), em que se observa a presença de tração na parte externa e compressão na região interna.

Arames, barras e chapas são exemplos de peças que podem ser dobradas, desde que o material apresente capacidade para suportar a quantidade requerida para a deformação plástica necessária à obtenção destes produtos. Alguns problemas do dobramento são a variação da secção, mudança de espessura da peça e o retorno elástico.

Quando o material exhibe retorno elástico ou elastoplástico pequeno (como por exemplo, quando possui módulo de elasticidade pequeno quando comparado com média de outros materiais), a deformação elástica/plástica subsequente também será pequena, mas de qualquer modo, não desejada. Assim, é comum executar o dobramento com raio de dobramento menor. (SCHAEFFER, 2004)

No processo de cisalhamento, a força é de tração e precisa atuar na forma de pares de forças paralelas de sentido oposto, uma em relação à outra.

Na figura 3.3 é possível observar as forças atuantes em cada processo pela indicação das setas.

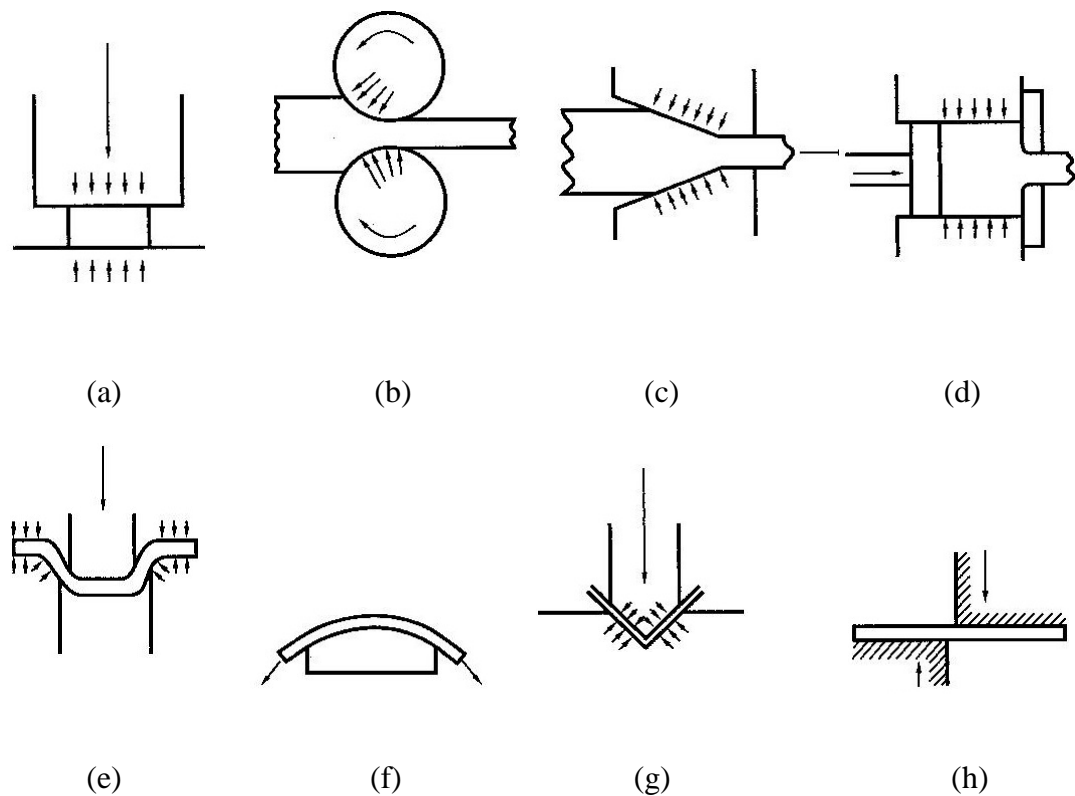


Figura 3.3- Descrição do esquema de forças atuantes durante os principais processos de conformação mecânica- a) forjamento, b) laminação, c) trefilação, d) extrusão, e) embutimento, f) estiramento, g) dobramento e h) corte por cisalhamento (SILVA, 2010).

Na figura 3.4 observa-se a variação da deformação com a direção a partir do esquema de uma folha de borracha com quatro quadrados desenhados em diferentes inclinações. Na figura 3.4(a) a tensão aplicada na placa de borracha é perpendicular ao quadrado e por isso, a deformação do quadrado é linear. Já nas demais situações, devido à inclinação do quadrado, a deformação ocorre por cisalhamento.

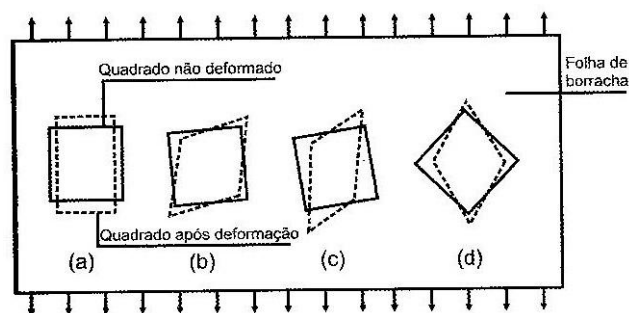


Figura 3.4- Ilustração da variação da deformação com a direção (CETLIN, 2005).

Neste caso, verifica-se que a direção em que o esforço mecânico é aplicado influencia a resposta do material, em termos da forma assumida pelo mesmo. Este conceito é conhecido como sendo o efeito do caminho ou da trajetória de deformação nas condições de conformação dos diferentes tipos de materiais. (SAKHAROVA *et al.*, 2009)

Com relação às características e propriedades finais do produto, a temperatura em que a operação de conformação ocorre afeta as respostas apresentadas pelo material. Neste caso, a divisão clássica adotada pela literatura é dividir os processos em trabalho ou conformação a quente e em trabalho ou conformação a frio.

### **3.2.1. Trabalho ou conformação mecânica a quente**

O trabalho ou conformação mecânica a quente é aquele em que a energia armazenada durante o processo de deformação é dissipada em fenômenos de recuperação ou de recristalização (COLPAERT, 2008). Desta forma, a temperatura e a taxa de deformação aplicadas ao material permitem que este sofra simultaneamente, duas das etapas do tratamento térmico de recozimento, isto é, a recuperação e a recristalização (SILVA, 2010). Estes temas serão discutidos nos próximos itens deste trabalho.

Pelo fato de a temperatura de trabalho utilizada na conformação a quente estar acima da temperatura de recristalização, a resistência mecânica do material reduz, necessitando assim, de um valor de potência menor para ativar os motores responsáveis pelo acionamento mecânico de componentes de máquinas utilizadas para as diferentes operações de conformação mecânica. Esse fato ocasiona a economia de energia para a empresa que fabrica produtos conformados, reduzindo o custo do produto (COLPAERT, 2008).

O trabalho a quente é geralmente o primeiro processo de conformação de lingotes de aços e de outras ligas, justamente por reduzir a resistência mecânica e assim, diminuir a energia mínima para a deformação plástica do material, além de aumentar a ductilidade deste para as próximas etapas de conformação. Outra vantagem do trabalho a quente é a redução da heterogeneidade, em termos da composição química do lingote, pelo fato de que, em temperatura elevada, a taxa de difusão é maior (SILVA, 2010).

Um dos defeitos mais comuns em conformação a quente é o aparecimento de trincas, de dobras e um superaquecimento do material. Esse aquecimento conduzido acima dos limites conhecidos ou previstos ocorrerá quando a temperatura de trabalho ocasionar a fusão na região do contorno de grão. Neste caso, a fusão, juntamente com a oxidação no mesmo local, gera sucata, uma vez que o processo é irreversível (COLPAERT, 2008).

### **3.2.2. Trabalho ou conformação mecânica a frio**

A conformação mecânica a frio é aquela em que a energia armazenada durante o processo de deformação não é dissipada em fenômenos de recuperação ou de recristalização. Embora o material também experimente perda da energia entregue ao mesmo, como o aquecimento (COLPAERT, 2008).

Durante o trabalho a frio, cerca de 95% da energia aplicada são transformados em calor e o restante fica retido no material como defeitos, como por exemplo, o aumento da densidade de discordâncias, provocando, dentre outros efeitos, o endurecimento do material pelo fenômeno do encruamento.

Pelo fato de toda discordância estar associada a tensões residuais que por sua vez aumentam o valor de entalpia, o material fica termodinamicamente instável, fazendo com que o aumento da temperatura seja capaz de rearranjar as discordâncias para que elas possam reduzir as tensões residuais e assim reduzir a entalpia do material (TOTTEN, 2006).

A figura 3.5 ilustra as principais mudanças ocorridas nas propriedades dos materiais com o acréscimo da quantidade de trabalho a frio (em termos percentuais).

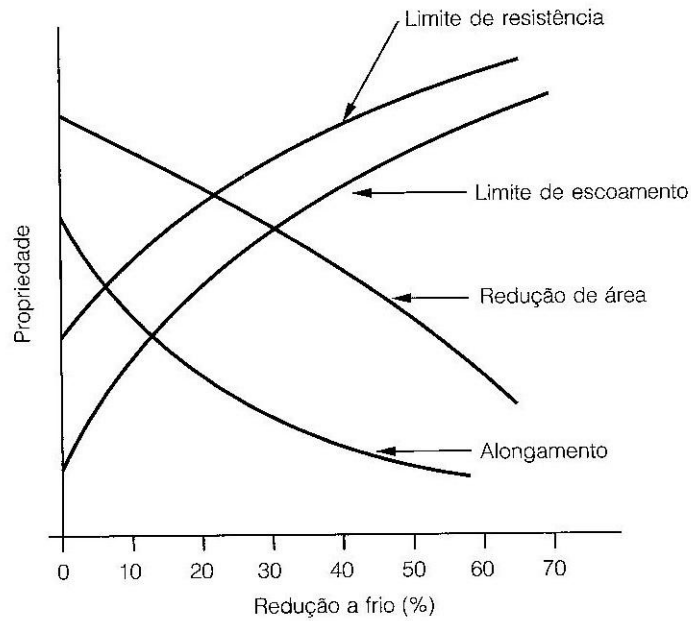


Figura 3.5- Gráfico de propriedades mecânicas versus redução a frio (SILVA, 2010).

Para exemplificar as mudanças ocorridas em um material trabalhado a frio, a figura 3.6 relaciona o trabalho a frio com a tensão limite de escoamento, com a tensão limite de resistência à tração e com a ductilidade do latão, do aço SAE 1040 e do cobre.

Nota-se que o encruamento ocasionado pela deformação plástica a frio do material reduz a ductilidade e aumenta a resistência mecânica, sendo essa expressa pelo aumento da tensão limite de escoamento e da tensão limite de resistência à tração.

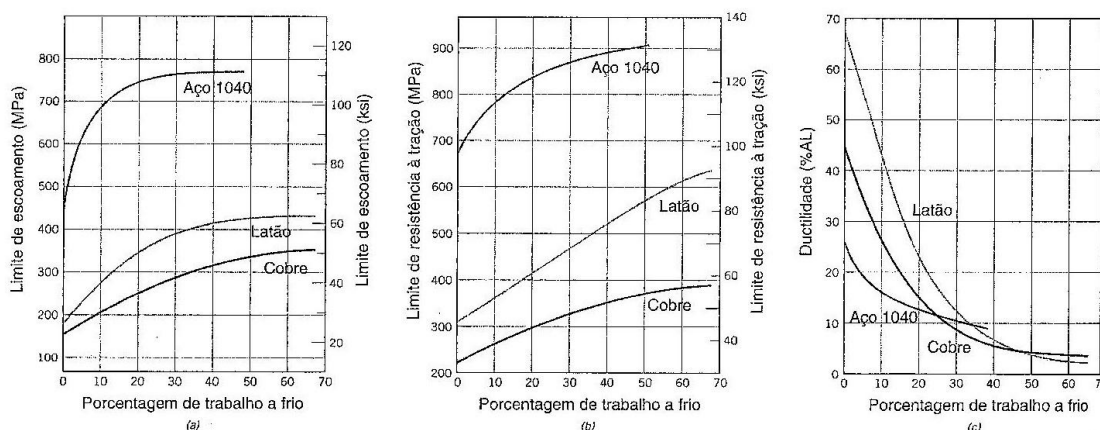


Figura 3.6- Gráficos do trabalho a frio versus tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência à tração e ductilidade para o latão, o aço SAE 1040 e o cobre (CALLISTER, 2008).

### **3.3. Reozimento**

O tratamento térmico de reozimento, segundo Colpaert (2008), visa “restituir aos materiais propriedades alteradas por um tratamento mecânico ou térmico anterior; refinar e/ou homogeneizar estruturas brutas de fusão”.

O reozimento consegue reduzir a dureza do material previamente encruado, além de aliviar tensões residuais, facilitar a retirada de material (usinabilidade) e aumentar o limite de deformação plástica do material antes do início do processo de instabilidade plástica.

As etapas deste tratamento térmico incluem o aquecimento do forno até uma temperatura que depende da composição química do material, a inserção do material a ser reozido no forno, a manutenção do material dentro do forno por um intervalo de tempo que considera as dimensões da amostra e, em seguida, o forno é desligado para que o resfriamento da peça ocorra lentamente, dentro do próprio forno.

Diversos tipos de reozimento são realizados, com variações nos resultados. Neste caso, cita-se o reozimento por esferoidização, o reozimento para alívio de tensões, o reozimento para homogeneização e o reozimento para a recristalização (COLPAERT, 2008).

De acordo com o tipo de reozimento, fenômenos diferentes e subsequentes são observados como a recuperação, a recristalização e o crescimento de grão, os quais serão apresentados a seguir.

#### **3.3.1. Recuperação**

A recuperação é um processo que ocorre em materiais trabalhados a frio e não modifica a microestrutura do material, embora as propriedades físicas do mesmo possam sofrer modificação (as propriedades elétricas, por exemplo, recuperam as condições existentes antes do processamento mecânico). Contudo, para que esta condição do material seja observada é necessária a ativação térmica do material, antes, porém, da ocorrência da recristalização.



A temperatura necessária para ativar termicamente a recuperação de um material é maior quanto menor for a quantidade de trabalho a frio aplicada previamente ao mesmo. Como a temperatura de recristalização também é menor com o aumento da intensidade do trabalho do frio tem-se uma relação entre temperatura de recuperação e temperatura de recristalização (TOTTEN, 2006). A recuperação dos latões, de modo geral, é observada a 300°C (COUTINHO, 1924).

A recuperação é caracterizada por um rearranjo interno das discordâncias no metal aliviando as tensões sem alterar as propriedades mecânicas do material. Este rearranjo acontece porque as discordâncias são capazes de se difundir, ou seja, se movimentar. Neste caso, observa-se a movimentação das linhas de discordância, detectando-se a poligonização e o aniquilamento das mesmas.

O aniquilamento das discordâncias ocorre quando duas discordâncias de sinais opostos se encontram, aliviando assim, as tensões residuais do material. Contudo, o aniquilamento das discordâncias não é tão comum quanto o fenômeno de poligonização.

A organização das discordâncias em posições tais em que os campos de tensões gerados pela presença das mesmas se equilibram mutuamente é denominado de poligonização. Um exemplo de poligonização é observado quando o campo de tensão de tração de uma discordância se posiciona próximo ao campo de tensão de compressão de outra discordância, ocasionando o alívio de tensões. A figura 3.7 exibe um esquema do arranjo subestrutural para o fenômeno de poligonização das discordâncias.

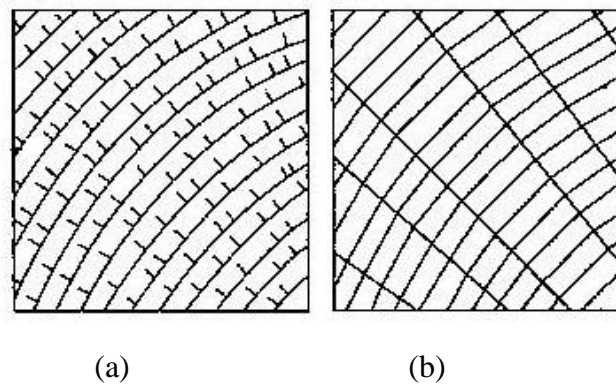


Figura 3.7- Esquemas do arranjo das discordâncias- (a) discordâncias em material encruado e (b) discordâncias organizadas após a poligonização (TOTTEN, 2006).

### 3.3.2. Recristalização e crescimento de grão

De acordo com DOHERTY (1997), “recristalização é a formação de uma estrutura nova de grãos de um material deformado a partir da formação e migração de contornos de grão de alto ângulo devido à energia armazenada na deformação”. Neste caso, quando o arranjo dos grãos apresenta variação angular situada entre  $10^\circ$  a  $15^\circ$ , os chamados contornos de grão são classificados como sendo de alto ângulo, conforme identificado pela figura 3.8.

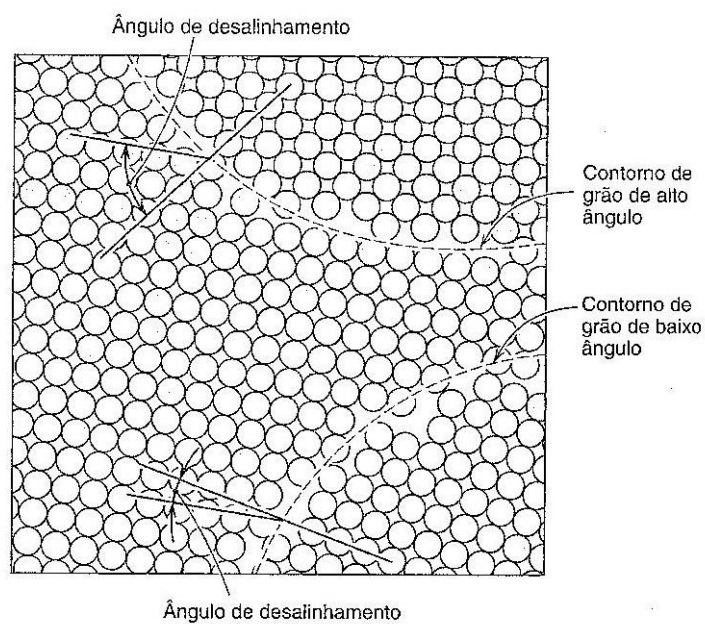


Figura 3.8- Ilustração de contornos de alto e baixo ângulo (CALLISTER, 2008).

Szapo (2011) define que um grão está no estado recristalizado quando a diferença de orientação entre pontos vizinhos do grão é menor que  $1^\circ$ . Nos demais casos, o grão continua no estado deformado.

De modo geral, quando a recristalização ocorre na temperatura de até 40% do valor da temperatura de fusão do material, em média, dois terços dos contornos de grão formados são de alto ângulo. Neste caso, a recristalização, é observada após a deformação plástica do material, denominada assim de recristalização estática.

Quando a recristalização é detectada acima de aproximadamente 40% da temperatura de fusão do material e de modo concomitante à deformação deste, tem-se a recristalização dinâmica, situação em que todos os grãos tendem a ser de alto ângulo (TOTTEN, 2006).

Na figura 3.9, tem-se um esquema da recristalização dinâmica ocorrendo durante a deformação e também da recristalização estática após a deformação plástica do material.

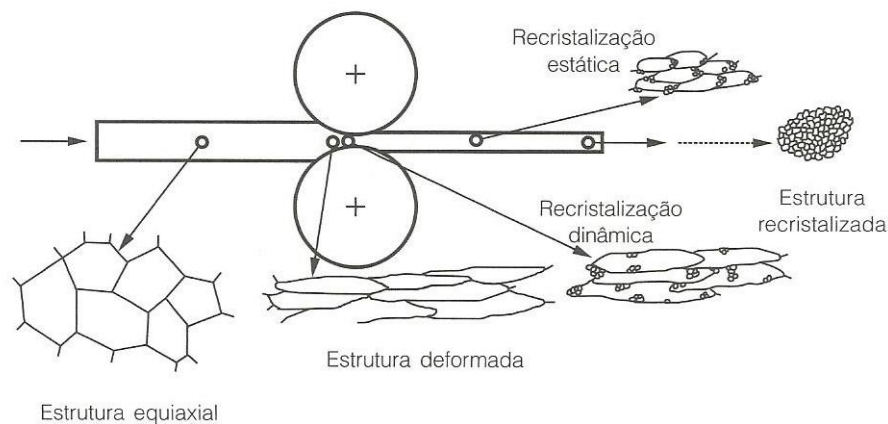


Figura 3.9- Ilustração da recristalização dinâmica e da recristalização estática (SILVA, 2010).

A recristalização estática ocorre em duas etapas. Na primeira, o material é deformado e pequenos subgrãos surgem na matriz deformada com a mesma orientação da matriz. A deformação prévia do grão é necessária para que se tenha energia armazenada para que os contornos de grão de alto ângulo possam se difundir quando a temperatura de recristalização for alcançada. A segunda etapa ocorre quando se atinge a temperatura ótima para que este subgrão cresça e se transforme em grão. (DOHERTY, 1997).

A temperatura ótima, ou temperatura de recristalização, é aquela em que há a formação de grãos novos sem a necessidade de trabalho a frio anterior. Por definição, a temperatura de recristalização é aquela em que o material trabalhado a frio se encontra completamente recristalizado em um intervalo de tempo de uma hora.

Em metais puros, tem-se que a temperatura de recristalização é de aproximadamente 40% da temperatura de fusão conforme se verifica na figura 3.10 (TOTTEN, 2006).

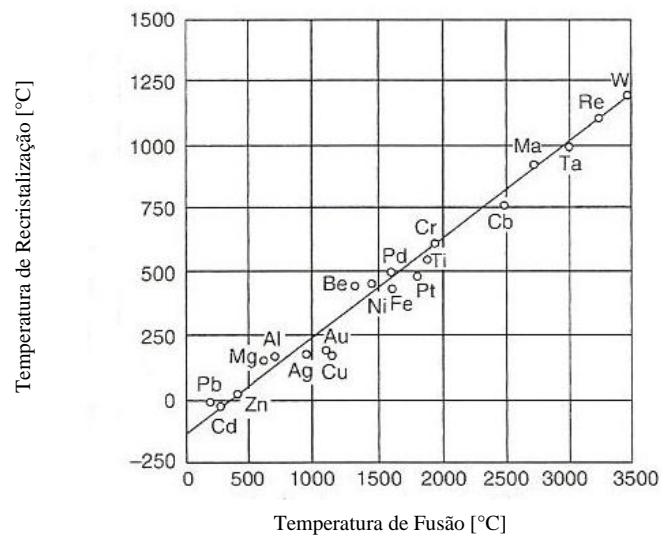


Figura 3.10- Gráfico da temperatura de recristalização versus a temperatura de fusão de alguns metais puros (TOTTEN, 2006).

A quantidade de trabalho a frio sofrida pelo material antes da recristalização vai influenciar na temperatura de recristalização. Para ilustrar este fenômeno, a figura 3.11 mostra um gráfico de porcentagem de trabalho a frio versus temperatura de recristalização para o ferro.

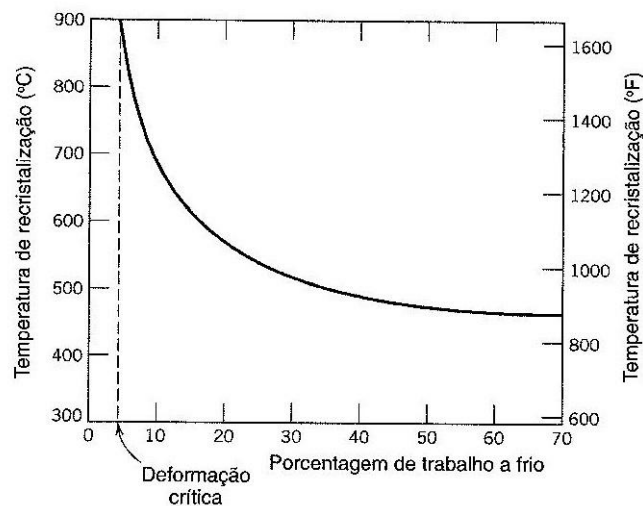


Figura 3.11- Decréscimo da temperatura de recristalização do ferro com o aumento do trabalho a frio (CALLISTER, 2008).

Um subgrão somente se transformará em um grão novo se ele tiver energia suficiente e alta orientação. Esta transformação do subgrão em grão é denominada nucleação. É por este motivo que a recristalização não é um processo que ocorre em qualquer temperatura e que a aplicação de uma quantidade de energia prévia, como aquela representada pela deformação plástica do material, colocando o subgrão orientado de acordo com a matriz deformada (DOHERTY, 1997).

A nucleação não ocorre no momento em que a temperatura de recristalização é alcançada, há necessidade de um intervalo de tempo para que o material esteja adequado a esta condição de transformação, tempo este denominado de tempo de incubação (SILVA FILHO, 2009).

Na figura 3.12 tem-se um esquema da formação de grãos novos e do crescimento destes durante o processo de recristalização em função do tempo de recozimento. Pode-se observar que no tempo  $t_1$  a nucleação é preferencial em contornos de grão e no tempo  $t_2$  nota-se o crescimento dos grãos previamente formados e o aparecimento de grãos novos. Em  $t_4$ , já é possível observar o bloqueio do crescimento de grãos pelo encontro dos contornos de grão, e, na medida em que o crescimento vai acontecendo, os grãos novos ocupam todo o espaço anteriormente ocupado pela matriz deformada, como mostrado pelo esquema da figura 3.12 para o tempo  $t_6$ .

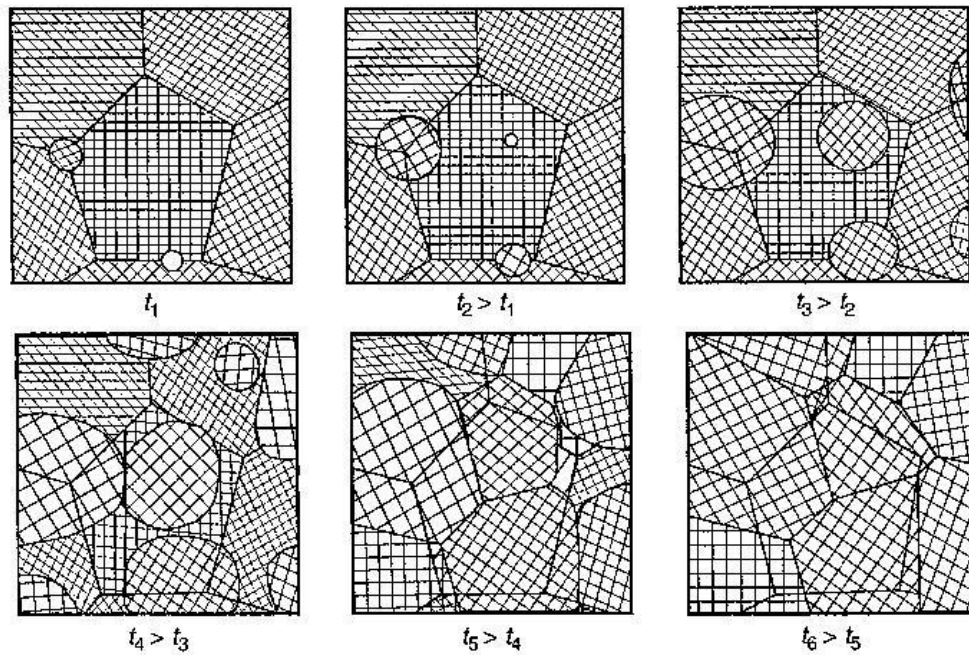


Figura 3.12- Ilustração do avanço da recristalização em tempo crescente (TOTTEN, 2006).

De forma similar, pode-se observar na figura 3.13 fotomicrografias da recristalização e do crescimento de grão do latão. Na Figura 3.13(a) tem-se o latão encruado por um trabalho a frio de 33% de deformação. Na Figura 3.13(b) tem-se 3 segundos em 580°C e assim as primeiras nucleações surgem, sendo reconhecidos pelos pequenos grãos formados. A Figura 3.13(c) mostra o estado do latão após 1 segundo ao mostrado pela Figura 3.13(b) ter sido feita, notando-se o aumento de grãos recristalizados neste tempo. Com 8 segundos na temperatura de 580°C tem-se o latão completamente recristalizado, como pode ser observado na Figura 3.13(d).

A figura 3.13(e) mostra o crescimento de grão gerado com 15 minutos em 580°. Por fim, a figura 3.13(f) é o mesmo material recristalizado a 700°C durante 10 minutos no interior do forno.

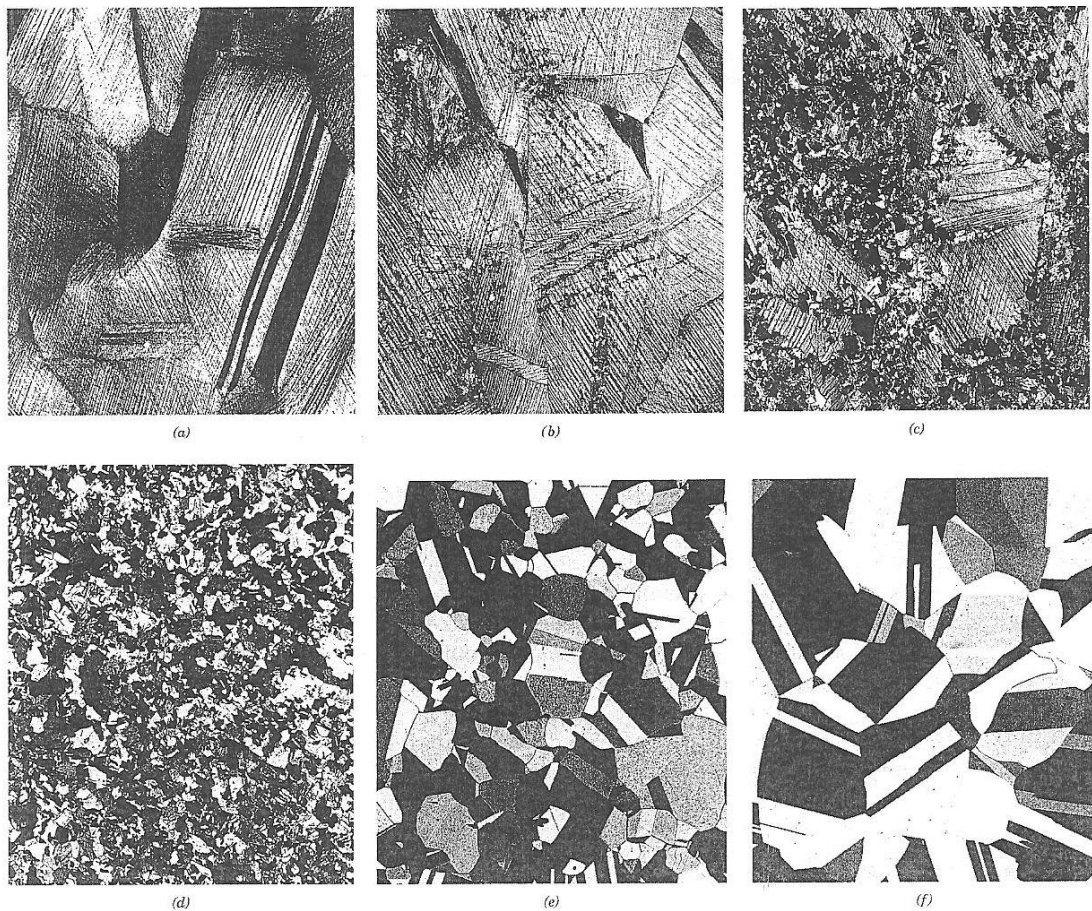


Figura 3.13- Fotomicrografias do latão encruado e em diferentes estágios de recristalização. (CALLISTER, 2008)

A recristalização é um processo difusional e por isso ocorre mediante o controle do tempo e da temperatura, os quais influenciam a taxa de difusão do material. A partir da temperatura de recristalização, já se observa o fenômeno, mas com o aumento desta temperatura acelera-se o processo, reduzindo o tempo de incubação. Com o aumento do tempo em que o material fica na temperatura de recristalização (tempo de encharque), o grão poderá experimentar a próxima etapa do tratamento térmico de recozimento, o crescimento do tamanho de grão.

A temperatura em que ocorre a recristalização é conhecida como temperatura de recristalização e cada material tem a sua própria temperatura de recristalização, sendo a mesma influenciada pela intensidade do trabalho a frio realizado no material antes da recristalização e pela microestrutura inicial do mesmo. Quanto menor o grão da matriz deformada, mais área de contorno de grão existirá e, portanto, maior o sítio de nucleação,

favorecendo assim o surgimento de subgrãos. Na figura 3.14 é possível observar a redução da temperatura de recristalização com o aumento da quantidade de deformação plástica a frio do ferro  $\alpha$  (ferrita) e também do ferro  $\gamma$  (austenita) (TOTTEN, 2006).

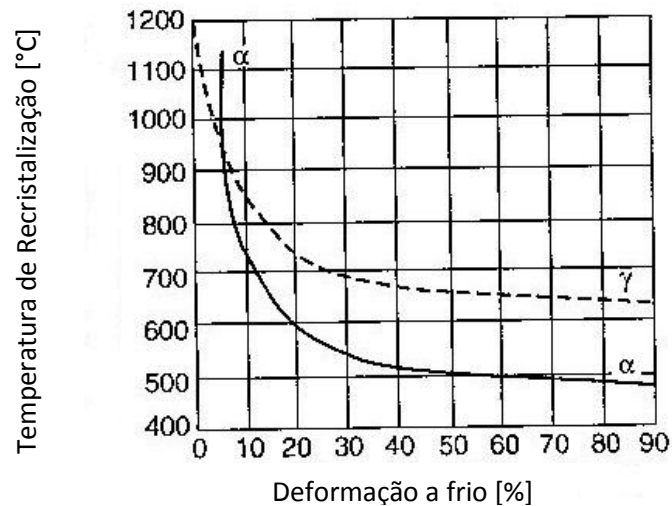


Figura 3.14- Temperatura de recristalização do ferro  $\alpha$  e do ferro  $\gamma$  em função da deformação a frio em termos percentuais, % (TOTTEN, 2006).

Para definir a temperatura de recristalização de um determinado material existem diversos procedimentos. Colpaert (2008) considera que a temperatura de recristalização é igual à metade da temperatura de fusão do material. Essa aproximação, embora seja usual é ampla e não é capaz de atender a todos os grupos de materiais, por isso não será usada neste trabalho.

Neste trabalho, a temperatura que será adotada para o estudo da recristalização do latão CuZn34 será avaliada de modo indireto pela análise termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DTA). Essas técnicas de caracterização e a aplicação das mesmas serão detalhadas oportunamente, sendo a temperatura de recristalização determinada a partir da variação da massa da amostra escolhida para o ensaio.

Quando o objetivo é discriminar a temperatura de recristalização, a determinação do tamanho de grão constitui uma medida que registra a ocorrência desse fenômeno. Neste caso, diversas técnicas são usadas para efetuar o cálculo do tamanho de grão, dentre as quais se destaca o uso de normas, como a norma ASTM E112-10 em que se faz a contagem do número



de grãos contidos em uma área de 1 polegada quadrada de uma fotomicrografia com ampliação de 100 vezes; o método do intercepto médio em que o tamanho de grão consiste no valor da divisão entre o comprimento de linhas traçadas pelo número de interceptos que estas linhas fazem com os contornos de grão detectados em uma fotomicrografia; o método do cálculo do “diâmetro” nominal dos grãos, dentre outros (TOTTEN, 2006).

Ainda com relação à evolução do tamanho do grão de acordo com o fenômeno da recristalização, verifica-se que no trabalho a quente, a recristalização ocorre simultaneamente ao processo de conformação. Desta forma, tem-se a modificação do tamanho do grão (redução) e conseqüentemente, da microestrutura do material. A figura 3.15 mostra uma ilustração da mudança no tamanho do grão durante a recristalização dinâmica.

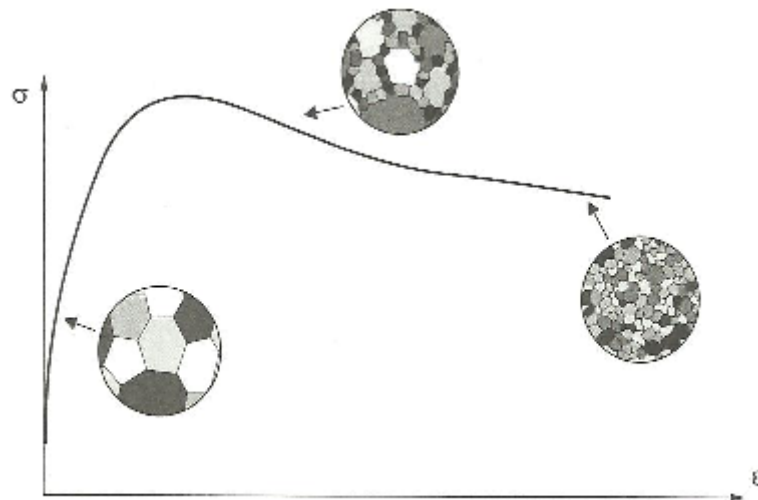


Figura 3.15- Gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ) durante a recristalização dinâmica (SILVA, 2010).

É importante observar que a recristalização modifica o comportamento mecânico do material porque os grãos novos estão livres de imperfeições (defeitos) do material previamente deformado. Assim, tem-se um material com propriedades mecânicas diferentes daquelas observadas antes da recristalização (SILVA FILHO, 2009).

### 3.4. O fenômeno da recristalização e as propriedades dos materiais

As duas propriedades que mais influenciam o comportamento mecânico dos materiais são o tamanho de grão e a estrutura do contorno de grão. Pode-se citar o aumento da tenacidade do material com a redução do tamanho de grão e o aumento da resistência à corrosão em materiais que apresentam estruturas especiais de contorno de grão (SZAPO, 2011).

Os materiais podem apresentar propriedades diferentes em função das condições e estado dos mesmos, como o arranjo microestrutural e a origem e a forma dos grãos novos ou recristalizados. Neste caso, a origem dos grãos novos é controlada pela forma de recristalização, isto é, pela recristalização estática ou dinâmica. Já a extensão do contorno de grão é controlada pelo tamanho deste. (TOTTEN, 2006)

Além de reduzir a dureza do material, a recristalização é importante para controlar o tamanho de grão. Em função do tempo de recristalização, o grão pode crescer ou diminuir (ficar mais refinado). Chama-se grão refinado, o grão que está pequeno, sendo isso indicado, por exemplo, pelo tamanho de grão número igual ou maior que 4 de acordo com a norma ASTM E112-10.

Como descrito, por esta norma, o número do tamanho de grão,  $n$ , é identificado pela razão do logaritmo do número de grãos contados em uma área de uma polegada quadrada a partir da observação de uma fotomicrografia com ampliação de 100 vezes,  $N$ , pelo logaritmo de 2, sendo o resultado desse cálculo somado de 1 unidade. Essa fórmula, equação 3.2, é o resultado da equação geral apresentada na equação 3.1.

$$N = 2^{n-1} \quad (3.1)$$

$$n = [\log (N) / \log (2)] + 1 \quad (3.2)$$

Softwares de análise de imagens também podem ser usados para determinar o tamanho médio dos grãos. Estes softwares determinam a área de cada grão e calculam o diâmetro do círculo que possui a mesma área. Para cada avaliação, pelo menos 500 grãos são incluídos o resultado final é estatístico (SZABO, 2011).

O tamanho de grão está relacionado com diversas propriedades mecânicas do material. Um mesmo material, com a mesma composição química e com a mesma geometria macroscópica apresentará propriedades diferentes se o tamanho de grão for diferente. Neste caso, como previsto pela teoria de *Hall-Petch* para condição de trabalho a frio, o material com granulometria fina apresentará resistência mecânica maior que o de granulometria grosseira, pois no primeiro caso, a obstrução à movimentação das linhas de discordâncias será maior.

Para metais como o ferro, o titânio, o cobalto e suas ligas, o grão pode ser controlado pela transformação de fase. Para as demais ligas, principalmente as ligas de cobre, níquel e alumínio, recristalizar após a deformação plástica é a única forma de controlar o tamanho de grão (DOHERTY, 1997).

Uma diferença entre a transformação de fase e a recristalização é que a primeira não mantém a orientação entre a fase inicial e final. Já a recristalização mantém a orientação do material conformado no material recristalizado (DOHERTY, 1997).

A ductilidade aumenta com a recristalização. O material, ao se recristalizar, forma grãos isentos de defeitos, facilitando assim, a movimentação das linhas de discordâncias. Com isso, a ductilidade do material aumenta, facilitando assim, a deformação plástica do material.

Considerando o material encruado antes de sofrer a recristalização, observa-se a redução da dureza após a recristalização, uma vez que a densidade de discordâncias, responsáveis pelo aumento da dureza, diminuirá após a conclusão da recristalização.

Na figura 3.16 verifica-se a redução da dureza durante a recristalização de um aço com 0,03% (teor em peso) de carbono. O tracejado **a** identifica o início da nucleação e o **b**, o fim da nucleação.

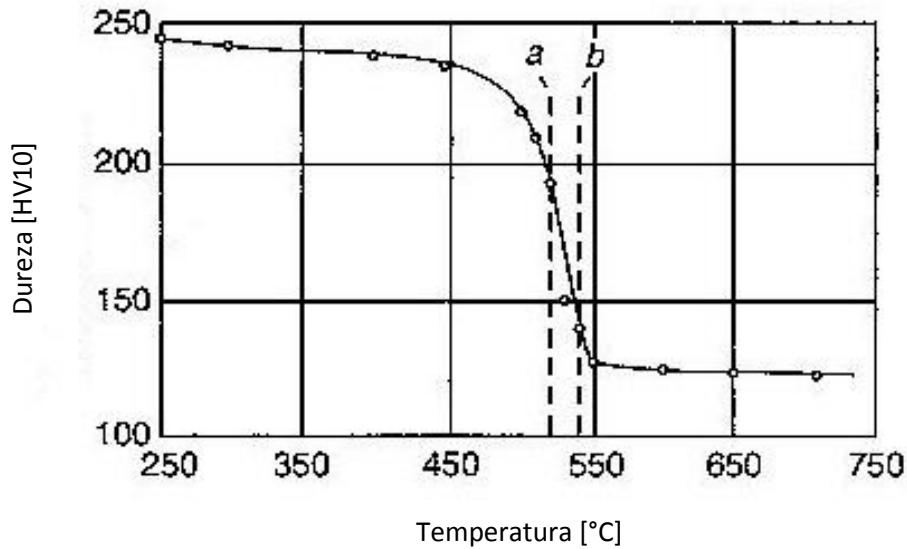


Figura 3.16- Redução da dureza durante a recristalização de um aço com 0,03% de carbono (TOTTEN, 2006).

Considerando apenas o tamanho do grão, tem-se que quanto menor o tamanho do grão, menor também será a dureza e a resistência mecânica e maior a tenacidade de um material. A recristalização também modifica as orientações cristalográficas dos grãos, além de alterar o tamanho e morfologia dos mesmos.

Neste caso, a orientação do grão pode ser determinada pela técnica de difração de elétrons retroespalhados, sigla EBSD traduzida do inglês *electron back scattering diffraction* (SZABO, 2011). A orientação cristalográfica, também conhecida como textura, pode gerar propriedades elétricas e magnéticas de aplicações já conhecidas, como por exemplo, os aços ao silício (aços elétricos) usados em transformadores (LOW, 2006).

O aço elétrico usado em transformadores elétricos possui uma orientação cristalográfica específica, denominada orientação ou textura de *Goss*. Esta orientação é formada pelo crescimento anormal dos grãos a partir da matriz recristalizada, sendo um dos motivos das propriedades elétricas diferenciadas deste grupo de aços (ALCÂNTARA, 2006).

A orientação cristalográfica do aço elétrico de grão orientado (GO) está alinhada com o eixo do transformador, exibindo nesta condição, propriedades eletromagnéticas diferenciadas (CASTRO, 2006).

O aço elétrico também sofre influencia da direção de laminação. De acordo com a direção de laminação, o encruamento pode ser maior e com isso o tamanho do grão recristalizado será menor. Este fato significa que houve acúmulo maior de energia durante a deformação na direção de laminação, direção em que se observou, por exemplo, encruamento maior (CASTRO, 2006).

### 3.5. Cinética de recristalização

A cinética de recristalização é o estudo do comportamento do material durante o processo de recristalização. A partir do conhecimento da evolução da taxa de aparecimento de grãos novos, é possível estabelecer um item de controle das propriedades desejadas de um material que são sensíveis à variação do tamanho de grão à medida que o mesmo é produzido.

A cinética de recristalização afeta também a textura cristalográfica do material, gerando consequências nas propriedades magnéticas em aços elétricos não orientados, por exemplo. Sendo dessa forma, fundamental o entendimento desta cinética para produção destes tipos de aços (SIDOR, 2005).

Existem diversos modelos usados para representar a cinética de recristalização dos materiais como os métodos de Johnson, Mehl, Avrami e Kolmogorov. Como exemplo, observa-se que, de modo geral, a modelagem analítica da cinética global de recristalização de um material utiliza a equação de Avrami (SILVA FILHO, 2009) apresentada na equação 3.3.

$$V_x = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (3.3)$$

Nesta equação tem-se que:

$V_x$  = fração recristalizada do material (Varia de 0 a 1 ou de 0 a 100%);

$K$  = constante referente à taxa de nucleação;

$n$  = constante que relaciona a dependência do tempo com a taxa de nucleação e crescimento e

$t$  = tempo.

Durante um recozimento para recristalização, pode-se identificar o avanço da recristalização pelo volume de grãos recristalizados em função do logaritmo do tempo. Deste modo, consegue-se avaliar o tempo de incubação necessário ao início da deformação, assim como as variações da taxa de recristalização. (HUMPHREYS, 2004)

Na figura 3.17, quatro fases são observadas durante a recristalização de um material. Na fase 1, o material não começou a recristalizar, este tempo é denominado tempo de incubação. Nas demais fases, o material já está recristalizando, porém em taxas diferentes. Na fase 2, a taxa de recristalização é crescente, na fase 3 a taxa é linear e na fase 4 a taxa é decrescente. A redução da taxa na fase 4 é explicada pelo fato de que, termodinamicamente, o material está se aproximando do seu equilíbrio e com isso a força motriz, ou seja, a energia armazenada, não é suficiente para que a recristalização continue com a mesma intensidade.

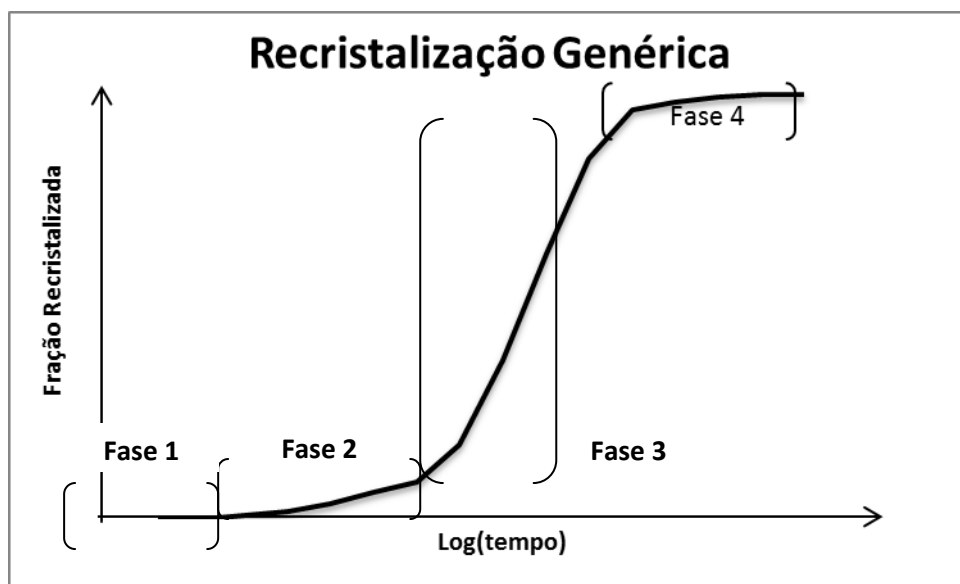


Figura 3.17- Simulação da cinética de recristalização.

A cinética de recristalização é influenciada pela deformação, pois o aumento da deformação plástica reduz o tamanho do subgrão, aumentando assim, a taxa de crescimento do grão. O tamanho de grão inicial também influencia a cinética de recristalização, porém este efeito diminui com o acréscimo da deformação plástica. A orientação do grão é outro fator que influencia na cinética de recristalização (CHEN, 2004).

O interesse de se conhecer o efeito da deformação na cinética de recristalização dos materiais tem, dentre outros objetivos, o monitoramento do tamanho de grão formado e com isso, o controle das propriedades mecânicas relacionadas com o tamanho de grão.

Sidor (2005) verificou que os grãos de materiais deformados apresentam maior mobilidade do que grãos de materiais não deformados em aços elétricos não orientados quando em tratamento de recozimento para a recristalização.

Ainda com relação à cinética de recristalização, Bartolomé (2002) verificou em uma microliga de nióbio que a deformação reversa aplicada modifica a cinética de recristalização estática deste material. Neste estudo, a liga de nióbio foi deformada (em tração e em compressão) de 0,25 (deformação efetiva) sem reversão (+0,25), de 0,25 com reversão completa (+0,25; -0,25) e de 0,25 com reversão de 0,10 (+0,25; -0,10). Percebeu-se que a fração recristalizada foi influenciada pela condição de pré-deformação anterior, conforme indicado pela figura 3.18.

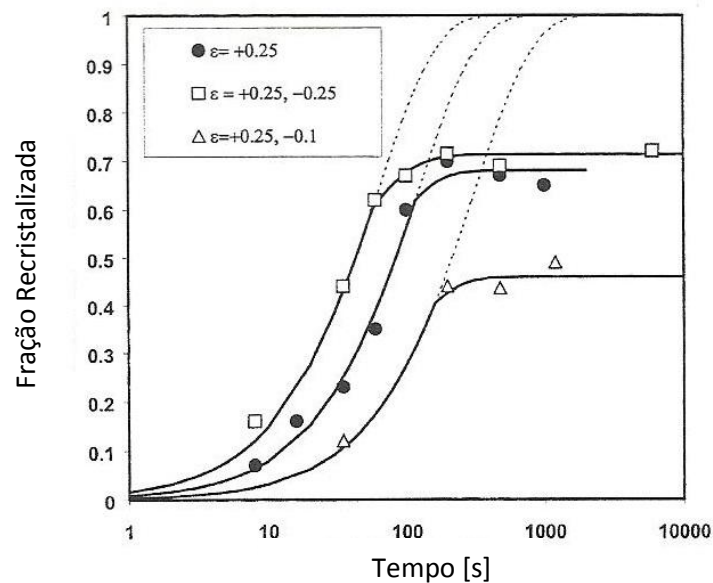


Figura 3.18- Fração da recristalização estática versus o tempo em diferentes situações de trabalho a frio em uma liga de nióbio (BARTOLOMÉ, 2002).

### 3.6. Reozimento para recristalização

O recozimento para recristalização é conduzido em materiais trabalhados a frio para modificar a estrutura e para regenerar as propriedades destes sem transformação de fase em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização. Para que isso seja possível, a deformação precisa ser suficiente para produzir subgrãos que causarão a nucleação de grãos novos (TOTTEN, 2006).

Os parâmetros mais importantes do recozimento para recristalização que influenciam a taxa de recristalização e as propriedades do material após o processo de recristalização são a composição química do material, a estrutura inicial do mesmo, a temperatura de recozimento, o tempo de recozimento, a taxa de aquecimento e a taxa de resfriamento (TOTTEN, 2006).

Verifica-se ainda, com o auxílio da figura 3.19, que quanto maior a temperatura de recozimento para recristalização, menor será o tempo necessário para que ocorra a recristalização. Neste caso, a curva *a* refere-se ao início da recristalização e a curva *b* o final da recristalização.

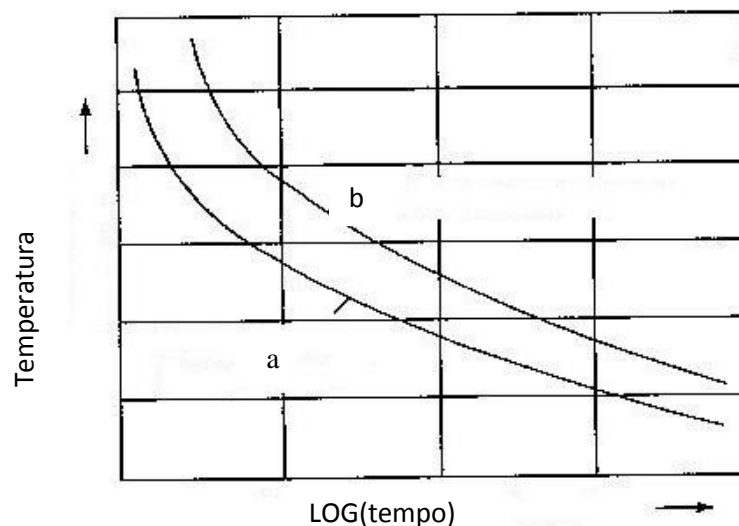


Figura 3.19- Gráfico isotérmico genérico sobre a temperatura em função do logaritmo do tempo na recristalização (TOTTEN, 2006).



Na figura 3.20 pode-se observar a influência da temperatura de recozimento na ductilidade e no limite de resistência à tração para uma liga de latão. O tamanho de grão também está ilustrado de forma esquemática além da forma gráfica.

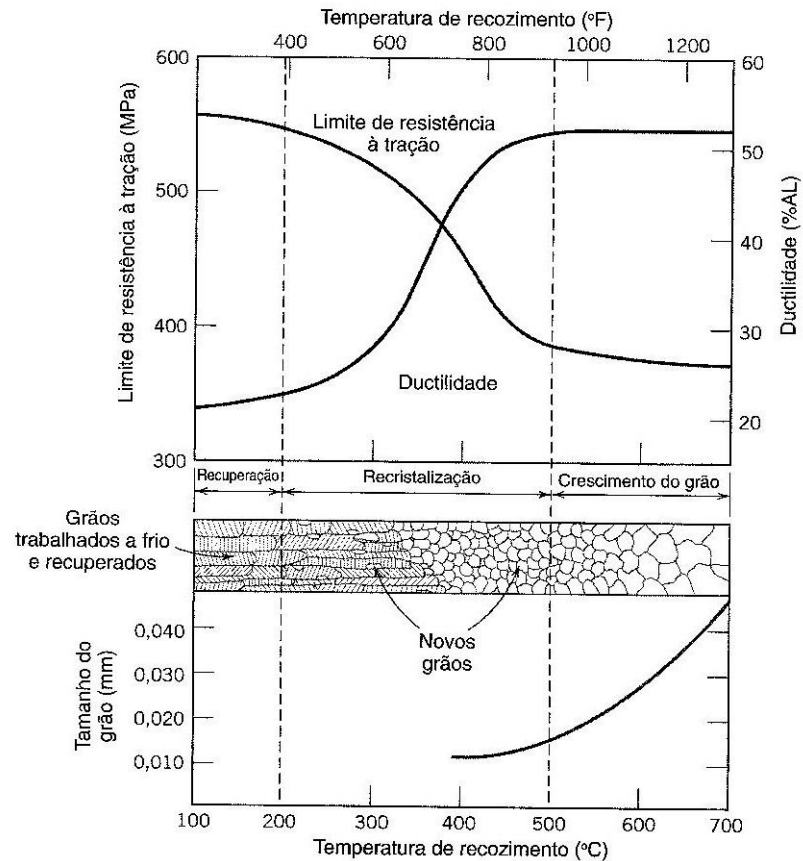


Figura 3.20- Tamanho de grão, ductilidade e limite de resistência à tração em função da temperatura de recozimento. (CALLISTER, 2008)

Os latões são recozidos para recristalização por uma hora e meia em uma determinada temperatura que pode variar entre 520°C até 720°C de acordo com Coutinho (1924). Já Chiaverini (2003) afirma que a faixa de temperatura para a recristalização situa-se entre 425°C e 750°C, sendo a mesma escolhida em função da condição prévia do material.

### 3.7. Caracterização de Materiais

#### 3.7.1. Caracterização Mecânica

Para descrever as respostas de um material para diferentes condições de sollicitação expostas ao mesmo torna-se necessária a realização de ensaios de modo a aplicar tais condições e com auxílio de instrumentos adequados, acompanhar o comportamento de um material em função das condições do meio. Neste caso, o ensaio de tração uniaxial é uma técnica de caracterização mecânica muito comum de ser realizado para prever as respostas dos diferentes tipos de materiais em termos da resistência mecânica e da ductilidade.

O ensaio de tração é influenciado pela temperatura, pela taxa de deformação imposta ao corpo de prova, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pelas condições ambientais e pela percentagem de impurezas contidas no material (GARCIA, 2008) como registrado pela figura 3.21, dentre outras variáveis. Esta figura mostra a variação da tensão convencional ou de engenharia (razão da carga instantânea aplicada ao material pela área inicial da seção transversal do corpo de prova) em função da variação dimensional sofrida pelo material em relação ao comprimento inicial deste (deformação convencional ou de engenharia).

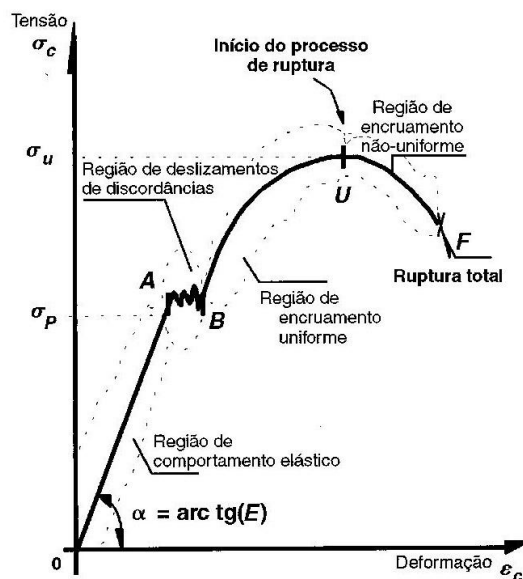


Figura 3.21- Ilustração de um gráfico gerado após a conclusão de um ensaio de tração (GARCIA, 2008).

Na figura 3.21 estão indicados os principais parâmetros de resistência mecânica e de ductilidade a partir da condução de um ensaio de tração uniaxial.

Como exemplo, citam-se os valores do módulo de elasticidade,  $E$ , que corresponde à inclinação da parte reta do gráfico, o limite de resistência à tração,  $\sigma_u$ , a tensão limite de ruptura (tensão no ponto  $F$ ), o alongamento uniforme (deformação até o ponto  $U$ , mas neste caso, sem considerar o retorno elástico sofrido pelo material após a remoção do esforço mecânico de tração, o alongamento não-uniforme (deformação localizada que acontece depois do ponto  $U$ ) e o alongamento total que consiste na soma do alongamento uniforme e do alongamento não-uniforme.

O módulo de elasticidade ou módulo de *Young* é a relação entre força e deformação observada no regime elástico (ARAUJO, 2005). Esta relação é obtida pela inclinação da reta do gráfico de tensão convencional versus deformação convencional. Essa região do gráfico é uma reta porque o material encontra-se no regime elástico, obedecendo assim, à lei de *Hooke*.

O material que possuir o maior valor para o módulo de elasticidade será aquele que apresentará o menor valor de deformação para um mesmo valor de tensão aplicada na região do limite elástico do mesmo.

A tensão limite resistência à tração é o valor máximo de tensão ( $\sigma$ ) alcançado durante a realização do ensaio de tração. Este valor marca ainda o início da instabilidade plástica (ponto de estrição) do material quando o esforço mecânico aplicado ao mesmo é o de tração. Deste ponto em diante, a deformação não é mais homogênea e tende a se localizar em uma posição específica do corpo de prova que está sendo testado.

A tensão limite de ruptura é o último valor de tensão convencional observado no gráfico da figura 3.21. Neste valor de tensão convencional o material se rompe. Em engenharia, este limite não tem significado, pois o material não deve sofrer instabilidade plástica quando em uso, fenômeno este observado antes do ponto de tensão limite de ruptura.

Em termos da ductilidade apresentada pelo material com a condução do ensaio de tração, verifica-se que o alongamento uniforme o qual indica o valor da deformação

convencional descontada do respectivo valor de deformação elástica (retorno elástico) que o material experimenta até o ponto de carga máxima observado no ensaio.

Já o alongamento não-uniforme é aquele que ocorre após a estrição do material, ou seja, após o ponto de carga máxima. Por fim, tem-se que o alongamento total, o qual identifica o alongamento total sofrido pelo corpo de prova até sua fratura, sendo o mesmo calculado pela soma dos alongamentos uniforme e não-uniforme.

### **3.7.2. Caracterização Térmica**

Outra técnica de caracterização comum ao estudo de diversos tipos de materiais é a análise térmica, como a análise termogravimétrica (TGA). Nesta, um material é aquecido sob determinada taxa de aquecimento específica, tipicamente entre 5°C/min até 20°C/min com uso de uma atmosfera reativa (ar comprimido) ou inerte (nitrogênio). A massa do referido (valor reduzido, na faixa de miligramas) é monitorada com uso de uma balança para avaliar a perda de massa em função do aquecimento do material.

Com a condução desse procedimento pode-se mensurar a variação da massa da amostra (com uso de uma balança incorporada ao equipamento) em função da temperatura de aquecimento. A temperatura adotada no ensaio é escolhida a partir das condições de uso da amostra, devendo a mesma ser inferior à completa fusão do material.

Neste caso, mudanças abruptas na curva massa em função da temperatura indicam a ocorrência de algumas características, como a degradação térmica ou a própria de recristalização de um material.

Na análise térmica diferencial (DTA), a variação na temperatura é o resultado de uma variação física ou química do material. Nesta, a amostra é aquecida em uma velocidade uniforme até atingir a temperatura de uma amostra de referência, sendo esta, assim como a amostra usada para o estudo, colocadas em cadinhos distintos. Em seguida, uma mesma fonte de calor aquece a amostra e o material de referência. Como ambas possuem capacidades caloríficas diferentes, sempre haverá diferença de temperatura entre elas, porém a variação da

temperatura entre elas significa transformação química ou física da amostra. O gráfico de DTA é a variação da temperatura em função da temperatura.

Nestas análises, para relacionar as curvas obtidas com o fenômeno da recristalização deve-se realizar o tratamento térmico nas temperaturas indicadas e em seguida, avaliar se houve o aparecimento de grãos novos por técnicas de microscopia.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Material

Este trabalho fez uso de chapas do latão CuZn34 (liga C26800) na condição recozido, com espessura inicial de 1,0mm, indicando que a composição química deste material possui cerca de 34% de zinco e 66% de cobre (em peso).

Este material é comumente utilizado na fabricação de diferentes tipos de objetos, como conectores elétricos e bijuterias devido à coloração amarela típica, semelhante ao ouro, assim como diversos outros utensílios utilizados na condução de água.

A escolha do latão CuZn34 para a condução dos experimentos deste trabalho foi realizada pelo fato deste material ser utilizado para a produção de diversos objetos, os quais são submetidos a diferentes operações de conformação e tratamentos térmicos, sendo assim, um representante adequado ao estudo proposto.

### 4.2. Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica do latão CuZn34 no estado como recebido foi realizada mediante a condução do ensaio de tração uniaxial com uso de corpos de prova com seção transversal retangular, figura 4.1., de acordo com o disposto na norma ASTM E-8.



Figura 4.1- Corpo de prova para tração do latão no estado como recebido.

As medidas deste corpo de prova estão discriminadas na figura 4.2, sendo todas as unidades em milímetros (mm).

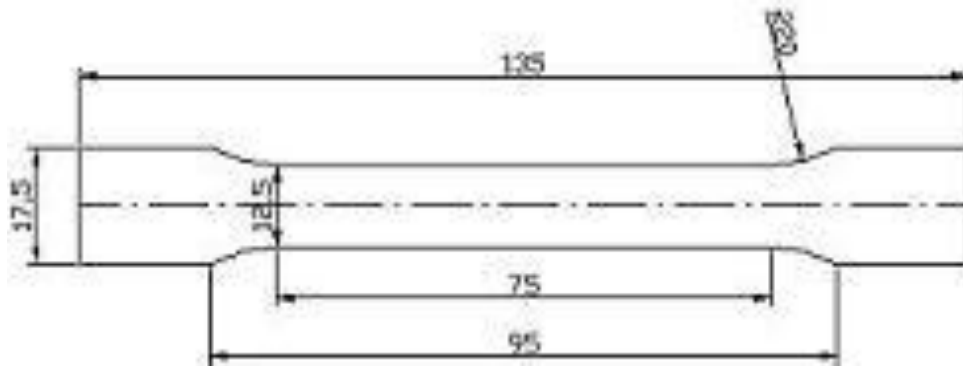


Figura 4.2- Medidas (em mm) do corpo de prova da figura 4.1.

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina de ensaios universais Instron 5582 com sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2* e com extensômetro mecânico (de agulhas) com abertura de 25mm.

A taxa de deformação inicial adotada nos ensaios foi de  $0,001s^{-1}$ , sendo adotada a velocidade para o deslocamento do cabeçote (*crosshead*) da máquina de ensaios igual a 4,5mm/min para alcançar o respectivo valor da taxa de deformação.

As propriedades mecânicas obtidas após a conclusão do ensaio compreenderam a tensão limite de escoamento, LE, a tensão limite de resistência à tração, LRT, e o alongamento uniforme, AU.

Considerando que este material apresentou patamar de escoamento, a tensão limite de escoamento consistiu no valor médio da tensão convencional identificada no patamar inferior, de acordo com o a figura 4.3, sendo **AB** o patamar de escoamento.

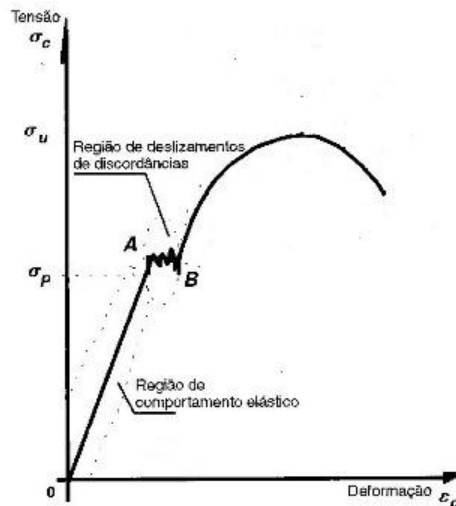


Figura 4.3- Representação do patamar de escoamento de um material, ou seja, região de deslizamentos de discordâncias (GARCIA, 2008).

A tensão limite de resistência à tração consistiu na razão da força máxima alcançada durante a condução do ensaio dividida pela área inicial da seção transversal do corpo de prova (largura inicial multiplicada pela espessura inicial).

Por fim, a medida de ductilidade, alongamento uniforme, foi obtida a partir da identificação do valor de deformação convencional identificado no ponto de carga máxima descontado do respectivo valor de deformação elástica (retorno elástico). Neste caso, a partir do ponto de tensão máxima, ou seja, da tensão limite de resistência à tração, fez-se o traçado de uma reta com a mesma inclinação da porção reta da curva de tensão convencional versus deformação convencional. A interseção dessa reta com o eixo das abscissas (eixo da deformação convencional) indica o respectivo valor do alongamento uniforme sofrido pelo latão CuZn34.

### 4.3. Caracterização Microestrutural

O arranjo microestrutural inicial do latão CuZn34 foi feito mediante a condução de preparação micrográfica. Neste caso, a etapa inicial consistiu no corte de amostras com uso da cortadeira metalográfica (*cut-off*) do laboratório de metalografia do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A figura 4.4 exibe a foto da cortadeira metalográfica usada para a retirada de amostras para o ensaio metalográfico. Deve-se destacar que não há referência da marca ou do fabricante deste equipamento.





Figura 4.4- Cortadeira metalográfica (*cut-off*) do laboratório de metalografia do departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Em seguida, foi feito o embutimento a frio com uso da mistura da resina de acrílico auto-polimerizante no estado sólido e líquido (figura 4.5a) e moldes circulares de silicone (figura 4.5b). O tempo de cura foi de 30 minutos.



Figura 4.5- Material empregado para o embutimento. (a) Acrílico auto-polimerizante no estado sólido e líquido, respectivamente e (b) Molde de silicone.

Após a cura do embutimento a frio foi feito o lixamento das amostras embutidas. O lixamento foi conduzido em uma lixadeira Struers (figura 4.6) na sequência de lixas de 240#, 320#, 400#, 600#, 1200#, 2400# e 4000# *mesh*, sendo feita a limpeza intermediária (entre uma lixa e outra) e final (ao término da operação de lixamento) com uso de água acompanhado por secagem com a utilização de álcool etílico e secador sobre a superfície para evitar manchas de secagem devido à alta volatilidade do álcool. A figura 4.7 apresenta o processo detalhado do lixamento.



Figura 4.6- Lixadeira Struers do laboratório de Metalografia do CEFET-MG.

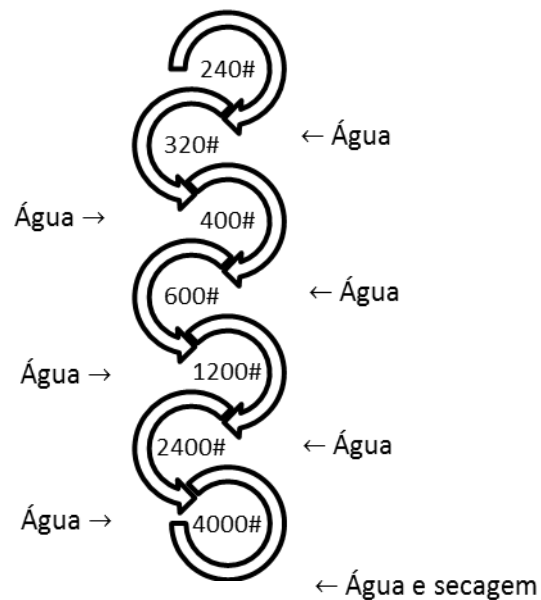


Figura 4.7- Esquema do processo de lixamento das amostras.

Após o lixamento, as amostras foram polidas em uma politriz Struers (figura 4.8) com uso de pasta de diamante com granulometria sequencial de  $9\mu\text{m}$  e de  $3\mu\text{m}$ , sendo utilizado álcool etílico como lubrificante. Logo após, fez-se o ataque com uso do reativo Di-Cobre (16,25mL de ácido sulfúrico concentrado, 4g de dicromato de potássio, 0,75g de cloreto de sódio e 200mL de água destilada, adicionando o ácido à água lentamente, aguardando o resfriamento do mesmo para só então adicionar os sólidos).

A figura 4.9 identifica a sequência de processos de uso das pastas de diamante e posterior ataque químico com o reativo químico Di-Cobre.



Figura 4.8- Politriz Struers do laboratório de Metalografia do CEFET-MG.

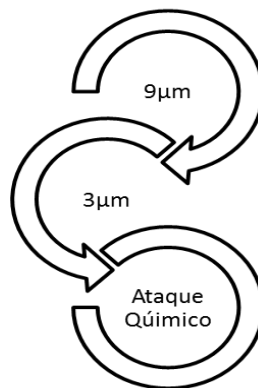


Figura 4.9- Esquema da sequência do polimento e posterior ataque químico.

Por fim, fez-se a digitalização das imagens observadas ao microscópio óptico Kontrol (figura 4.10) com uso de uma câmera acoplada ao mesmo.

Fez-se uso do software comercial *Image ProPlus 6.0* para analisar as imagens, medir o tamanho de grão e identificar os grãos recristalizados.



Figura 4.10- Microscópio óptico do laboratório de metalografia do CEFET-MG.

Essa preparação micrográfica foi adotada não só para a caracterização microestrutural do latão CuZn34 no estado como recebido assim como após a conclusão das etapas de processamento mecânico e térmico aplicadas a este material com o intuito de identificar a fração de grãos recristalizados. A figura 4.11 mostra o resumo da sequência de procedimentos adotados na metalografia.

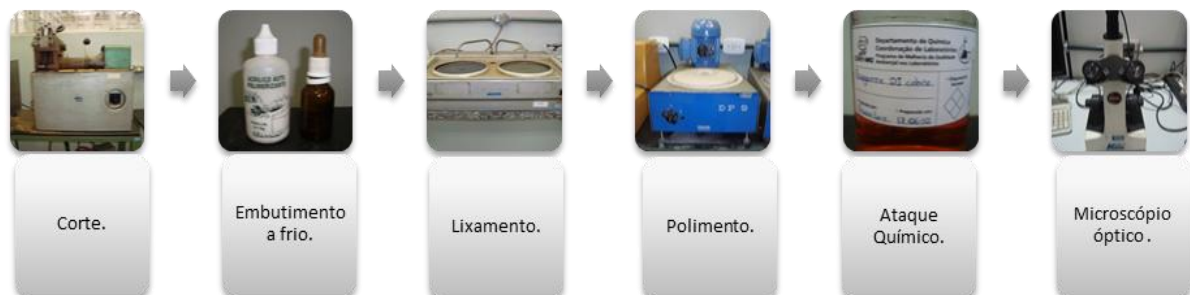


Figura 4.11- Sequência de processos para a metalografia.

#### 4.4. Caracterização Química

A identificação da composição química do latão CuZn34 no estado como recebido foi feita com uso da técnica de fluorescência de raios-X (EDX). Os elementos investigados foram cobre (Cu) e Zinco (Zn). O equipamento usado foi o Espectrômetro RayNy EDX-720

Shimadzu, figura 4.12, do laboratório de caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG

A análise química foi feita com uso de vácuo, sendo escolhida a curva de calibração de materiais metálicos.



Figura 4.12- Espectrômetro RayNy EDX-720 Shimadzu do laboratório de caracterização de materiais do departamento de Engenharia de Materiais CEFET-MG.

#### 4.5. Análise Térmica

A análise térmica foi realizada através de uma análise termogravimétrica (TGA) e de uma análise térmica diferencial (DTA) para auxiliar na escolha da temperatura que seria adotada para o tratamento térmico de recozimento para promover a recristalização do latão CuZn34.

Ambas as análises foram feitas para o latão CuZn34 no estado como recebido, o latão tracionado de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme deste material, totalizando cinco amostras para serem analisadas.

As amostras foram cortadas usando a cortadeira metalográfica, *cut-off*, do laboratório de metalografia do CEFET-MG, figura 4.4 e em seguida, as mesmas foram lixadas na lixa de

240# com auxílio de uma pinça para reduzir a dimensão e a massa da mesma, devendo a mesma ser de no máximo, 2mg. Em seguida, as cinco amostras foram identificadas e entregues ao laboratório de caracterização de materiais do departamento de Química Tecnológica do CEFET-MG para a análise térmica por TGA e DTA, figura 4.13, com uso do equipamento *Simultaneous DTA-TG Aparatus* do fabricante Shimadzu.



Figura 4.13- Equipamento usado para a análise térmica das amostras do latão CuZn34, *Simultaneous DTA-TG Aparatus*, Shimadzu, do laboratório de caracterização de materiais do departamento de Química Tecnológica do CEFET-MG.

As condições usadas para os testes foram de atmosfera inerte com nitrogênio (vazão de 50mL/min), taxa de aquecimento de 10°C por minuto e temperatura de aquecimento de até 780°C.

A massa máxima inicial usada nos experimentos foi de aproximadamente 2mg, sendo usado ainda cadinho de alumina ( $Al_2O_3$ ), o qual também foi utilizado nos ensaios de DTA como sendo a amostra de referência.

#### **4.6. Processamento Mecânico**

Duas operações foram adotadas para o processamento mecânico do latão CuZn34, tração e dobramento, de modo isolado ou combinado.

O latão foi pré-deformado em tração de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme ou 0,026; 0,105; 0,262 e 0,418 de deformação convencional,

respectivamente. Cada corpo de prova foi dividido em dois para que duas amostras fossem geradas em cada caso. Sendo assim, quatro amostras foram usadas para o estudo isolado da tração e quatro amostras foram usadas para o estudo combinado com o dobramento.

Cinco amostras do latão CuZn34 foram dobradas, sendo as mesmas usadas no estado como recebido, tracionadas de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme. Todas as amostras foram dobradas em  $+90^\circ$  e em seguida desdobradas com uso da dobradeira mecânica instalada no laboratório de calderaria do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, figura 4.14.



Figura 4.14- Dobradeira mecânica do laboratório de Calderaria do CEFET-MG.

A figura 4.15 mostra os estágios do dobramento destacando em um círculo vermelho a região que realmente sofreu as tensões de tração e de compressão provenientes da operação de dobramento.

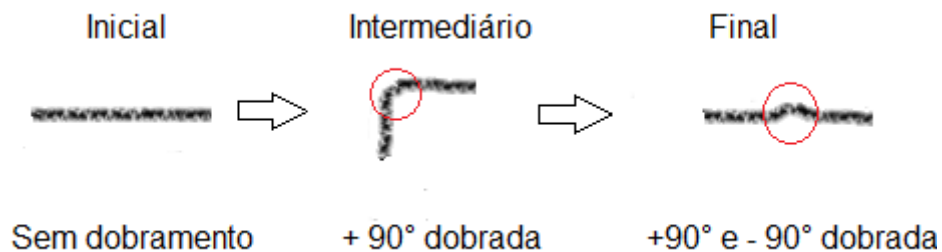


Figura 4.15- Estágios do dobramento realizados no estudo sendo a região circunscrita da amostra a região que realmente foi dobrada.

Pode se observar pelo esquema da figura 4.16 que após o processamento mecânico de dobramento reverso, o latão CuZn34 não recuperou totalmente sua forma inicial (superfície plana e sem ondulação). A presença da ondulação indica que o processamento cíclico não foi efetivamente realizado, pois a deformação reversa (desdobramento) foi ligeiramente menor que a operação direta (dobramento).

A operação de desdobramento das chapas de latão CuZn34 foi feita mediante a colocação da chapa dobrada sobre o prensa-chapas da dobradeira mecânica. Neste caso, a Figura 4.16 mostra o aspecto da região dobrada e desdobrada de 90° do latão CuZn34 que posteriormente foi tratada termicamente a 450°C durante 15 minutos (900 segundos) com resfriamento no interior do próprio forno. A área adjacente da região dobrada foi desconsiderada neste estudo.

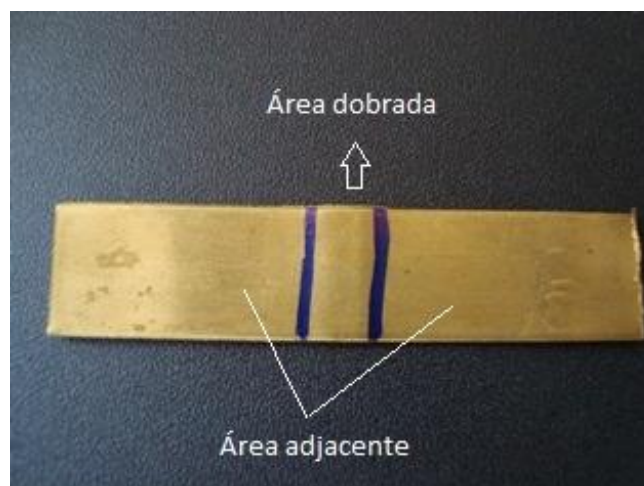


Figura 4.16- Amostra do latão no estado como recebido dobrada de 90° e em seguida, desdobrada em 90°, evidenciando a área dobrada e a área adjacente.

Considera-se ainda que o ângulo de dobramento variou de + 1 e de - 2° em relação ao valor pretendido de 90°, sendo essa variação devido à mudança do valor do retorno elástico que aumentou com o acréscimo da pré-deformação em tração para as chapas que foram deformadas previamente.



#### 4.7. Tratamento Térmico

A tabela IV.1 apresenta o resumo das condições das amostras do latão CuZn34 utilizadas para a condução do tratamento térmico para promover a recristalização deste material.

Conjunto de amostras	Estado/Condição
1	Como recebido
2	Amostras tracionadas de 5% do valor de AU
3	Amostras tracionadas de 20% do valor de AU
4	Amostras tracionadas de 50% do valor de AU
5	Amostras tracionadas de 80% do valor de AU
6	Como recebido e dobrada e desdobrada de 90°
7	Amostras tracionadas de 5% do valor de AU + dobradas e desdobradas de 90°
8	Amostras tracionadas de 20% do valor de AU + dobradas e desdobradas de 90°
9	Amostras tracionadas de 50% do valor de AU + dobradas e desdobradas de 90°
10	Amostras tracionadas de 80% do valor de AU + dobradas e desdobradas de 90°

Tabela IV.1- Resumo das condições das amostras submetidas ao tratamento térmico para recristalização do latão CuZn34.

Todas essas amostras foram tratadas termicamente a 450°C durante 15 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno. Deve-se destacar que a temperatura e o tempo utilizados nestes tratamentos térmicos foram escolhidos a partir dos resultados obtidos pela análise térmica discutidos no item 5.3 deste trabalho.

Os tratamentos térmicos foram feitos no laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. O conjunto de amostras 1, 2, 3, 4 e 5 apresentados na tabela IV.1 foram recozidos no forno mufla *Novus N1040*, figura 4.17, enquanto os outros cinco conjuntos de amostras, 6, 7, 8, 9 e 10 foram tratados termicamente no forno mufla *Heraeus* da marca Brasimet, figura 4.18.



Figura 4.17- Forno *Novus N1040* do laboratório de tratamento térmico do CEFET-MG.



Figura 4.18- Forno *Heraeus* da marca Brasimet do laboratório de tratamento térmico do CEFET-MG.

Ambos os fornos foram programados para serem utilizados na temperatura de 450°C. Quando eles atingiram esta temperatura eles foram abertos e as amostras foram colocadas no interior dos mesmos, conforme descrito. Os fornos foram novamente fechados e após o reaquecimento dos mesmos, as amostras permaneceram no interior dos mesmos durante 15 minutos. Após os 15 minutos, ambos os fornos foram desligados, sendo os mesmos mantidos fechados para o subsequente resfriamento das amostras.

As amostras foram retiradas do interior do forno após 24h de resfriamento para em seguida, ser feito o embutimento necessário à análise micrográfica.

#### 4.8. Previsão da fração recristalizada

Para cada amostra submetida ao tratamento térmico apresentado no item anterior foi calculada a fração recristalizada de acordo com a norma ASTM E-562-01. A malha de pontos consistiu de 256 quadrados com lado de 20  $\mu\text{m}$ . Sendo os vértices dos quadrados os pontos da malha (exemplo: ponto X da malha da figura 4.20). Os vértices da borda não foram considerados pontos da malha.

A figura 4.19 é a malha de pontos usada neste trabalho. Esta malha foi colocada sobreposta às micrografias e assim foi possível contar o número de pontos (intersecção entre retas, excluindo as extremidades) que estavam sobre um grão recristalizado. O software usado para sobreposição da malha na micrografia foi o *CorelDraw Graphic Suite X5*.

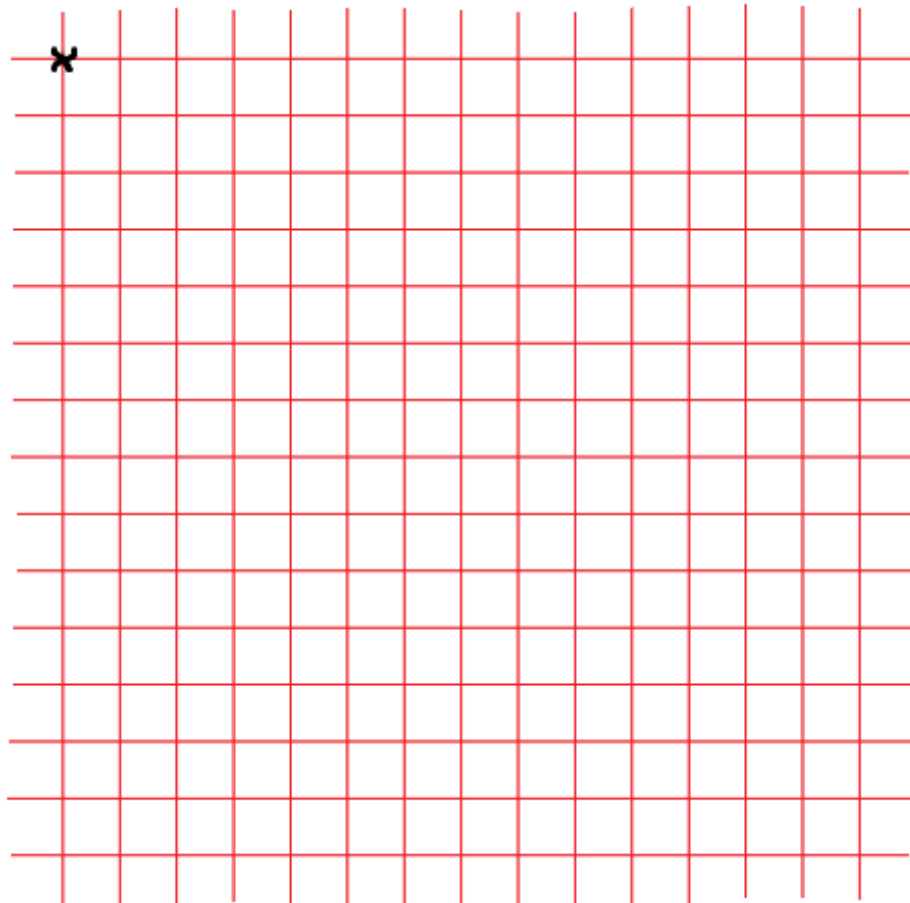


Figura 4.19- Malha de pontos usada para o cálculo da fração recristalizada.

O número de pontos plotados em cada figura foi 225. O limite mais rigoroso apresentado na norma ASTM E-562-01 é de 100 pontos. Assim, com o objetivo de rastrear melhor o fenômeno de recristalização, fez-se a opção do uso de 225 pontos.

Para cada estado do latão CuZn34, três imagens diferentes foram estudadas separadamente. Primeiro, as três imagens receberam a sobreposição da malha e em seguida, foram identificados os pontos que estavam sobrepostos em grãos recristalizados. A média aritmética da quantidade de pontos identificados nas três fotomicrografias foi considerada como sendo a quantidade de pontos encontrados em cada estado, sendo todos os arredondamentos feitos para baixo em valores menores ou iguais a 5 e para cima em valores maiores que 5.

Para quantificar a fração recristalizada em cada situação proposta neste trabalho, as fotomicrografias com aumento de 100 vezes foram recortadas na forma de quadrados com 320mm de lado e em seguida, uma malha foi acoplada à figura para que a esta ficasse dividida em 256 quadrados de 20mm de lado cada. Dessa forma foram gerados 225 pontos (vértices dos quadrados, excluindo os da borda externa). A fração recristalizada está conforme a fórmula 1 abaixo:

$$\text{Fração Recristalizada} = \text{Pontos Selecionados} : 225 \quad (4.1)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Caracterização Mecânica

A figura 5.1 apresenta a curva de tensão convencional versus deformação convencional para o latão CuZn34 no estado como recebido após a condução do ensaio de tração até a fratura. As propriedades mecânicas, em termos de resistência mecânica (tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência à tração) e de ductilidade (alongamento uniforme) são exibidas na tabela V.1.

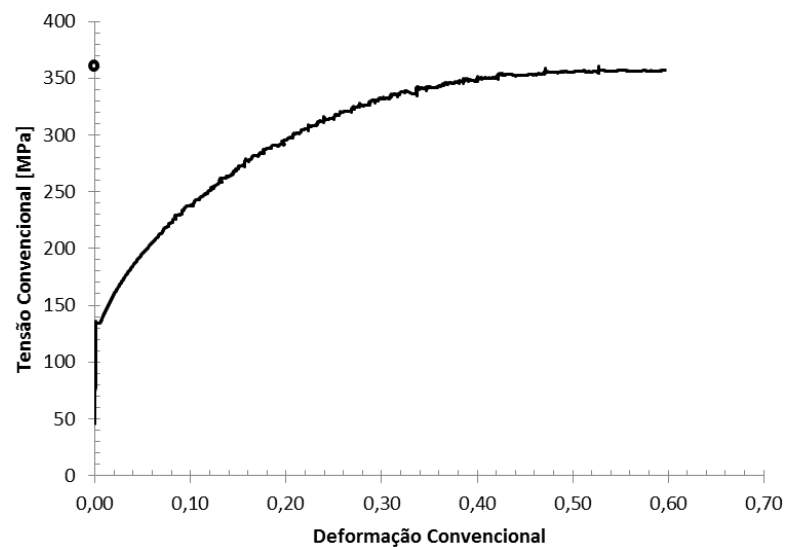


Figura 5.1- Curva tensão convencional versus deformação convencional do latão no estado como recebido.

#### Resumo das Propriedades Mecânicas do Latão

##### CuZn34

Tensão limite de resistência à tração	360 MPa
Tensão limite de escoamento	134 MPa
Alongamento uniforme	0,523

Tabela V.I- Valores das propriedades mecânicas do latão no estado como recebido.

## 5.2. Caracterização Química

O latão recebido foi analisado quimicamente a fim de conferir sua composição química por EDX. O equipamento usado foi o Espectrômetro *RayNy* EDX-720 Shimadzu e a atmosfera foi o vácuo. O resultado está apresentado na tabela V.2.

Elemento Químico	Quantidade (% em peso)
Cobre (Cu)	66,890
Zinco (Zn)	31,839
Cálcio (Ca)	0,429
Cloro (Cl)	0,339
Alumínio (Al)	0,186
Silício (Si)	0,115
Potássio (K)	0,099
Manganês (Mn)	0,078
Enxofre (S)	0,025

Tabela V.2- Composição química do latão CuZn34.

Os valores do teor de cobre e de zinco foram diferentes do previsto (menores), sendo isso relacionado ao fato de ter sido utilizada uma curva de calibração de materiais metálicos em geral para a análise química do latão CuZn34 pela técnica de fluorescência de raios-X.

## 5.3. Caracterização Térmica

A caracterização térmica foi feita através de análise termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA). As condições usadas para os testes foram: atmosfera inerte com nitrogênio (vazão de 50mL/min), taxa de aquecimento de 10°C por minuto e temperatura de aquecimento de até 780°C.

A figura 5.2 é a curva da análise termogravimétrica. É possível perceber a presença de sujeira no cadinho no início do processo pela quantidade de variação que aconteceu até aproximadamente 150°C. Embora a variação de massa em função da temperatura não tenha sido significativa, nota-se a perda de massa de aproximadamente 0,04g em torno de 400°C.

Este resultado foi utilizado como parâmetro de referência para a escolha da temperatura de 450°C para ser adotada nos experimentos deste trabalho, com o acréscimo de 50°C para estimar possíveis perdas na transferência de calor e a perda de massa baixa registrada pela análise por TGA.

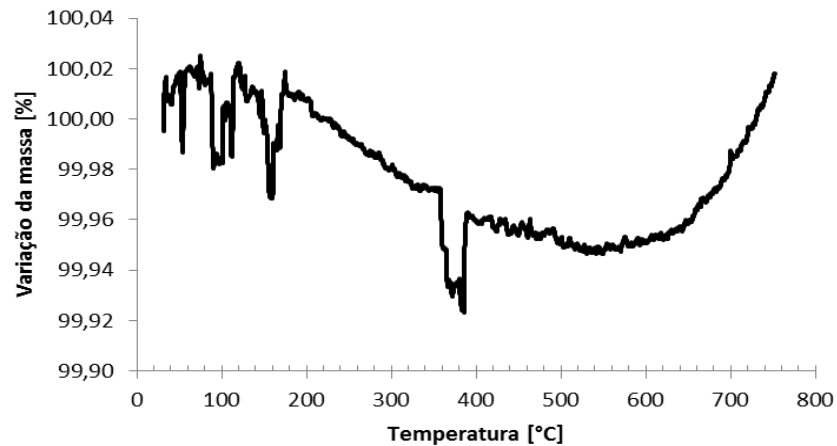


Figura 5.2- Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão no estado como recebido.

A figura 5.3 é a curva da análise térmica diferencial. É possível perceber uma curva sempre decrescente. Esta curva, no entanto, não acrescentou informação sobre a temperatura de recristalização do latão no estado como recebido.

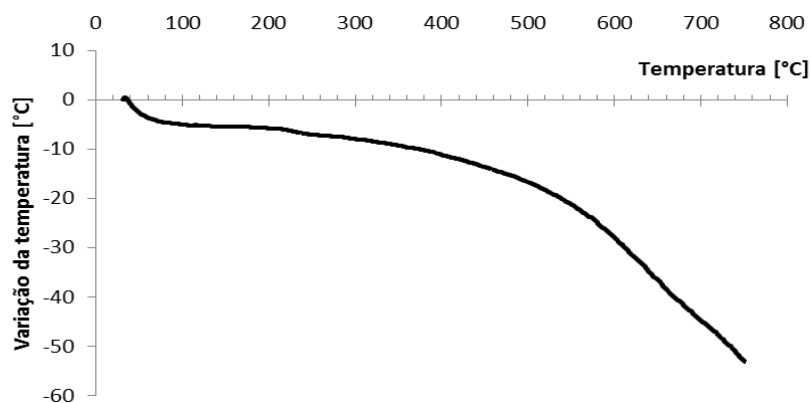


Figura 5.3- Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão no estado como recebido.

## 5.4. Processamento mecânico

### 5.4.1. Pré-deformação em tração

O latão foi pré-deformado em tração de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme ou 0,026; 0,105; 0,262 e 0,418 de deformação convencional, respectivamente, sendo obtidas as curvas de fluxo mostradas nas Figuras 5.4.

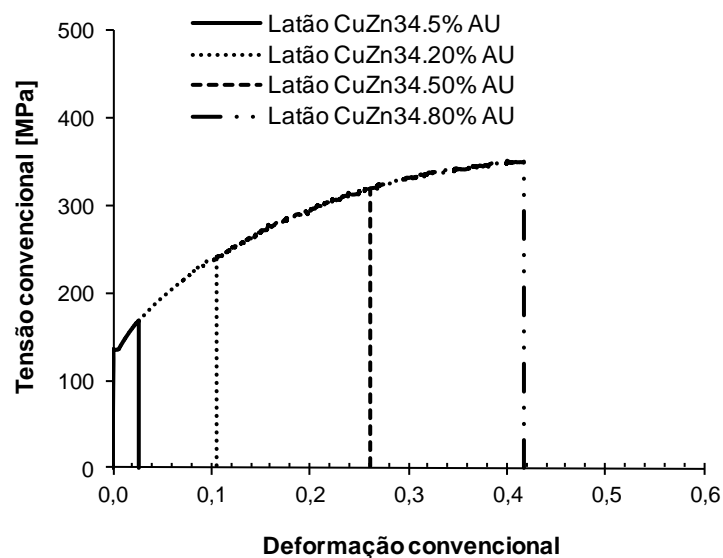


Figura 5.4- Curva tensão convencional versus deformação convencional para os quatro valores e pré-deformação em tração do latão CuZn34.

Essa pré-deformação foi aplicada ao latão CuZn34 com o objetivo de entregar uma quantidade de energia prévia ao material para propiciar investigar o aparecimento de grãos novos, característicos da recristalização.

Deste modo, os resultados a seguir revelam a influência do acréscimo da quantidade de deformação anterior ao tratamento térmico de recozimento e em seguida, o efeito da combinação dos esforços mecânicos mediante a condução do ensaio de tração e da operação de dobramento com ângulo de dobramento de 90°.



### 5.5. Escolha da temperatura e do tempo de recozimento

Primeiramente, o latão CuZn34 foi deformado em tração de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme e em seguida, foi submetido à análise térmica (análise termogravimétrica, TGA, e análise térmica diferencial, DTA) para avaliar a degradação térmica deste material para diferentes condições, assim como auxiliar na escolha da temperatura que será realizada para a execução dos tratamentos térmicos de recozimento para recristalização.

Na análise termogravimétrica e análise térmica diferencial as condições usadas para os testes foram: atmosfera inerte com nitrogênio (vazão de 50mL/min), taxa de aquecimento de 10°C por minuto e temperatura de aquecimento de até 780°C. Estas condições se repetem em todos os níveis de deformação.

A seguir estão sequenciadas quatro curvas de análise termogravimétrica. Em sequência, as figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 representam a TGA do latão CuZn34 tracionado de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme, respectivamente.

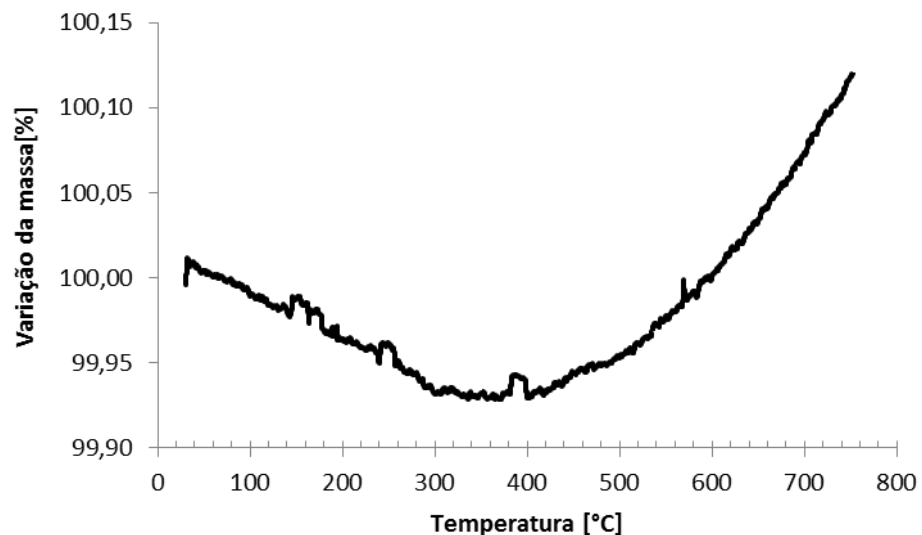


Figura 5.5- Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 5% de alongamento uniforme.

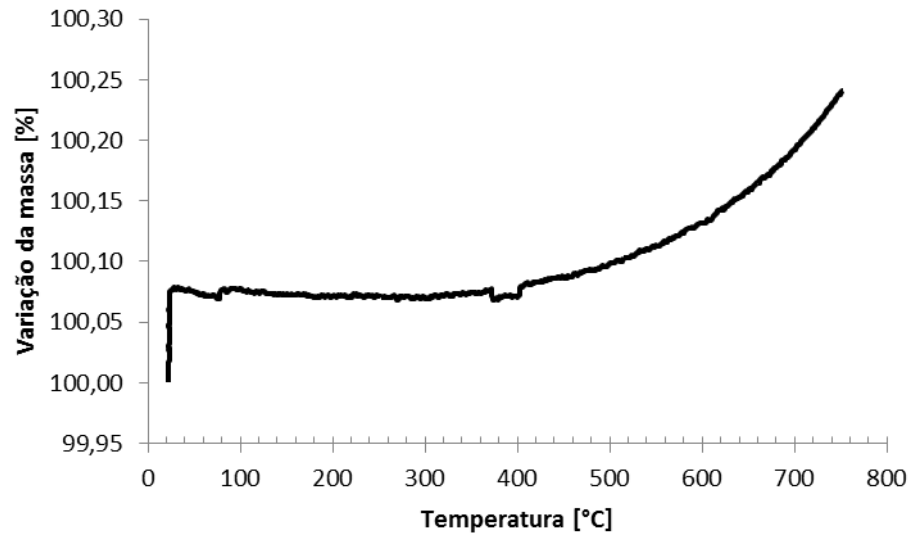


Figura 5.6- Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 20% de alongamento uniforme.

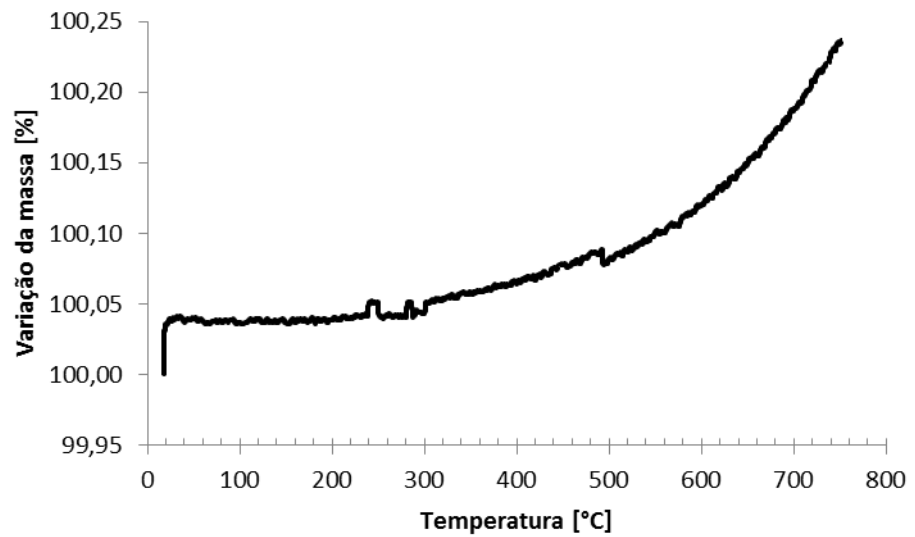


Figura 5.7- Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 50% de alongamento uniforme.

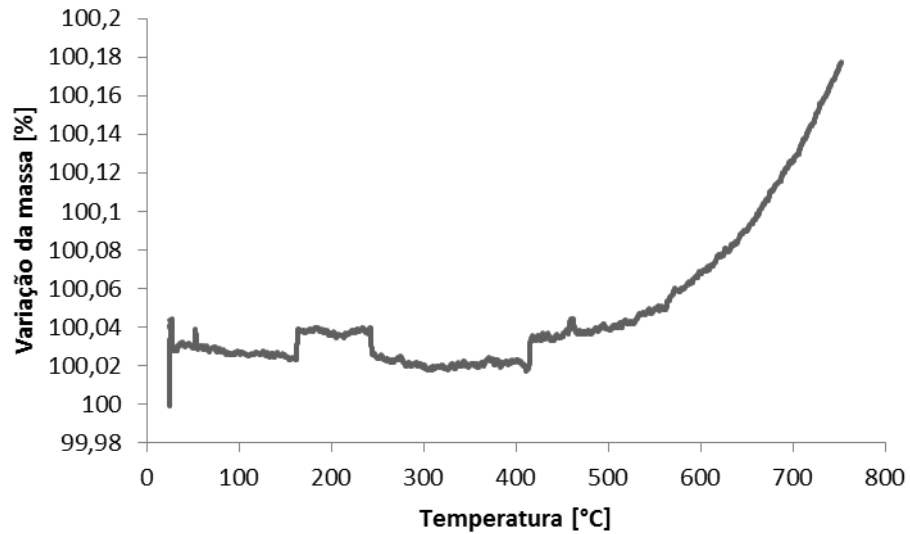


Figura 5.8- Variação da massa em função da temperatura (curva TGA) do latão tracionado de 80% de alongamento uniforme.

De acordo com a análise termogravimétrica do latão tracionado de 5% e de 20% do valor do alongamento uniforme, percebe-se que houve alguma mudança (perda de massa) na temperatura de aproximadamente 400°C.

Esta temperatura reduz para 250°C no latão CuZn34 tracionado de 50% do valor do alongamento uniforme e para 150°C para o latão tracionado de 80% do valor do alongamento uniforme.

As figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 têm em comum o fato de estarem crescentes para temperaturas superiores a 400°C. Com este resultado, pode-se inferir que uma temperatura razoável para realização dos testes de recristalização é 450°C. A temperatura será constante em todos os ensaios para atender ao cronograma proposto, assim como o tempo que foi definido como 15 minutos. Este tempo é justificado, pois a condição do material é de previamente deformado antes da recristalização.

As quatro curvas seguintes, figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, referem-se aos resultados da análise térmica diferencial, DTA do latão CuZn34 tracionado de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme, respectivamente.

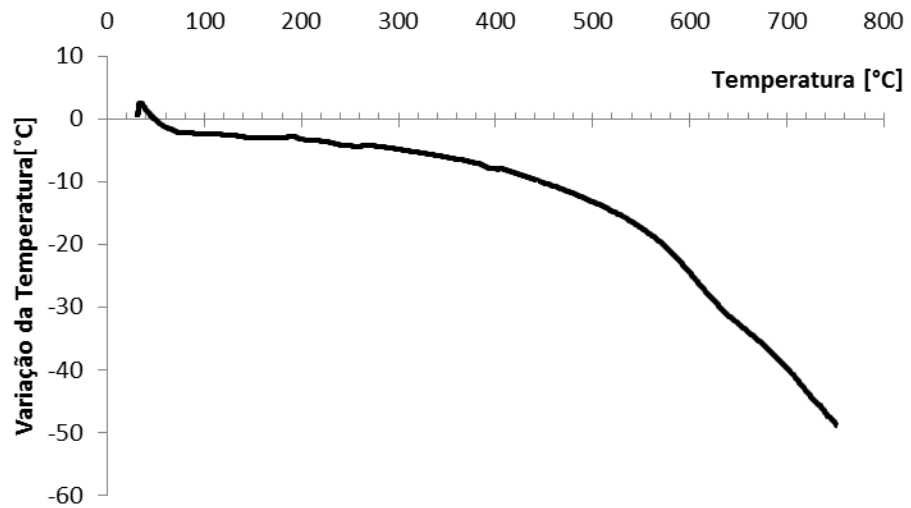


Figura 5.9- Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 5% do valor do alongamento uniforme.

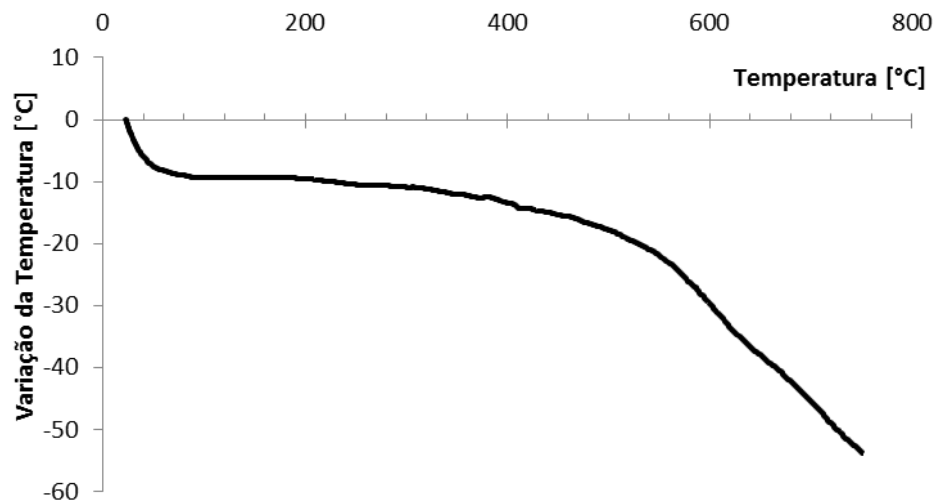


Figura 5.10- Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 20% do valor do alongamento uniforme.

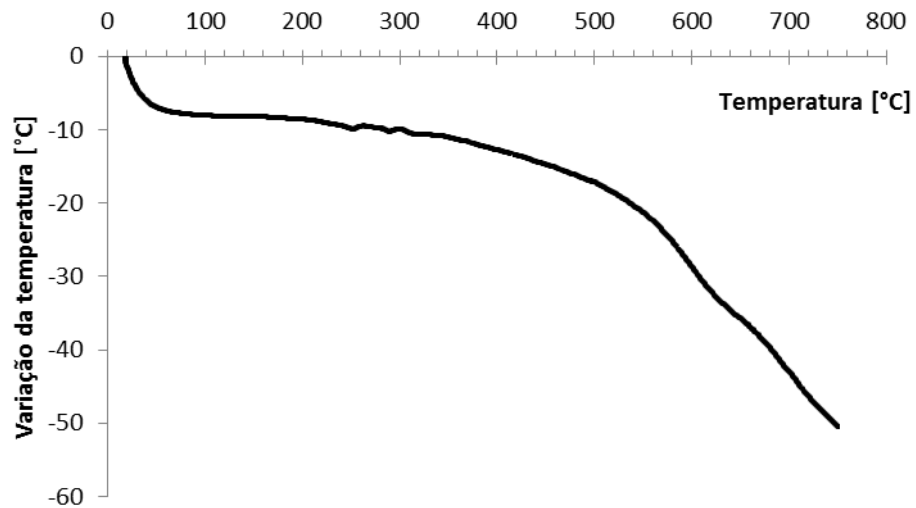


Figura 5.11- Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 50% do valor do alongamento uniforme.

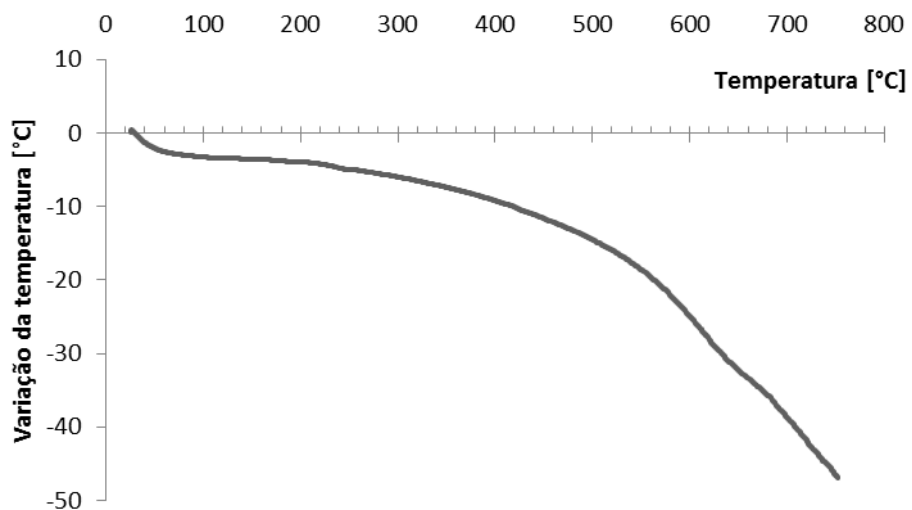


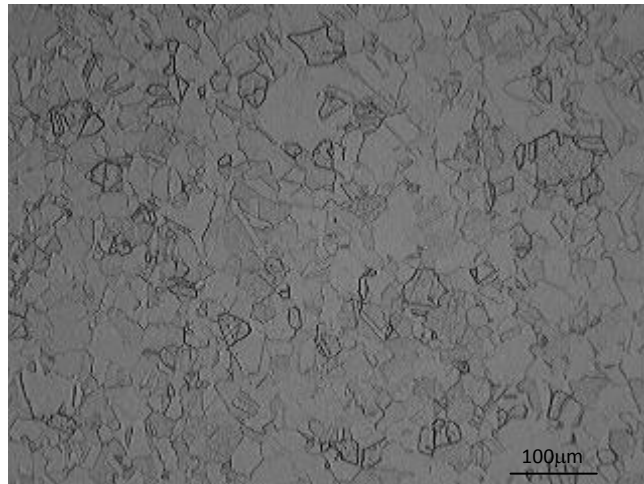
Figura 5.12- Variação da temperatura em função da temperatura de aquecimento (curva DTA) do latão tracionado de 80% do valor do alongamento uniforme.

Considerando que todas as curvas apresentam aspecto descendente com o acréscimo da temperatura de aquecimento, sem variações em pontos específicos, o auxílio da escolha adotada para o tratamento térmico de recristalização do latão CuZn34 a partir desta técnica de ensaio não foi considerado.

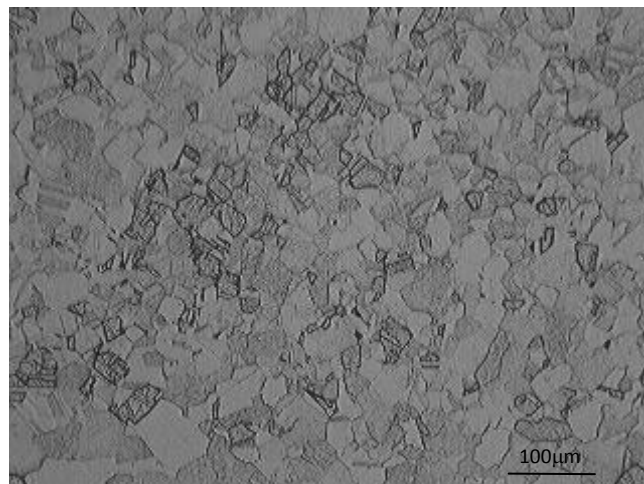
A partir das análises térmicas (TGA) foram feitas consultas à literatura, fez-se a escolha da temperatura de 450°C para a condução do tratamento térmico de recozimento necessário à recristalização do latão CuZn34 durante o intervalo de tempo de 15 minutos.

## 5.6. Processamento mecânico versus arranjo microestrutural

O arranjo microestrutural assumido pelo latão CuZn34 no estado como recebido e após o tratamento térmico (aquecimento a 450°C durante 15 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno) deste mesmo material sem a imposição de esforço mecânico em laboratório (estado como recebido) é apresentado nas Figuras 5.13 (a) e 5.13(b), respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.13- Fotomicrografias do latão CuZn34- a) estado como recebido e b) após recozimento a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

### 5.7. Cinética de Recristalização do Latão

Neste caso, para o estudo da fração de grãos recristalizados após a combinação dos esforços mecânicos e do tratamento térmico a fotomicrografia de referência foi a figura 5.13(a), ou seja, a condição inicial do material (já entregue na condição como recozido).

As figuras 5.14 até 5.17 mostram o aspecto microestrutural assumido pelo latão CuZn34 após a pré-deformação em tração de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme acompanhado pela execução do recozimento a 450°C durante 15 minutos.

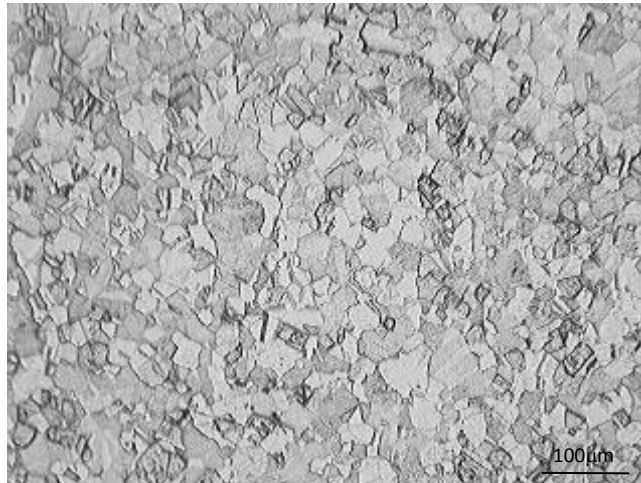


Figura 5.14- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,026$  (5% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

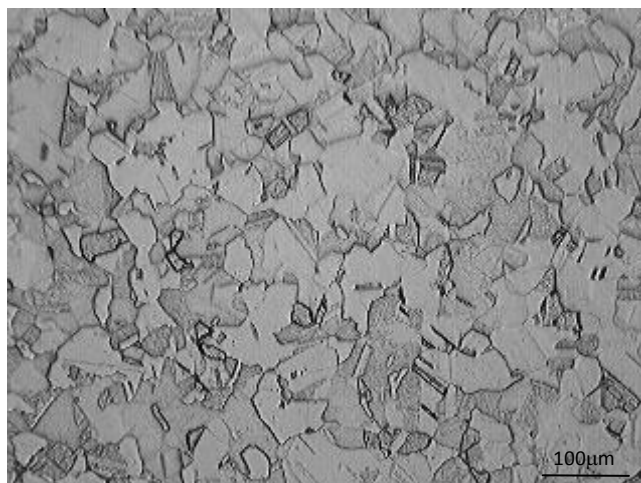


Figura 5.15- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,105$  (20% de AU) e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

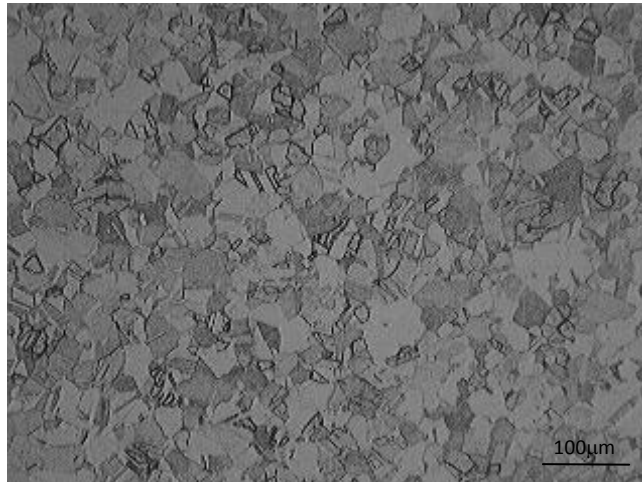


Figura 5.16- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,262$  (50% de AU) e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

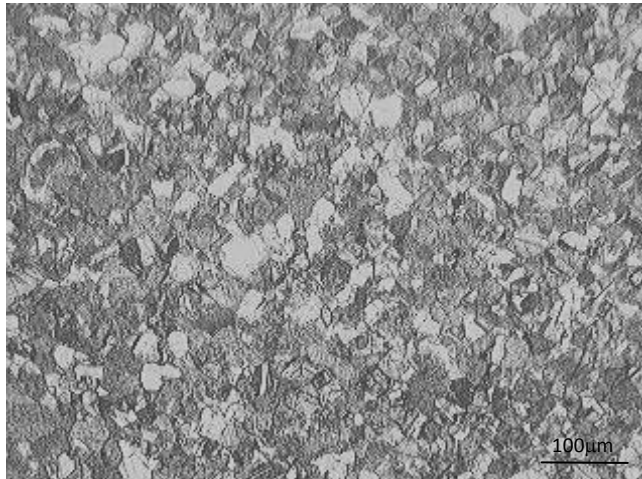


Figura 5.17- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,418$  (80% de AU) e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

Somente após o latão ter sofrido tração de 80% de alongamento uniforme é possível perceber a ocorrência da recristalização do latão CuZn34, gerando uma microestrutura mais refinada. A diminuição do tamanho de grão é um sinal de recristalização sofrida, uma vez que grãos recristalizados são nucleados na matriz deformada e se originam como núcleo e vão crescendo posteriormente de acordo com o tempo disponível.

O fato de o latão com 20% de tração apresentar grãos maiores que o latão de 5% não pode ser explicado pela teoria pesquisada. A possibilidade de troca de amostras não é cogitada devido à forma de organização do trabalho que não deixa dúvidas sobre a correspondência das amostras ao valor tracionado.



As figuras 5.18 a 5.21 apresentam as fotomicrografias das figuras 5.14 a 5.17 acopladas com a malha de pontos.

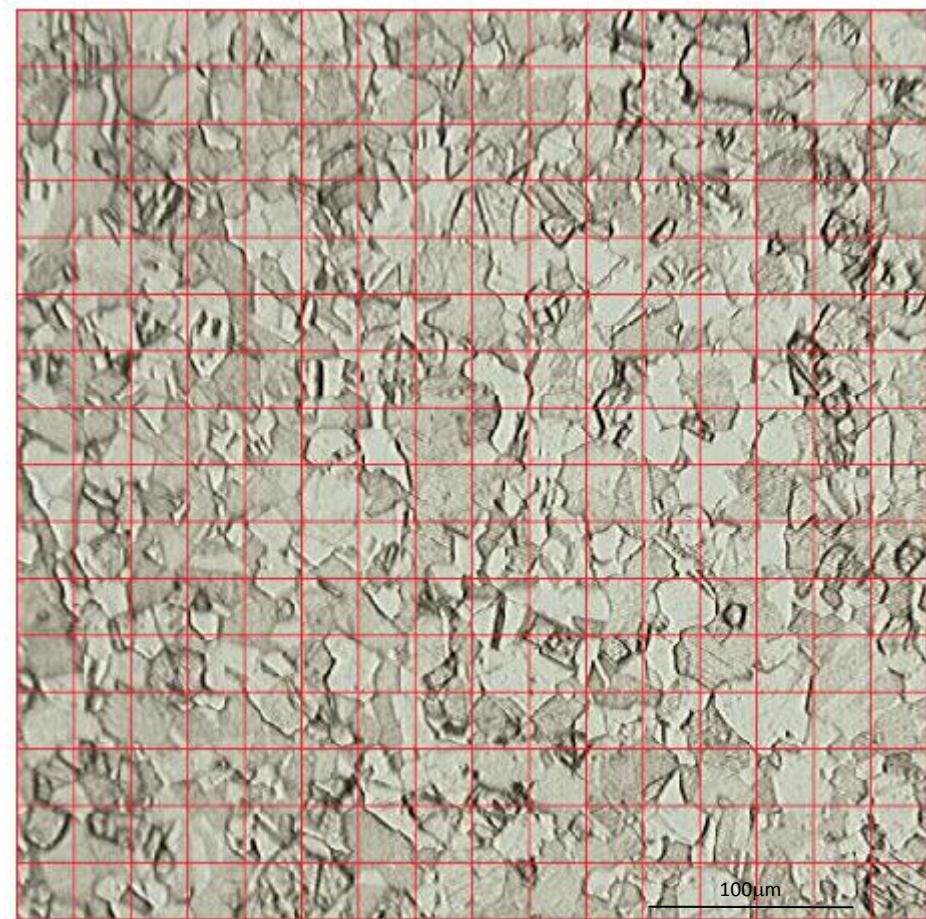


Figura 5.18- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,026$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reagente DiCobre.

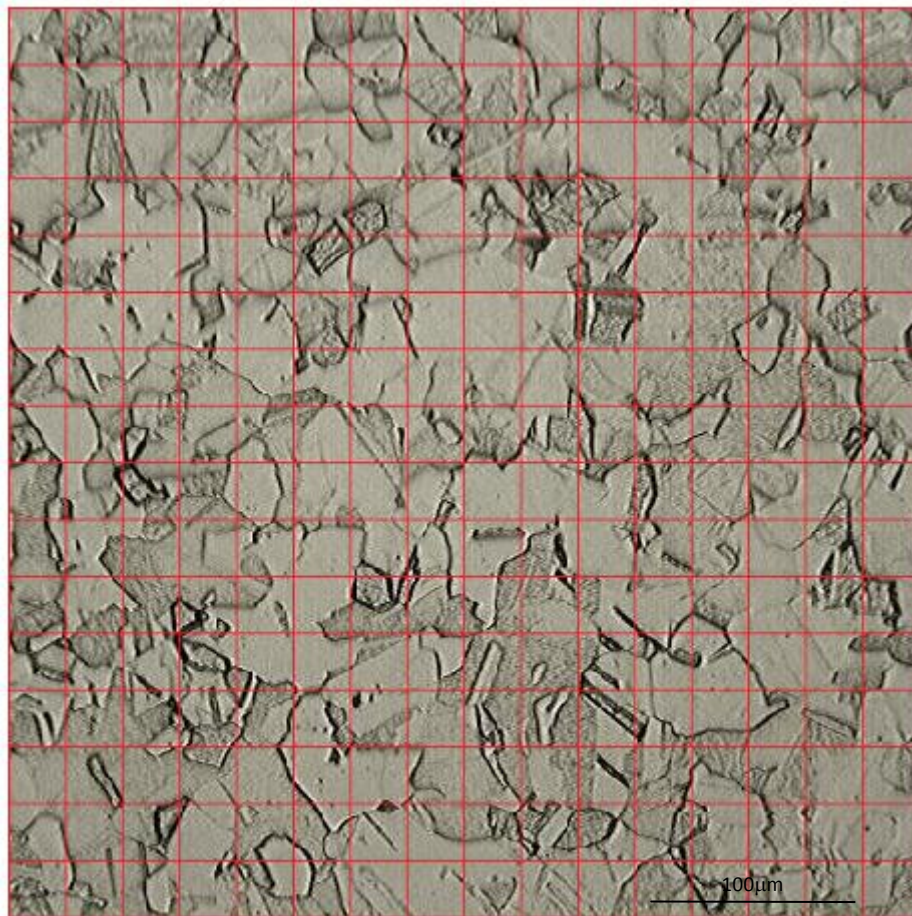


Figura 5.19- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,105$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

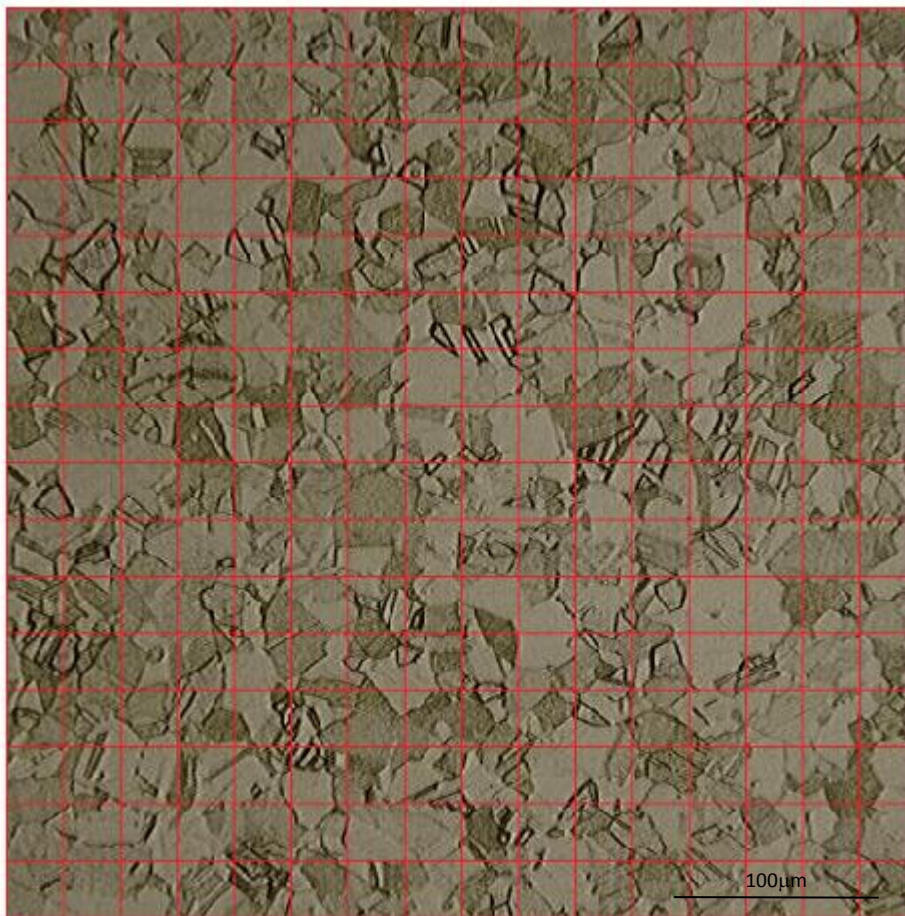


Figura 5.20- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré- deformado em tração de  $e = 0,262$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

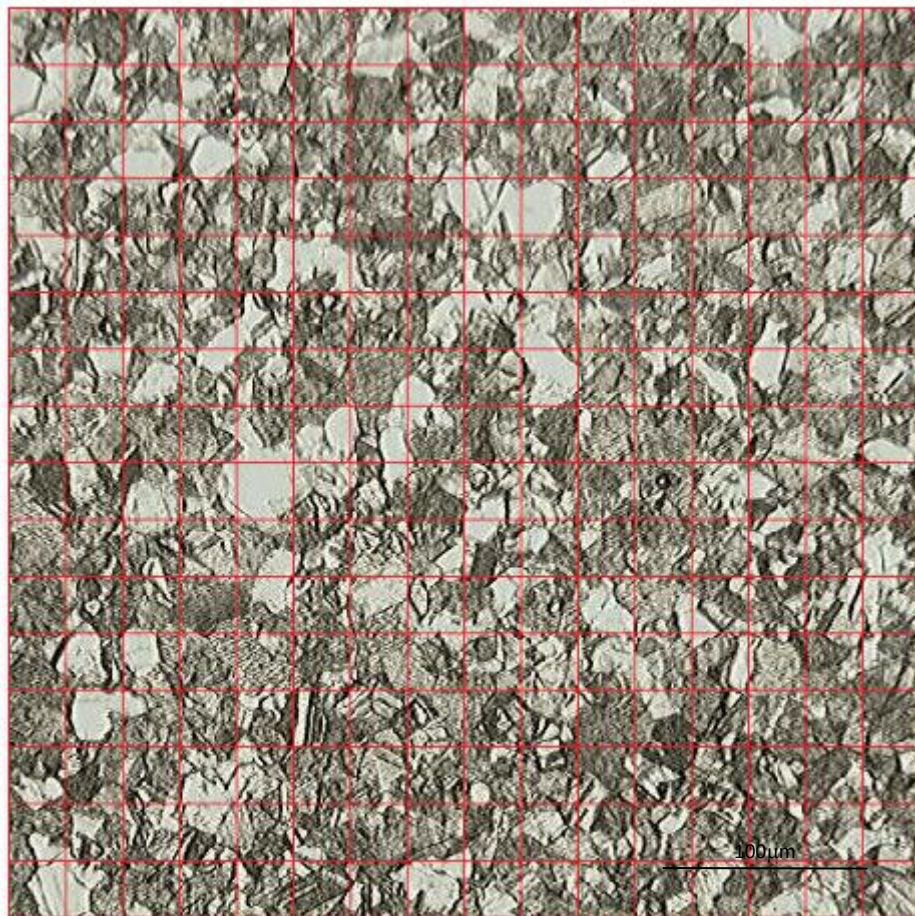


Figura 5.21- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,418$ , e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

Os valores da fração recristalizada do latão CuZn34 após a observação microestrutural do latão CuZn34 pré-deformado em tração e em seguida, recozido, foram calculados de acordo com os detalhes apresentados no item 4.8 deste trabalho, sendo os mesmos apresentados na tabela V.3 e na figura 5.22.

Tração	Pontos	Fração Recristalizada
0% de AU	0	0,00
5% de AU	5	0,02
20% de AU	3	0,01
50% de AU	4	0,02
80% de AU	103	0,46

Tabela V.3- Valores da fração recristalizada do latão CuZn34 em função do número de pontos identificados para cada valor de pré-deformação em tração.

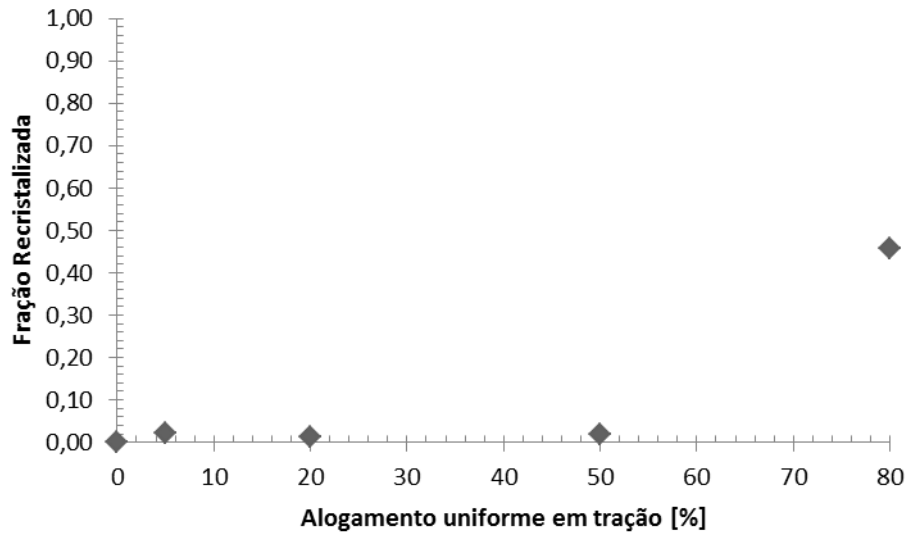


Figura 5.22- Fração recristalizada em função da quantidade de pré-deformação em tração, expressa em termos do percentual de deformação em termos do alongamento uniforme do latão CuZn34 tracionado e recozido.

Desconsiderando o valor obtido em 20% de alongamento uniforme, é possível afirmar que o aumento da quantidade de deformação em tração, anterior ao tratamento térmico de recozimento propiciou o aumento da fração de grãos recristalizados do latão CuZn34, sendo esse efeito destacado a partir da pré-deformação de 0,418 (deformação convencional ou 80% do valor do alongamento uniforme).

Para verificar a influência da combinação dos esforços de tração e de compressão na cinética de recristalização do latão foram feitos dobramento nas peças tracionadas e também em uma amostra no estado como recebido. Nos cinco casos, as amostras foram dobradas em  $+90^\circ$  para em seguida, serem desdobradas, desconsiderando os efeitos elásticos diferentes sofridos pelas amostras pelo fato de as mesmas terem sido pré-deformadas de valores diferentes em tração.

Deste modo, a Figura 5.23 mostra a fotomicrografia do latão CuZn34 após o recozimento deste material (aquecimento a  $450^\circ\text{C}$  durante 15min) na condição dobrado e desdobrado de  $90^\circ$ .

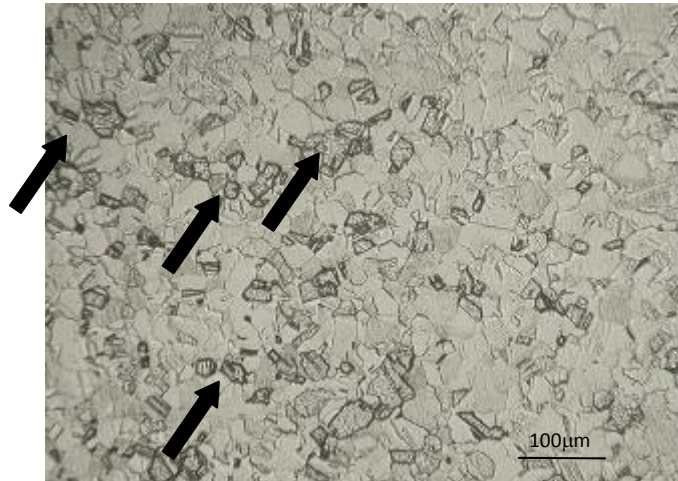


Figura 5.23- Fotomicrografia do latão CuZn34 na região dobrada e desdobrada de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

De modo análogo, a Figura 5.24 exibe a fotomicrografia do latão CuZn34 dobrado e desdobrado de 90°C e em seguida, recozido, mas numa região adjacente ao dobramento.

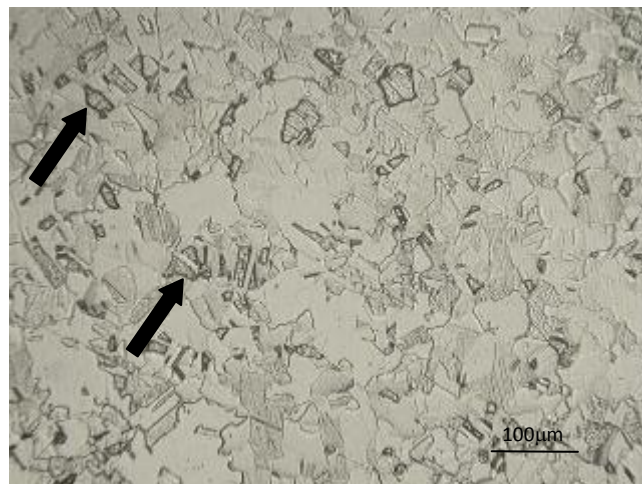


Figura 5.24- Fotomicrografia do latão CuZn34 na região adjacente à parte dobrada e desdobrada de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

A análise das figuras 5.23 e 5.24 revela a influência do processamento mecânico de dobramento na recristalização do latão CuZn34 pela diferença do tamanho de grão da região dobrada e da região adjacente à área dobrada.

A energia armazenada durante o dobramento foi suficiente para acelerar a nucleação de grãos novos, de modo diferente, seja na região dobrada, figura 5.23, seja na área adjacente à parte dobrada, figura 5.24.

Na figura 5.23, percebe-se poucos grãos recristalizados (assinalados nas Figuras 5.23 e 5.24 por setas), indicando que a energia armazenada durante o processamento foi menor já que esta parte não sofreu dobramento. Dessa forma, este trabalho irá desconsiderar as áreas adjacentes, sendo o cálculo da fração recristalizada com dobramento feito sempre na região de fato dobrada.

Com o objetivo de estudar a combinação dos esforços de tração e dobramento na recristalização do latão CuZn34, as figuras 5.25 até 5.28 mostram as fotomicrografias do latão após a pré-deformação em tração de 5%, de 20%, de 50% e de 80% do valor do alongamento uniforme acompanhado por dobramento e desdobração de 90°C, culminando com a realização do tratamento térmico de recozimento a 450°C durante 15 minutos.

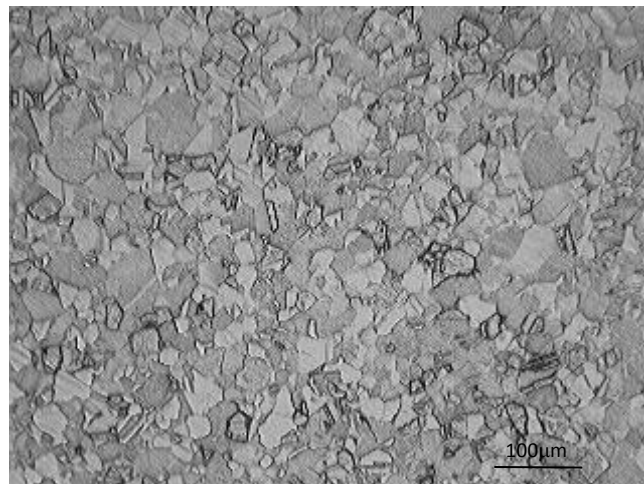


Figura 5.25- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,026$ , dobrado e desdobração de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

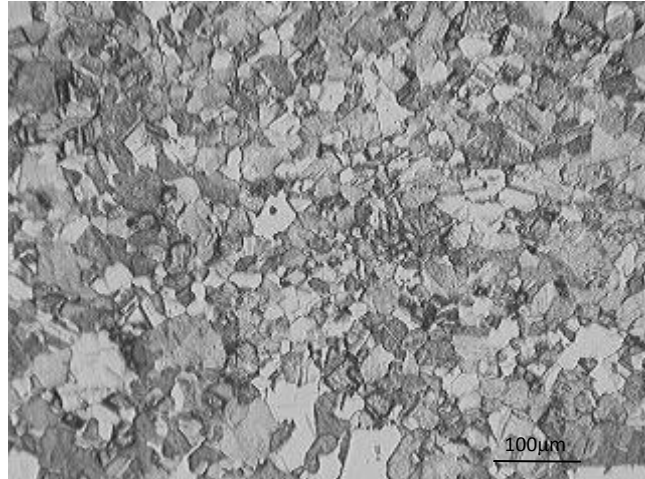


Figura 5.26- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,105$ , dobrado e desdobrado de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

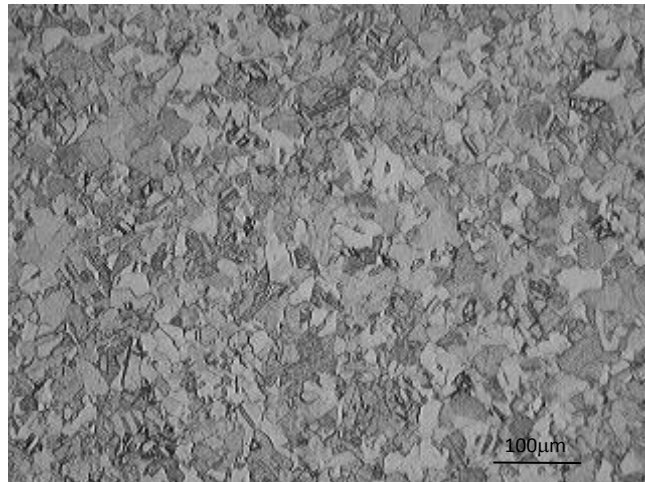


Figura 5.27- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,262$ , dobrado e desdobrado de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.



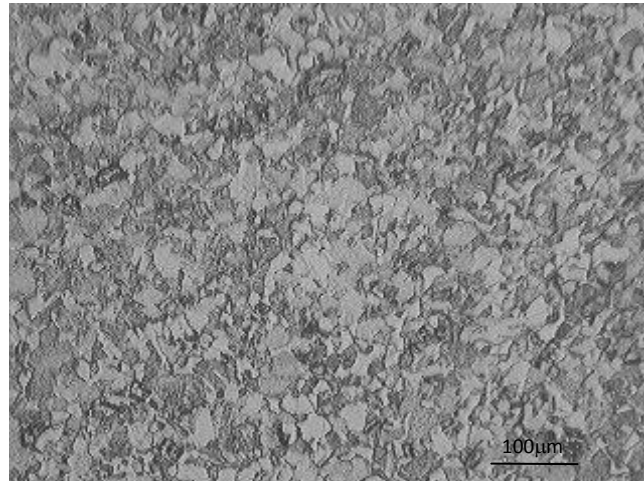


Figura 5.28- Fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,418$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

Comparando-se agora, o aspecto microestrutural apresentado pelo latão CuZn34 para o mesmo valor de pré-deformação em tração, nota-se que o dobramento, intermediário ao esforço de tração, também contribuiu para a recristalização do latão.

Da mesma forma que realizado para as amostras tracionadas, a amostra apenas dobradas e desdobradas de  $90^{\circ}$  e as amostras que foram sofrerem combinação de esforços de tração e do dobramento foram analisadas quanto à fração recristalizada. As figuras 5.29 até 5.33 são exemplos de uma das três fotomicrografias usadas na análise de cada caso.

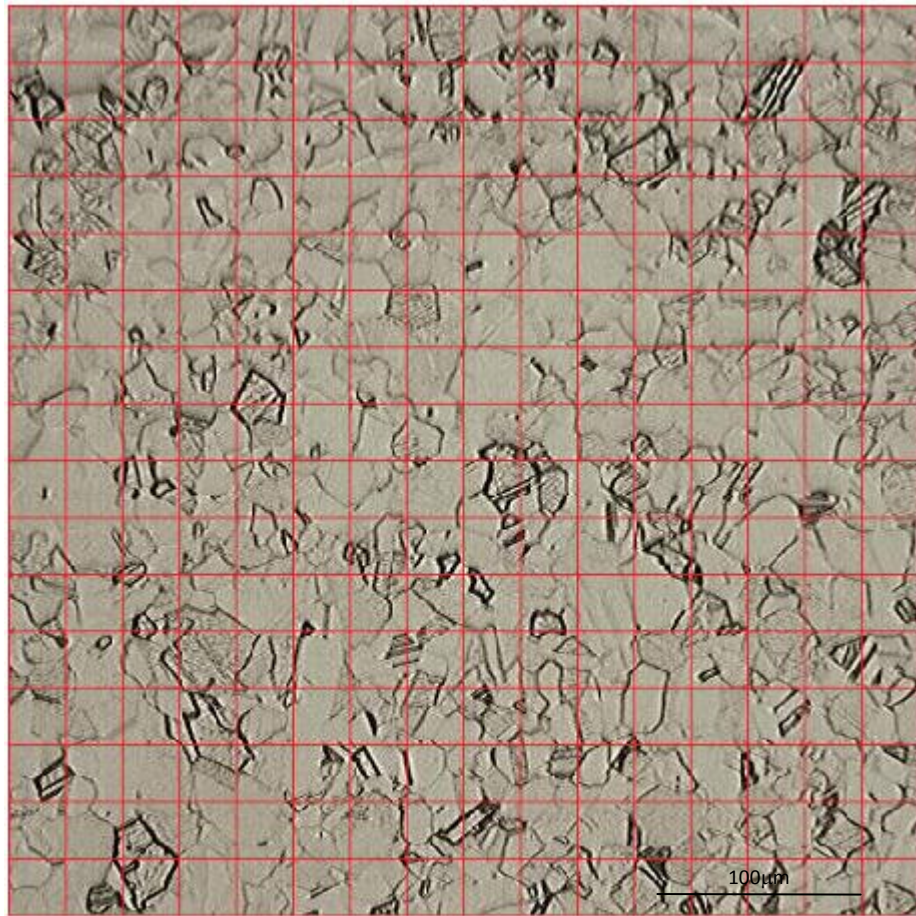


Figura 5.29- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 no estado como recebido em seguida dobrado e desdobrado de 90°C e recozido a 450°C durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

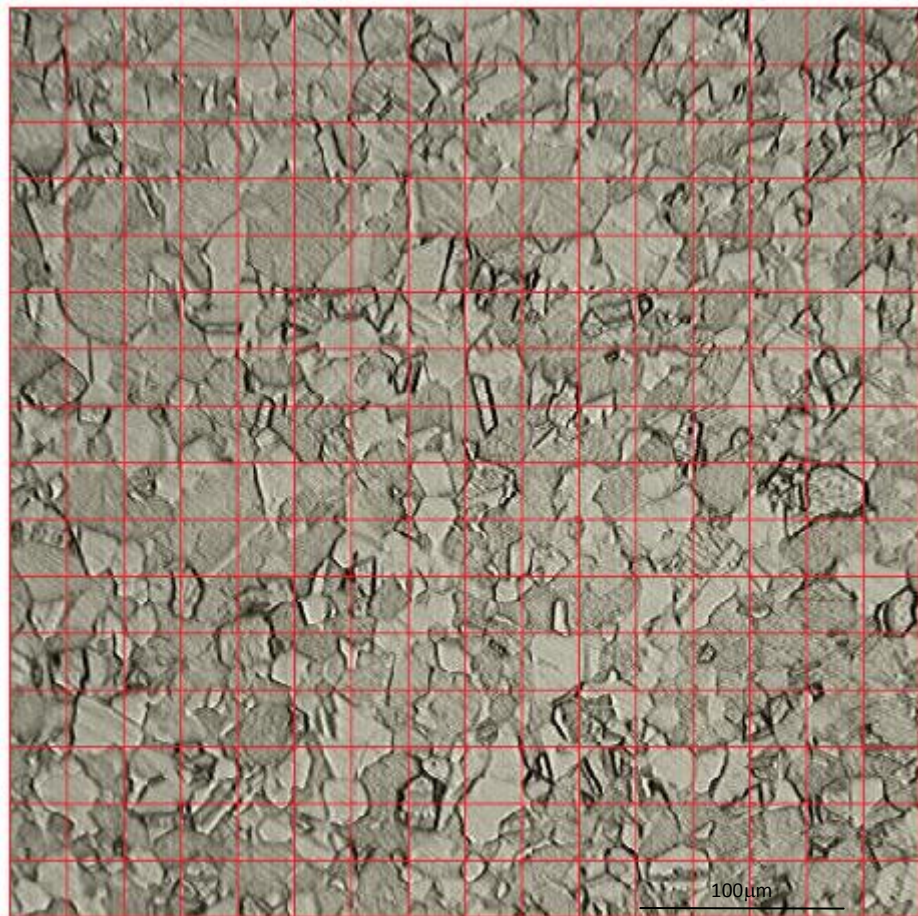


Figura 5.30- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $e = 0,026$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

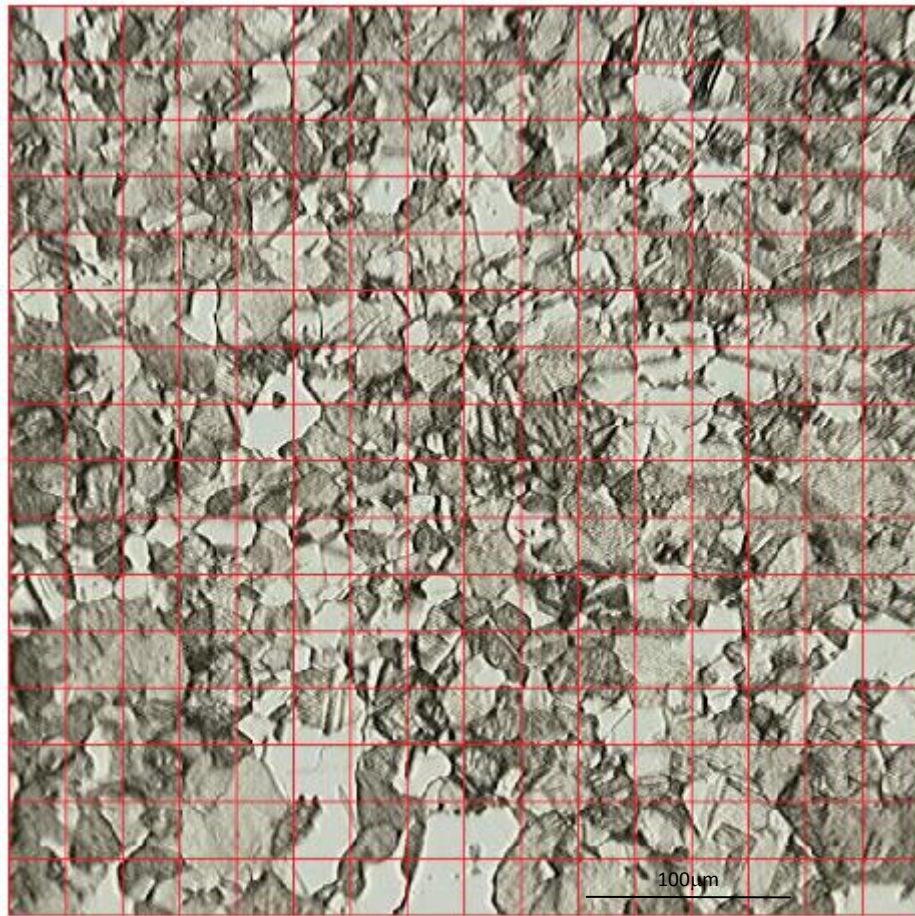


Figura 5.31- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré-deformado em tração de  $\epsilon = 0,105$ , dobrado e desdobrado de  $90^\circ\text{C}$  e recozido a  $450^\circ\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

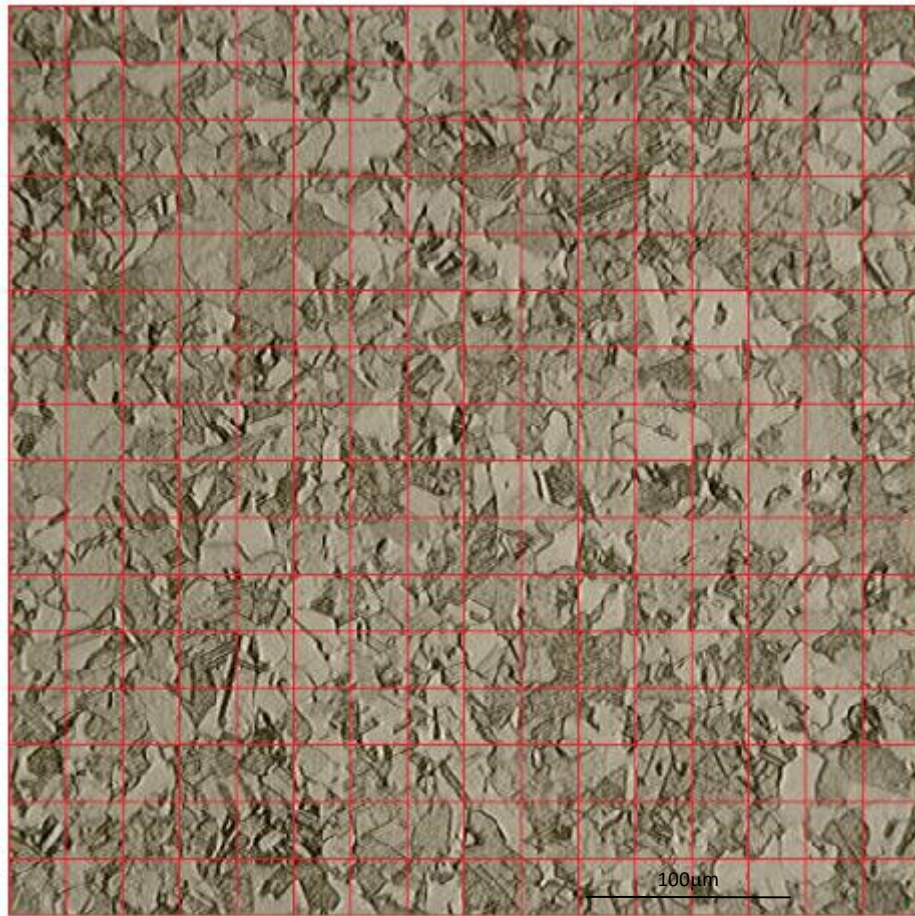


Figura 5.32- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré- deformado em tração de  $e = 0,262$ , dobrado e desdorado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

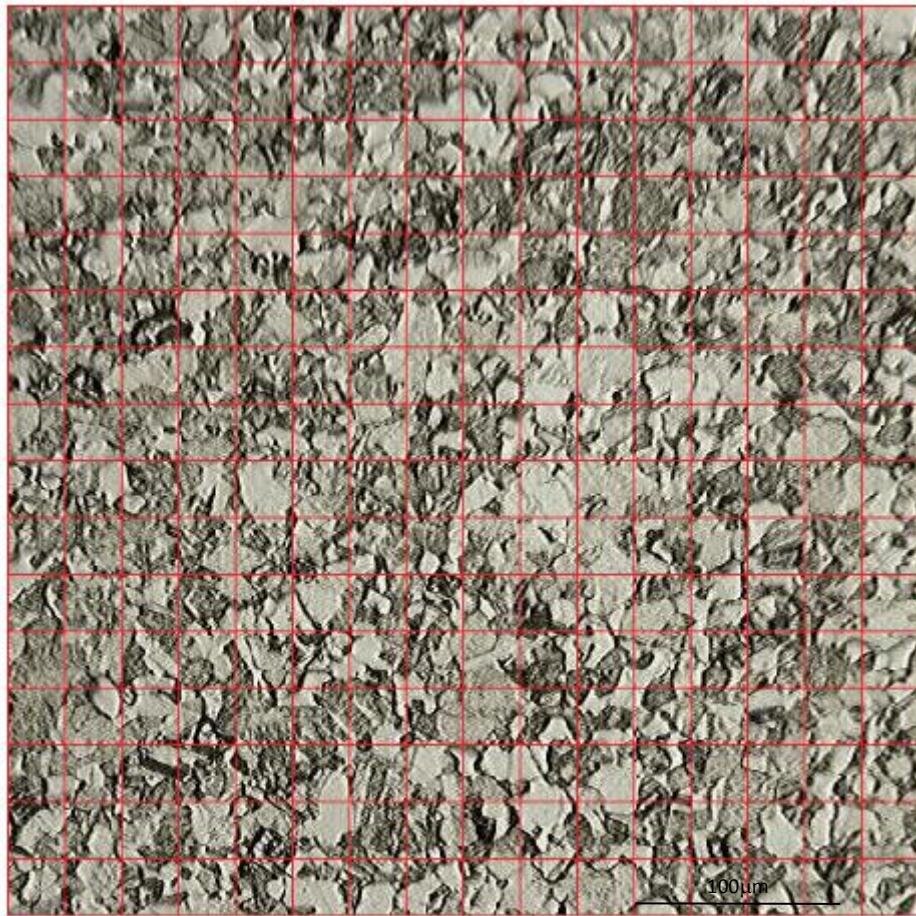


Figura 5.33- Malha de pontos acoplada à fotomicrografia do latão CuZn34 pré- deformado em tração de  $e = 0,418$ , dobrado e desdobrado de  $90^{\circ}\text{C}$  e recozido a  $450^{\circ}\text{C}$  durante 15min, microscópio óptico, ataque com reativo DiCobre.

Em termos numéricos, a Tabela V.4 apresenta a relação entre a quantidade de pontos recristalizados, a fração recristalizada e a quantidade pré-deformação em tração antes do dobramento, sendo o estado somente dobrado indicado pelo valor de pré-deformação em tração como sendo igual a 0% do valor do alongamento uniforme.

Tração e Dobramento + 90°/-		
90°	Pontos	Fração Recristalizada
0% de AU	17	0,08
5% de AU	34	0,15
20% de AU	63	0,28
50% de AU	61	0,27
80% de AU	198	0,88

Tabela V.4- Relação entre pontos recristalizados e quantidade de alongamento uniforme realizado antes do dobramento/desdobramento acompanhado pelo recozimento.

A figura 5.34 apresenta um gráfico com a relação entre a fração recristalizada e a quantidade de pré-deformação em tração antes do dobramento. Para 20% e 50% do valor do alongamento uniforme de pré-deformação em tração, a fração recristalizada é praticamente constante, mostrando não haver aumento de energia armazenada na matriz quando a deformação em tração aumenta de 20% de alongamento uniforme para 50% de alongamento uniforme, sendo o acréscimo maior detectado quando o valor da pré-deformação foi igual a 80% de AU.

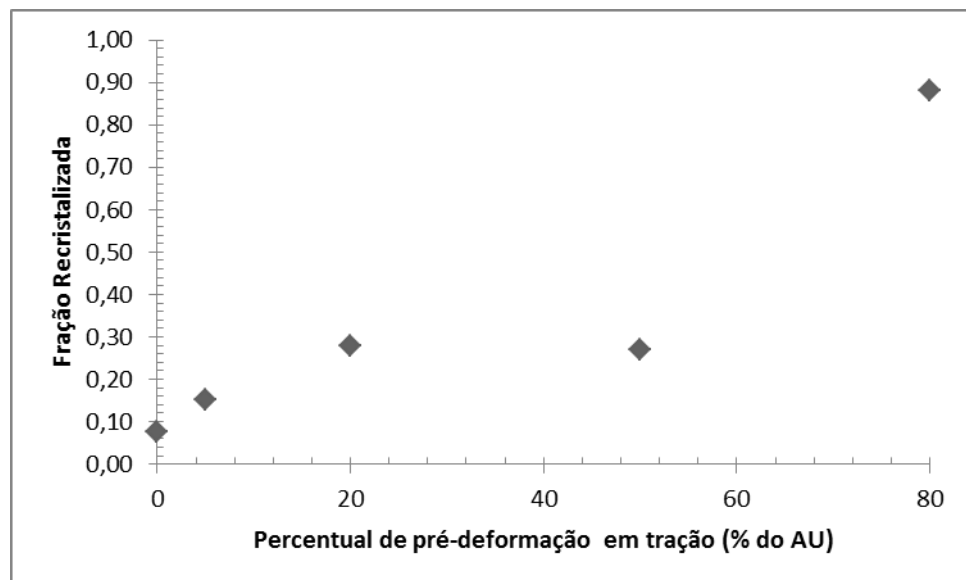


Figura 5.34- Gráfico da fração recristalizada em função do valor de pré-deformação em tração expresso pelo percentual do alongamento uniforme para o latão CuZn34 tracionado, dobrado/desdobrado de 90° e recozido a 450°C durante 15 minutos.

A Figura 5.35 exibe o gráfico que compara as duas situações de deformações realizadas antes do tratamento térmico de recozimento. Em (I) tem-se o gráfico da fração recristalizada em função da pré-deformação em tração sofrido antes do recozimento. Em (II) tem-se o gráfico da fração recristalizada em função da pré-deformação em tração para o material tracionado, dobrado e desdobrado de 90° e recozido a 450°C durante 15 minutos.

O gráfico da Figura 5.35 mostra o aumento geral da fração recristalizada com o aumento da quantidade de pré-formação em tração, sendo esse efeito maior para o material tracionado, dobrado/desdobrado e recozido (II).

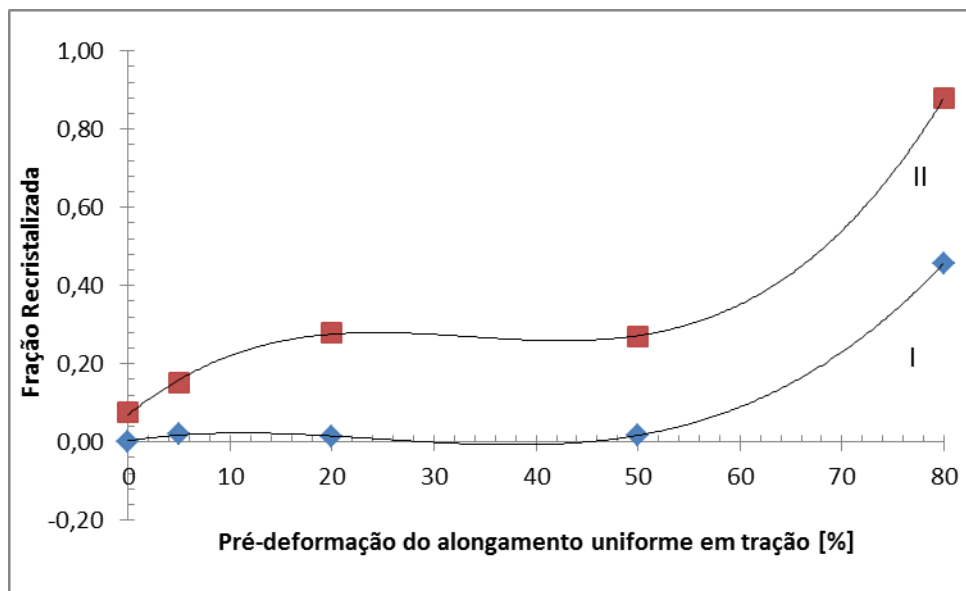


Figura 5.35- Gráfico da fração recristalizada em função da pré-deformação em tração em termos do percentual do alongamento uniforme para o latão: (I) pré- deformado em tração e recozido e (II) pré-deformado em tração, dobrado e desdobrado de 90° e recozido.

Para o material que foi apenas pré-deformado em tração e em seguida, recozido (I), verifica-se que a recristalização torna-se significativa apenas para o último valor de pré-deformação em tração, ou seja, 80% do alongamento uniforme.

Por outro lado, para o material que foi tracionado, dobrado e desdobrado de 90° e recozido (II), a recristalização torna-se evidente a partir da pré-deformação em tração de 20% do valor do alongamento uniforme do latão CuZn34.



Outro resultado da análise conjunta dos esforços de tração e de tração/compressão (dobramento) revela ainda que o aumento da quantidade de pré-deformação em tração para o material que será dobrado e desdobrado de  $90^\circ$  não provocou o acréscimo linear da fração de grãos recristalizados do latão CuZn34.

Contudo, verifica-se que o efeito do esforço mecânico de tração e de compressão, presentes na operação de dobramento e de desdobramento do latão CuZn34 na recristalização foi maior que o ocasionado pela aplicação do esforço mecânico tração, quando se compara a quantidade de grãos recristalizados para essas duas situações, como revelado a partir da análise da figura 5.35.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo da recristalização de chapas recozidas (estado original) do latão CuZn34, liga C26800, realizado a partir da imposição prévia do esforço mecânico de tração mediante a condução de ensaios de tração para quatro valores de pré-deformação em tração (deformação convencional de 0,0262; de 0,1046; de 0,2615 e de 0,4184) escolhidos em função do valor do alongamento uniforme do latão (AU igual a 0,5230) acompanhados pela execução de um tratamento térmico (aquecimento a 450°C durante 15 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno) ou intercalado por dobramento e desdobramento de 90° com uso de uma dobradeira mecânica revelaram:

a) que para a temperatura e o tempo de encharque escolhidos, a recristalização do latão apenas traçado (46% de grãos recristalizados) só foi percebida para o último valor de pré-deformação em tração (deformação convencional de 0,4184 ou 80% do valor do alongamento uniforme), indicando assim, ser necessária quantidade de pré-deformação em tração próxima a 80% do valor do alongamento uniforme para a recristalização do latão CuZn34 para a rota de processamento tração/recozimento;

b) que quando o esforço inicial aplicado ao material é alterado de tração para dobramento sem pré-deformação em tração (rota dobramento/recozimento), que a recristalização é ainda reduzida (8% de grãos recristalizados), mas superior à observada para a rota tração/recozimento até o valor de pré-deformação em tração de 50% de AU;

c) que a rota de processamento que combinou os esforços de tração e de tração/dobramento segundo a rota tração/dobramento/recozimento exibiu a maior quantidade de grãos recristalizados desde o menor valor de pré-deformação em tração (5% de AU), alcançando o valor máximo de fração recristalizado para o material pré-deformado em tração de 80% de AU com 88% de grãos recristalizados. Deste modo, verificou-se a aceleração da cinética de recristalização com a combinação dos esforços mecânicos e com o aumento da quantidade de pré-deformação em tração conduzida antes do dobramento e do tratamento térmico;

d) que a recristalização do latão CuZn34 foi maior quando o esforço mecânico anterior ao tratamento térmico foi o de dobramento (tração e compressão), quando comparado com a

tração, desconsiderando neste caso, a comparação da quantidade efetiva de deformação plástica sofrida pelo material;

e) que a combinação dos esforços mecânicos de tração e de dobramento foi, dentre as condições investigadas, a condição que provocou a maior quantidade de grãos recristalizados.

## REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, F.L. e CUNHA, M.A. *Estudo da recristalização secundária do aço silício de grão orientado*. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, pp. 32-36, 2006.

ARAÚJO, L.A. *Manual de Siderurgia*. Vol 2., 2ª ed. Arte e Ciência Editora, São Paulo/SP, pp. 313-324, 2005 .

ASHBY, M.A. e JONES, D.R.H. *Engenharia de materiais*. 3º ed., vol 2, Editora Elsevier, Rio de Janeiro/RJ, pp. 2-24, 2007.

ASTM E562-01 Standart Test Method for Determinig Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, 9th Edition. Ohio- American Society for Metal – ASTM International, v. 14, pp. 1-7, 2001.

ASTM E112-10 Standart Test Methods for Determinig Average Grain Size, ASTM International, 26p, 2010.

BARTOLOMÉ, R., JORGE-BADIOLA D., ASTIAZARÁN. J.I. e GUTIÉRREZ, I. *Flow stress behaviour, static recrystallisation and precipitation kinetics in a Nb-microalloyed steel after a strain reversal*. Materials Science and Engineering A344, pp. 340-347, Junho 2002.

CALLISTER Jr., W.D. *Ciência e engenharia de materiais- uma introdução*. 7ª ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro/RJ, pp. 38-157, 2008.

CASTRO, N.A.; LANDGRAF, F.J.G.; CAMPOS, M.F. *Efeito de pequenas deformações e do recozimento em chapas de aço elétrico de grão orientado*. Anais do 61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração/ABM, pp. 2646-2653, julho 2006.

CETLIN, P.R. e HELMAN, H. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*, 2ª ed, Editora Artliber Editora, São Paulo/SP, pp. 15-41, 2008.

CHEN, S.P. e VAN DER ZWAAG, S. *A single-grain approach applied to the modeling of recrystallization kinetics for cold-rolled single-phase metals*. Metallurgical and Materials Transactions, 35A, pp.741-749, março 2004.

CHIAVERINI, V. *Tratamento térmico das ligas metálicas*. Editora da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração/ABM, São Paulo/SP, pp. 81-96, 2003.

COLPAERT, H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4ª ed, Editora Edgard Blucher, São Paulo/SP, pp.255-418, 2008.

COUTINHO, C.B. *Materiais metálicos para Engenharia*. 1ª ed, Fundação Christiano Ottoni QFCO, Belo Horizonte/MG, pp. 61-66, 1992.

COUTINHO, T.A. *Metalografia de não-ferrosos- análise e prática*. 1ª ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo/SP, pp. 41-58, 1924.

DOHERTY, R.D; HUGHES, D.A.; HUMPHREYS, F.J; JONAS, J.J.; JUUL JENSEN, D.; KASSNER, M.E; KING, W.E.; MCNELLEY, T.R.; MCQUEEN, H.J; ROLLETT, A.D. *Current issues in recrystallization- a review*. Materials Science and Engineering A238, pp. 219-274, 1997.

GARCIA, A; SPIM, J.A.; SANTOS. C.A. *Ensaaios dos materiais*. 1ª ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro/RJ, pp. 1-44, 2008.

HUMPHREYS, F.J., HATHERLY, M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. 2ª ed. Editora Elsevier. Reino Unido, pp. 215-243, 2004.

LOW, M.; LIMA, N.B.; KUNIOSHI, C.T. *Estudo do desenvolvimento da textura durante a recristalização primária de aços ferríticos por difração de raios x e difração de elétrons retroespalhados*. Anais do III Workshop sobre Textura, São Paulo/SP, pp. 36-46, 2006.

MOORE, H.D. *Materials and processes for NDT technology*. The American Society for Non-destructive Testing. Estados Unidos da América, pp. 36-46, 1981.

SAKHAROVA, N.A., FERNANDES, J.V., VIEIRA, M.F. *Strain path and work-hardening of brass*, Materials Science and Engineering, v. 507A, pp. 13-21, 2009.

SIDOR, Y., KOVAC F. e PETRYCHKA V. *Secondary recrystallization in non-oriented electrical steels*. Metalurgia, v. 44, pp. 169-174, 2005.

SILVA FILHO, M.C.; LINS, J.F.C.; RIOS, P.R.; BOTT, I.S.; BALDAM, C.A. *Estudo da cinética de recristalização de um aço microligado processado via ARB*. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, pp. 113-118, 2009.

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.

SHOCKMETAIS, site. Disponível em: <http://www.shockmetais.com.br/material/latao> Acesso em- 20/09/2011.

SZABO, P.J. *Effect of partial recrystallization on the grain size and grain boundary structure of austenitic steel*, Materials Characterization, pp. 3-10, 2011.

TOTTEN, G.E. *Steel Heat Treatment Handbook*. 2ª ed. Taylor & Francis Group, pp. 158-367, 2006.