

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ISABELA CARBONE ABUD

**ESTUDO DO EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DO LATÃO 60-40**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2020

ISABELA CARBONE ABUD

**ESTUDO DO EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DO LATÃO 60-40**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais na Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

LONDRINA
2020



TERMO DE APROVAÇÃO

ISABELA CARBONE ABUD

ESTUDO DO EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO LATÃO 60-40.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 30 de Novembro de 2020 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – DAEMA)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – DAEMA)

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – DAEMA)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa

(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Roberto e Luzia, que sempre fizeram de tudo para tornar todos os meus sonhos possíveis, sempre me apoiaram e me deram amor para enfrentar essa jornada de forma mais leve.

Gostaria também de agradecer a Deus, por nunca me abandonar e me abençoar com pessoas incríveis, com saúde e força.

Ao professor Fabiano pela orientação, por todo o apoio não somente durante este trabalho, como também, durante toda a graduação. Tem meu agradecimento e minha admiração eterna.

Ao técnico Filippe, que me ajudou na execução deste trabalho, com todo seu conhecimento e paciência.

Aos professores Odney e Silvia, foram eles os responsáveis por todo o amor que desenvolvi pela área de metais. Obrigada por todos os ensinamentos e conhecimentos passados.

Agradeço aos meus amigos, por sempre me incentivarem nessa caminhada e nunca me abandonarem.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade e por todo o apoio durante a graduação.

RESUMO

ABUD, I. C. **Estudo do efeito do tamanho de grão no comportamento mecânico do latão 60-40**. 2020. 50 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

Ligas de cobre, como por exemplo o latão 60/40, apresentam excelentes trabalhabilidade a quente, boas combinações de propriedades mecânicas e ótima reciclabilidade. Por esses motivos são aplicadas na fabricação de placas, barras e perfis, além da utilização em indústrias químicas em placas de tubo de condensadores e trocadores de calor. Esses materiais dependem do tamanho de grão, e sua diferença pode alterar suas propriedades devendo assim ser controlada em função da sua aplicação final. Esse tamanho de grão é diretamente proporcional ao limite de escoamento do material fornecendo assim uma dependência que pode ser explicada através da equação empírica de Hall-Petch. Uma redução no tamanho do grão proporciona ao material uma maior resistência, porém uma menor ductilidade. Como forma de controlar esse tamanho de grão é realizado o tratamento térmico de recozimento. Por estas razões, este trabalho visa estudar os diferentes tamanhos de grão obtidos por meio do tratamento térmico de recozimento à 480 °C para diferentes tempos. A partir deste ponto, analisar através de ensaios de tração e dureza de que forma esse tratamento térmico em diferentes tempos gerou diferentes tamanhos de grão e assim influenciou nas propriedades mecânicas das amostras e, por meio da equação de Hall-Petch compreender a dependência do limite de escoamento com o tamanho do grão.

Palavras-chave: Tamanho de grão. Recozimento. Latão. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

ABUD, I. C. **Study of the effect of grain size on the mechanical behavior of 60-40 brass**. 2020. 50 f. Course completion work (Bachelor in Materials Engineering) – Academic Department of Materials Engineering. Federal University of Technology Paraná, Londrina, 2020.

Copper alloys, such as 60/40 brass, have excellent hot workability, good mechanical properties and excellent recyclability. For these reasons they are applied in the manufacture of plates, bars and profiles, in addition to use in applications in condenser tube plates and heat exchangers. These materials depend on the size of the grain, and their difference can change their properties and must therefore be controlled according to the final application. This grain size is directly proportional to the flow limit of the material, thus producing a dependency that can be explained through the empirical Hall-Petch equation. A reduction in grain size offers the material greater resistance, but less ductility. As a way of controlling this grain size, the annealing heat treatment is carried out. For these reasons, this work aims to study the different grain sizes obtained through the annealing heat treatment at 480 ° C for different times. From that point on, the analysis through tensile and hardness tests of how this heat treatment at different times generated different grain sizes and thus influenced the mechanical properties of and, using the Hall-Petch equation, to understand the dependence of the limit flow with grain size.

Keywords: Grain size. Annealing. Brass. Mechanical properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfis extrudados do latão 60/40.....	17
Figura 2 - Diagrama de fase da liga Cu-Zn.....	18
Figura 3 - Microestrutura do latão com fase alfa e beta.....	19
Figura 4 - Gráfico tensão vs deformação para o latão 60/40. (1) RA: 60,5% (2) RA: 37,2% (3) RA: 20,7% (4) RA 11,0% (5) RA: 50,0%, recozimento a 482° C durante 1 hora.....	21
Figura 5 – Fluxograma dos métodos utilizados.....	26
Figura 6 - Corpos de prova para ensaio de tração.....	27
Figura 7 - Corpo de prova do latão 60/40 durante o ensaio de tração.....	29
Figura 8 - Micrografia para determinação do tamanho de grão.....	30
Figura 9 – Imagens de MO das amostras recozidas a 480°C por (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 45 minutos, (d) 60 minutos e (e) 80 minutos de tratamento térmico.....	32
Figura 10 – Imagens de MO para (a) 15 minutos e (b) 80 minutos	33
Figura 11 - Micrografias de diferentes latões 60/40 demonstrando fase alfa e beta.....	34
Figura 12 - Diâmetro médio dos grãos em função do tempo de tratamento.....	35
Figura 13 - Variação da dureza com o tempo de tratamento	36
Figura 14 - Cinco amostras em diferentes tempos de tratamento térmico, após a ruptura.....	37
Figura 15 - Gráfico de limite de escoamento vs tempo de tratamento.....	38
Figura 16 - Gráfico do coeficiente de endurecimento por deformação vs tempo de tratamento.....	39
Figura 17 - Gráfico de Tensão vs Deformação para 15 minutos de tratamento térmico.....	43
Figura 18 - Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 15 minutos de tratamento térmico.....	43
Figura 19 - Gráfico de Tensão vs Deformação para 30 minutos de tratamento térmico.....	44

Figura 20 - Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 30 minutos de tratamento térmico.....	44
Figura 21 - Gráfico de Tensão vs Deformação para 45 minutos de tratamento térmico.....	45
Figura 22 - Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 45 minutos de tratamento térmico.....	45
Figura 23 - Gráfico de Tensão vs Deformação para 60 minutos de tratamento térmico.....	46
Figura 24 - Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 60 minutos de tratamento térmico.....	46
Figura 25 - Gráfico de Tensão vs Deformação para 80 minutos de tratamento térmico.....	47
Figura 26 - Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 80 minutos de tratamento térmico.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivo específico.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 COBRE E SUAS LIGAS.....	14
2.1.1 Histórico.....	14
2.1.2 Importância Tecnológica.....	14
2.2 LATÃO.....	15
2.2.1 Composições e aplicações.....	16
2.2.2 Tratamento térmico do latão.....	18
2.2.3 Comportamento mecânico do latão.....	21
2.2.3.1 Relação de Hall-Petch.....	22
2.2.3.2 Comportamento mecânico no regime plástico uniforme.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 MATERIAS.....	25
3.2 MÉTODOS.....	25
3.2.1 Preparação dos corpos de prova.....	26
3.2.2 Tratamento térmico	27
3.2.3 Análise da microestrutura.....	27
3.2.4 Ensaio de dureza.....	28
3.2.5 Ensaio de tração.....	28
3.2.6 Determinação do tamanho de grão.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	31
4.2 ENSAIO DE DUREZA.....	36
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	37
5 CONCLUSÃO.....	41

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
APÊNDICE 1	43
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Existem diversas ligas a base de cobre, entre elas o latão com 60%Cu e 40%Zn, conhecido como latão Muntz que possui grande aplicação na indústria arquitetônica e na fabricação de ferramentas residenciais. Essa liga possui boa resistência a corrosão, boa condutividade elétrica e maior resistência mecânica quando comparada ao cobre puro.

O latão Muntz é uma liga bifásica, com a presença de uma fase alfa e uma fase beta em sua composição. Com a presença de cobre e zinco em sua composição, ocorre uma diferença de diâmetros atômicos que provocam distorções elásticas no reticulado cristalino. Os campos elásticos em torno do núcleo das discordâncias, e outros fatores, interagem com os campos elásticos associados a tais distorções, de forma que a mobilidade das discordâncias é prejudicada. O resultado é um material com maior resistência mecânica do que o metal puro.

Em um material policristalino, o tamanho de grão também é um significativo obstáculo para o movimento das discordâncias, de forma que materiais com grãos de menor tamanho são mais resistentes, embora com menor ductilidade, que aqueles com grãos maiores e mais dúcteis. A dependência entre o tamanho de grão e o limite de resistência ao escoamento dos materiais é geralmente explicada por uma relação proposta por Hall-Petch.

Tratamentos térmicos são recursos utilizados para controlar a microestrutura dos materiais. Entretanto, uma das dificuldades envolvidas no processamento do latão 60/40 é justamente controlar o tamanho de grão, para melhor ajustar suas propriedades mecânicas às exigências da aplicação desejada devido a sua estrutura bifásica.

Após o início da deformação plástica a baixa temperatura, metais como o latão 60/40 tendem a endurecer com a deformação, ou seja, a resistência mecânica aumenta. A descrição matemática do comportamento plástico uniforme do material (entre o início do escoamento e o início da estricção, num ensaio uniaxial de tração) é interessante para diversas finalidades, como processamento, controle da resistência do material e verificação da habilidade do material para endurecer com a deformação.

Propõe-se, nesse sentido, testar a adequação do modelo de Hollomon ao comportamento mecânico do material.

Desta forma, este trabalho visa estudar os efeitos do tamanho de grão do latão 60/40 sobre a resistência ao escoamento e sobre o comportamento plástico uniforme do material a partir de ensaios de tração e dureza.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é verificar como o tamanho do grão e outros microconstituintes irão influenciar nas propriedades mecânicas para um latão com 60% de cobre e 40% de zinco.

1.1.2 Objetivo específico

- Verificar os efeitos de diferentes tempos de recozimento a 480°C sobre a estrutura granular do material.
- Determinar as propriedades mecânicas do latão 60/40 com diferentes estruturas granulares, a partir de ensaios de tração, obtidas em função do tempo em que o tratamento térmico de recozimento foi realizado.
- Analisar o efeito do tamanho de grão sobre as propriedades mecânicas do latão 60/40.

1.2 JUSTIFICATIVA

O latão 60/40 é um importante material para engenharia, sendo que na maior parte dos casos as suas propriedades mecânicas estão entre as mais relevantes para determinada aplicação.

Entretanto, as propriedades mecânicas do material são dependentes das características da sua microestrutura, particularmente da estrutura granular. Assim, é importante estudar a relação entre a microestrutura do material – particularmente o tamanho de grão – e o comportamento mecânico do material, sendo o ensaio de tração um recurso muito útil e apropriado para este fim.

O tamanho do grão confere ao material características que podem ser controladas devido a diversos fatores, como por exemplo tratamentos térmicos e em função de endurecimento por deformação de diversas ligas. Para granulometrias muito finas, o material apresenta alta resistência mecânica, porém baixa ductilidade, sendo assim é necessário estudar maneiras de controlar esse crescimento de grão, como forma de garantir tanto uma boa resistência mecânica, como uma boa ductilidade.

Desta forma, este trabalho tem como justificativa controlar esse crescimento de grão para uma liga de latão 60/40, por meio do tratamento térmico de recozimento sob temperatura constante variando apenas o tempo de aquecimento. Através de ensaios mecânicos avaliar como o tamanho do grão irá influenciar nas propriedades mecânicas finais do material, para que seja obtido um desempenho adequado em suas aplicações, como por exemplo, na indústria de fabricação de ferramentas residenciais e na fabricação de trocadores de calor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COBRE E SUAS LIGAS

2.1.1 Histórico

Entre os metais, o cobre é o mais antigo, sendo conhecido pelo homem há mais de 10.000 anos, quando sua fusão foi marcada pelo nascimento da metalurgia. O cobre é um dos condutores elétricos mais utilizados mundialmente, perdendo em condutividade elétrica apenas para a prata. Além de bom condutor elétrico, o metal também é um bom condutor térmico, além de ser durável, resistente a corrosão, versátil e dúctil. Outra qualidade que o destaca é a sua praticamente infinita possibilidade de reciclagem mantendo suas propriedades (BUDINSKI; BUDINISKI, 2010).

Além de todas essas qualidades, o cobre também forma ligas metálicas com grande facilidade, existindo mais de 400 ligas de cobre disponíveis, possuindo então uma combinação única para variadas aplicações e exigências técnicas (ANTIMICROBIAL COPPER, *s.d.*; BUDINSKI; BUDINISKI, 2010).

Mesmo com uma grande variedade de ligas, as mais conhecidas são as de latão (termo genérico para ligas de cobre e zinco), bronze (termo genérico para ligas de cobre com estanho) e as ligas de cobre-níquel. (ANTIMICROBIAL COPPER, *s.d.*; BUDINSKI; BUDINISKI, 2010).

2.1.2 Importância tecnológica

O cobre e suas ligas são usadas em uma variedade de produtos hoje em dia, porém nem sempre foi assim. Em torno dos anos 80 a indústria de cobre passou por momentos difíceis, o que levantou questionamentos sobre sua viabilidade

necessitando assim, de ações no setor para que o mercado fosse valorizado novamente (U.S. CONGRESS, 1988).

Atualmente o cobre tem grande valor para a economia mundial, onde encontra múltiplas aplicações, desde equipamentos para veículos até distribuição de energia, tornando-o o terceiro metal mais utilizado no mundo (perdendo somente para o ferro e o alumínio). Devido a suas propriedades químicas, mecânicas e físicas, ele se torna valioso também para a indústria de construção civil e até produtos de consumo (U.S. CONGRESS, 1988).

2.2 LATÃO

O cobre puro é um metal macio e dúctil, o que o torna muito difícil de ser usinado, por outro lado é um material resistente a corrosão em diversas atmosferas. Para melhorar suas propriedades mecânicas são adicionados elementos de liga ao cobre. Dentre várias possibilidades, o cobre forma ligas importantes com o zinco, conhecidas como latão (U.S. CONGRESS, 1988).

É possível observar na tabela 1 as diversas aplicações das composições do latão e como sua diferença de composição altera diversas propriedades, como por exemplo resistência a tração, porcentagem de alongamento e até os diferentes nomes usados.

Tabela 1 - Tabela com diferentes composições do latão, suas aplicações e propriedades.

Número CDA	Nome Comum	Composição (%)					Condição	Resistência à tração (Mpa)	Alongamento (%)	Aplicações
		Cu	Zn	Sn	Pb	Mn				
220	Bronze Comercial	90	10			Chapa Macia	262	45	Fio de tela, hardware, parafusos, joalheria	
						Rígida				
						Chapa	441	4		
260	Latão cartucho	70	30			Mola Recozida	627	3	Munições, instrumentos musicais, tubulação	
						Chapa Rígida	365	47		
							524	7		
280	Latão Muntz	60	40			Laminado a quente	372	45	Trabalho arquitetônico, tubo de condensação	
						Laminado a frio	551	5		
360	Latão de Corte Livre	61.5	35.3		3	Macia Rígida	324	60	Peças de máquinas de parafuso	
675	Bronze Manganês	58.5	39	1	0.1	Barra macia, meio rígida	448	33	Discos de embreagem, hastes de válvulas	

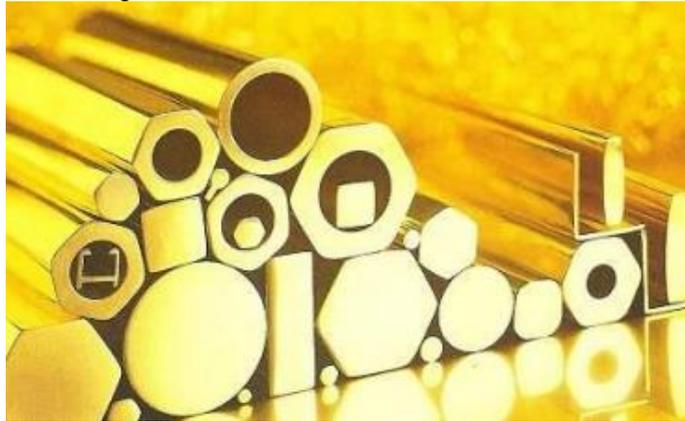
Fonte: Adaptado de Black, J. T; Kosher, R. A., 2011.

2.2.1 Composições e aplicações

Existem diversas ligas de latão, sendo que o que as diferencia é a composição de cobre e zinco. A diferença na composição altera as propriedades do material, como por exemplo sua condutividade elétrica e suas propriedades mecânicas (BUDINSKI; BUDINISKI, 2010).

A liga latão 60/40 é uma liga bifásica apresentando em sua composição uma fase alfa e uma fase beta. Estas ligas possuem uma ótima usinabilidade, permitindo um ótimo acabamento superficial, com baixo desgaste da ferramenta. É utilizada largamente em aplicações arquitetônicas, ferramentas residenciais e até mesmo em parafusos e válvulas utilizadas para condução de vapor. Devido a este material possuir uma boa conformabilidade a quente é possível fornecer os mais diversos perfis extrudados, como vistos na figura 1 (DA SILVA, 2015).

Figura 1- Perfis extrudados do latão 60/40.



Fonte: Da Silva, M. R., 2015

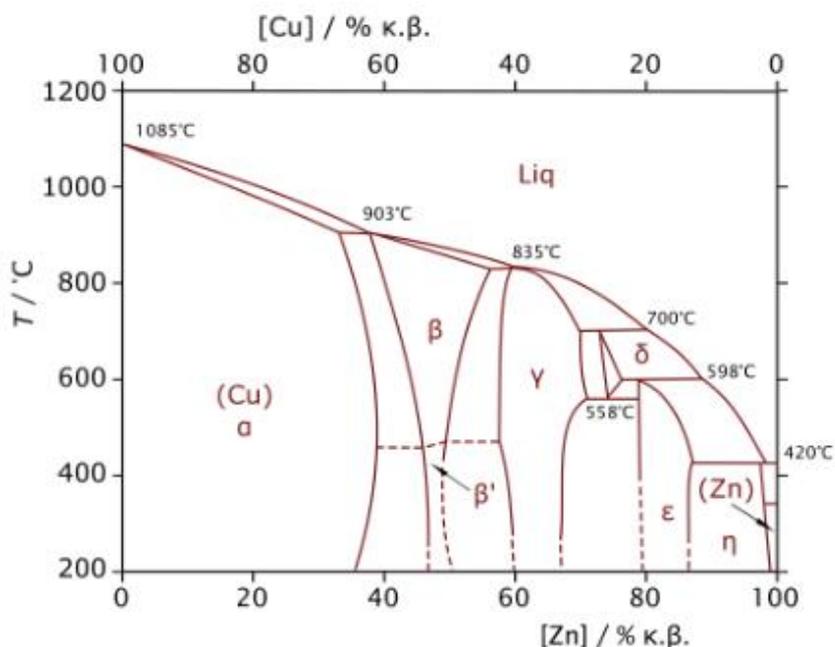
Na figura 2, apresenta o diagrama de equilíbrio de fases do sistema cobre-zinco. Observa-se que até cerca de 38% de zinco (temperatura ambiente) o latão é uma liga monofásica (fase alfa) – uma solução sólida com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), na qual os átomos de zinco ocupam posições substitucionais na matriz de cobre. A diferença de diâmetros atômicos entre os átomos de cobre e zinco provocam distorções elásticas no reticulado cristalino. Os campos elásticos em torno do núcleo das discordâncias, entre outros fatores, interagem com os campos elásticos associados a tais distorções, de forma que a mobilidade das discordâncias é prejudicada. O resultado é um material com maior resistência mecânica do que o metal puro (BUDINSKI; BUDINSKI, 2010; CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

Com teores mais elevados de zinco, começa a formar-se a fase beta, com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), tal fase é mais resistente que a fase alfa, porém menos dúctil. Tais ligas bifásicas são mais exploradas para serem trabalhadas a elevadas temperaturas em comparação com as ligas monofásicas (apenas fase alfa), podendo ser extrudadas em geometrias mais complexas (DA SILVA, 2015).

Para essa liga bifásica em aproximadamente 450°C - 470°C a fase β sofre uma transformação para a fase β' . Nesta transformação ocorre o arranjo ordenado da rede de átomos de zinco, onde anteriormente mostra-se aleatório. Essa alteração de fase não apresenta alterações na microestrutura e nem nas propriedades mecânicas do material (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 1992)

Em torno de 50% de zinco, a estrutura é predominantemente beta. As propriedades das fases alfa e beta são muito diferentes, sendo que o material com estrutura CFC é relativamente macio, dúctil e mais facilmente trabalhado a frio, enquanto o metal com estrutura CCC é mais duro e resistente (BUDINSKI; BUDINSKI, 2010; CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

Figura 2- Diagrama de fase da liga Cu-Zn.



Fonte: Callister, Rethwisch, 2012.

O latão Muntz é empregado em diversos setores, como em tubos para trocadores de calor, vergalhões para a solda e devido ao bom desempenho das ligas bifásicas nas conformações a quente, elas são usadas em larga escala para componentes que são submetidos a forjamento (DA SILVA, 2015).

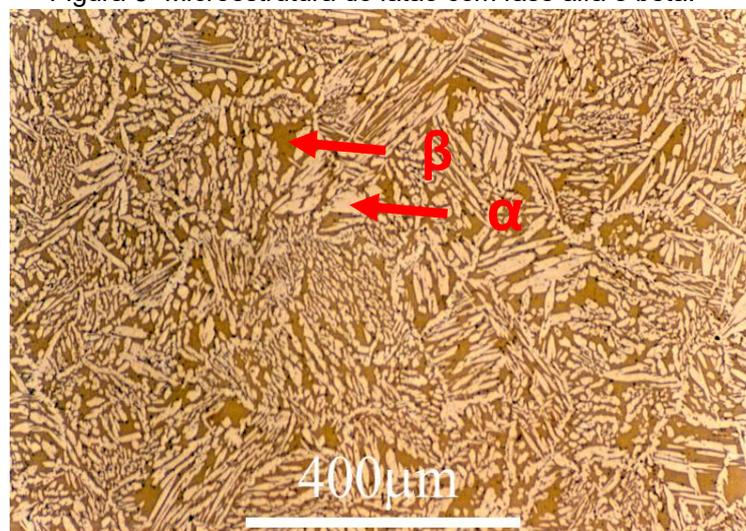
2.2.2 Tratamento térmico do latão

O tratamento térmico é um processo fundamental e muito importante para o controle das propriedades mecânicas das ligas a base de cobre, expandindo o seu campo de aplicação. Para fins mecânicos em engenharia, normalmente é desejável um material com alta resistência mecânica combinado com alta ductilidade. A deformação plástica imposta ao material por um processo de trabalho a frio pode proporcionar a elevação da resistência mecânica, porém, normalmente também implica na diminuição da ductilidade (CHIAVERINI, 2003).

O trabalho a frio é acompanhado do encruamento do metal, que é ocasionado pela interação e intersecção das discordâncias entre si e com outras barreiras que prejudicam a sua mobilidade através da rede cristalina, como, por exemplo, contornos de grão e distorções elásticas na rede cristalina. No processo também há considerável elevação da densidade de discordâncias, resultando, conseqüentemente, na elevação do estado de tensão interna (CALLISTER, RETHWISCH, 2012; MEYERS; CHAWLA, 2009).

Para o latão 60/40, ao utilizar uma rápida taxa de resfriamento após o tratamento térmico, ocorre a mudança da morfologia que é conhecida como microestrutura Widmanstätten. A fase primária alfa precipita primeiro e solidifica sob forma de agulhas ao longo das direções de crescimento preferencial, já a fase secundária alfa precipita a partir da solução sólida da fase beta, isso acontece a fim de minimizar a energia de deformação (PINTO, 2016). Pode-se observar este fenômeno na figura 3.

Figura 3- Microestrutura do latão com fase alfa e beta.



Fonte: University of Cambridge, 2002.

Para o latão com altos teores de zinco, como é o caso do latão 60/40, as propriedades para trabalho a frio são relativamente pobres, porém a deformação em altas temperaturas pode ser realizada com mais facilidade para o mesmo, o que acaba gerando uma ótima qualidade para o material (BLACK, KOSHER, 2011).

Na tabela 1 é possível observar que para o latão Muntz na condição de laminado a quente, sua resistência a tração mostra-se bem menor quando o mesmo material laminado a frio, porém esse tipo de laminação também resulta em um alongamento muito maior, isso ocorre devido a capacidade que o material possui em se deformar sob altas temperaturas, ocorrendo o aumento do tamanho de grão e aniquilando as discordâncias que surgem na deformação a frio.

Sabe-se que o aumento da resistência mecânica do metal com a deformação leva à redução da ductilidade. Uma maneira de diminuir esse efeito é através do tratamento térmico de recozimento, que tem como objetivo reduzir a dureza e recuperar a ductilidade. Recozimento é o processo de aquecimento do material, seguido de resfriamento lento, a fim de se obter a microestrutura de equilíbrio final (BANERJEE, 2017). Neste processo, novos grãos são nucleados, nos quais a densidade de discordâncias é significativamente reduzida, conseqüentemente reduzindo a resistência mecânica e aumentando a ductilidade. Para tanto, o material deve ser aquecido a uma temperatura superior à temperatura de recristalização do material que, no caso das ligas de latão, pode variar de 425°C a 750°C. (CHIAVERINI, 2003; VORT, 2012).

Deve-se sempre levar em consideração a velocidade de aquecimento, sendo que baixas velocidades tendem a promover o crescimento do grão, enquanto que altas taxas de aquecimento podem favorecer o aparecimento de fissuras. O resfriamento subsequente completa as alterações e confere ao material as propriedades mecânicas desejadas (CHIAVERINI, 1986).

Para o tratamento térmico de recozimento são utilizados fornos com aquecimento do tipo intermitente, de aquecimento contínuo ou fornos de sal, para aquecimentos superiores ou próximos a 705 °C (CHIAVERINI, 2003).

O objetivo principal do recozimento é o alívio de tensões e o ajuste do tamanho do grão (CHIAVERINI, 1986). Um fator bem marcante durante o recozimento é o aparecimento de maclas que são tipicamente formadas durante o

processamento a quente de metais de baixa energia de falha de empilhamento (MAHAJAN et al, 2007).

A microestrutura do latão submetido ao tratamento térmico pode variar de acordo com vários fatores, como, por exemplo, o tempo de duração do tratamento, a forma de resfriamento, a temperatura do recozimento, a porcentagem de trabalho a frio a que o material foi submetido, entre outros. Estes fatores interferem diretamente no tamanho do grão e conseqüentemente no limite de escoamento, limite de resistência, dureza e ductilidade (VOORT, 2002).

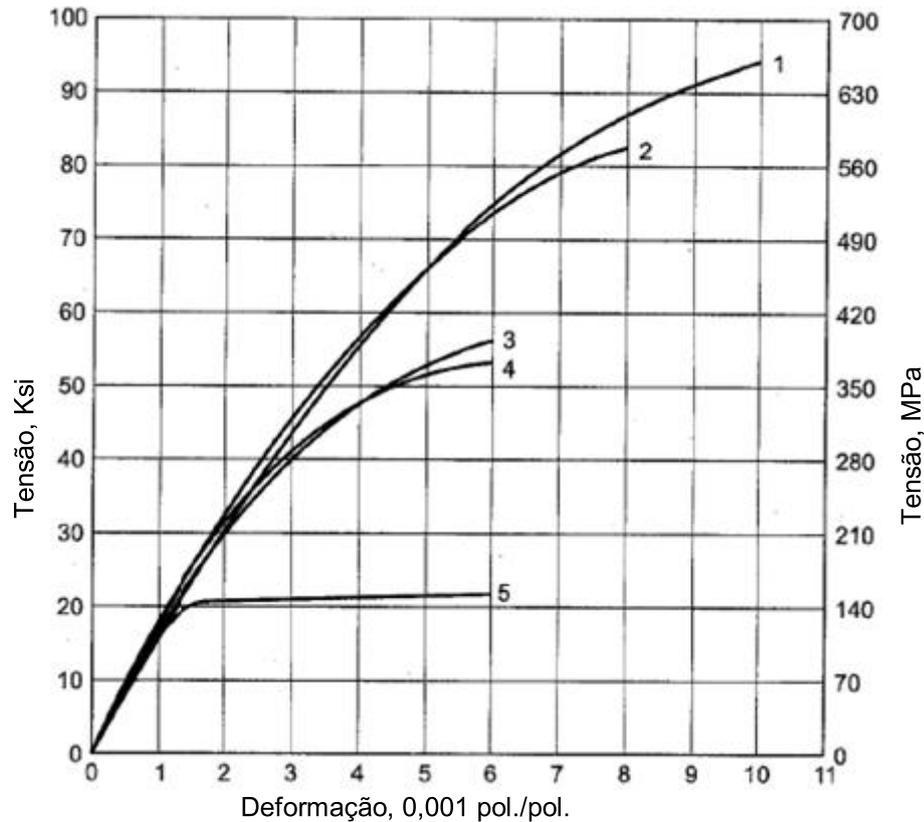
O tipo de tratamento térmico realizado influencia as propriedades finais do material e auxilia na obtenção das características desejadas para determinada aplicação, de forma que deve haver o controle efetivo dos parâmetros do tratamento, como, por exemplo a temperatura, o tempo e o modo de resfriamento, entre outros fatores (CHIAVERINI, 2003).

2.2.3 Comportamento mecânico do latão

Para analisar o comportamento mecânico de ligas metálicas, um dos principais ensaios realizados é o ensaio de tração, cujo resultado principal é a curva tensão vs deformação. A partir da curva tensão vs deformação é possível obter diversos dados característicos do material, como por exemplo, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração (LTR), o módulo de elasticidade e muitos outros parâmetros (CALLISTER, RETHWISCH, 2012).

Na figura 4, é apresentado curvas típicas tensão vs deformação (de engenharia) de um latão 60/40, somente com o comportamento elástico, onde as curvas 1, 2, 3 e 4 sofrem diferentes porcentagens de redução de área, sendo a 1 maior redução de área e a 4 menor redução. Já para a curva 5, observa-se uma grande redução de área e corresponde ao latão recozido a 482°C durante 1 hora. É possível observar que mesmo em diferentes porcentagens de redução de área, um tratamento de recozimento reduz mais significamente os limites de resistência a tração, quando comparado somente a um tratamento a frio (ATLAS OF STRESS-STRAIN CURVES, 2002).

Figura 4- Gráfico tensão vs deformação para o latão 60/40. (1) RA: 60,5% (2) RA: 37,2% (3) RA: 20,7% (4) RA 11,0% (5) RA: 50,0%, recozimento a 482° C durante 1 hora.



Fonte: Atlas of Stress-strain Curves, 2002.

2.2.3.1 Relação de Hall-Petch

O refinamento da estrutura granular (redução do tamanho de grão) proporciona significativo aumento de resistência ao metal. No início dos anos 1950's Hall e Petch propuseram uma relação empírica relacionando o tamanho de grão com o limite de resistência ao escoamento inicial do material (THOMPSON, 1973; CORDERO et al, 2016). Os estudos iniciais foram realizados com aços de baixo teor de carbono, mas posteriormente a relação de Hall-Petch, como ficou conhecida (Equação 1), demonstrou-se aplicável para outros metais puros e ligas metálicas (CORDERO et al, 2016).

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

onde, σ_y é o limite de escoamento, σ_0 e k são constantes que dependem da composição química e da microestrutura e d é o tamanho do grão. Essa equação prevê um aumento contínuo da força com a diminuição do tamanho de grão (CORDERO et al, 2016).

Quando se trata da curva de tensão vs deformação, vários parâmetros podem ser usados para descrever as características dessas curvas. Inicialmente no limite elástico, como já discutido anteriormente pode ser determinado o ponto do limite de escoamento. Após este ponto, o material começa a sofrer mecanismos de endurecimento representando uma deformação irreversível, e uma região chamada de região de plasticidade (MEYERS; CHAWLA, 2009).

2.2.3.2 Comportamento mecânico no regime plástico uniforme

Um sólido plástico real quando deformado plasticamente, se torna cada vez mais resistente a esses mecanismos de deformação necessitando assim de uma tensão adicional para ocorrer a deformação. Esses fenômenos são chamados de endurecimento por deformação (MEYERS; CHAWLA, 2009).

A teoria em torno da região de plasticidade dos materiais é bem mais complexa matematicamente do que quando se trata do comportamento de um sólido elástico. Para a deformação elástica a dependência se baseia somente no começo e no fim da tensão e deformação, já para região plástica, como os processos não são mais reversíveis existe um longo caminho até ruptura final (DIETER, 1988).

Para a deformação elástica, valores como a tensão e a deformação podem ser facilmente obtidos por meio do módulo de Young, parâmetro esse, que proporciona uma medida de rigidez de um material sólido, porém quando se trata de deformação plástica não é possível definir tais valores a partir do módulo. Sendo assim, para compreender o fenômeno de plasticidade, é necessário considerar uma série de complexos fatores (DIETER, 1988).

O comportamento plástico uniforme de um metal dúctil em um ensaio de tração, compreendido entre o início do escoamento e o início da estricção (parte convexa da curva tensão-deformação de engenharia), pode convenientemente ser representado pela Equação (2), uma relação de potência conhecida como equação de Hollomon (MEYERS; CHAWLA, 2009).

$$\sigma = k \varepsilon^n \quad (2)$$

onde, σ e ε são respectivamente, a tensão e a deformação verdadeiras, k é uma constante e n (<1) é o coeficiente de endurecimento por deformação, o qual depende da natureza do material, da deformação e da temperatura. (MEYERS; CHAWLA, 2009).

A equação de Hollomon pode ser usada para prever e caracterizar o comportamento mecânico do material e estudar os fatores que afetam a resistência de metais policristalinos (BOWEN; PARTRIDGE, 1974). Por exemplo, o coeficiente n é uma medida da habilidade do material para endurecer com a deformação em um ensaio de tração. Entretanto, os mesmos parâmetros k e n obtidos sob carregamento uniaxial podem ser aplicados para estudar o comportamento mecânico do material sob estados complexos de tensão, utilizando os conceitos de tensão e deformação efetivos (DIETER, 1988; DOWLING, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O material estudado trata-se de um latão 60/40, cuja composição típica é mostrada na tabela 2. O material foi adquirido no comércio local de metais, na forma de barras cilíndricas, com certificado de composição química.

Tabela 2 – Composição química do material (% em peso).

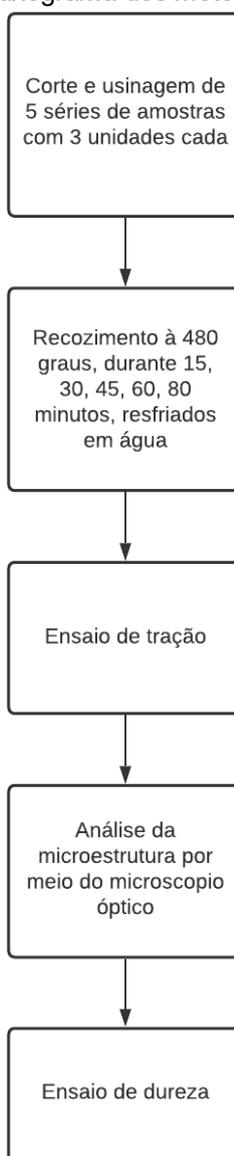
Cu	Pb	Fe	Zn
62,0 – 65,0	0,07	0,07	Restante

Fonte: Termomecânica, 2018.

3.2 MÉTODOS

Na figura 5 é apresentado o fluxograma das atividades empregadas para realização do projeto, onde cada uma das etapas é discutida a seguir.

Figura 5 – Fluxograma dos métodos utilizados.



Fonte: Autoria Própria

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

Foram preparadas cinco séries de amostras, cada uma com três unidades nominalmente idênticas. As séries foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento.

Os corpos de prova para ensaios de tração foram obtidos por usinagem, com as características geométricas definidas na norma ASTM E8/E8M e podem ser observados na figura 6.

Figura 6- Corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autorial Própria.

As amostras para análise metalográfica foram preparadas pelo método convencional: corte e embutimento em baquelite, lixamento (lixas com granulometria de 80, 220, 400, 600 e 1200), polimento com suspensão de alumina com partículas de 1 μ m.

3.2.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico de recozimento foi realizado em um forno tipo mufla da marca Jung, modelo LF0612. A temperatura foi de 480 °C e o tempos de permanência na mufla foram de 15, 30, 45, 60 e 80 minutos – uma série de amostras para cada tempo. As amostras foram resfriadas em água à temperatura ambiente, imediatamente após a retirada da mufla.

3.2.3 Análise de microestrutura

A superfície das amostras foi atacada com persulfato de amônio, a frio, durante 10 a 20 segundos, de forma a revelar a microestrutura. Este procedimento é o recomendado para ligas a base de Cu, no caso, o latão 60/40 (METALLOGRAPHIC HANDBOOK, 2017).

A observação da microestrutura das amostras foi realizada com auxílio de um microscópio óptico (MO) de luz refletida da marca Zeiss, modelo Axio Scope A1, com sistema de aquisição de imagens.

3.2.4 Ensaio de dureza

Foram realizados ensaios de dureza Vickers, com penetrador de diamante com formato de pirâmide de base quadrada e ângulo de 136° entre as faces opostas, com 100 g/F por 10 segundos, de acordo com a norma ASTM 92.

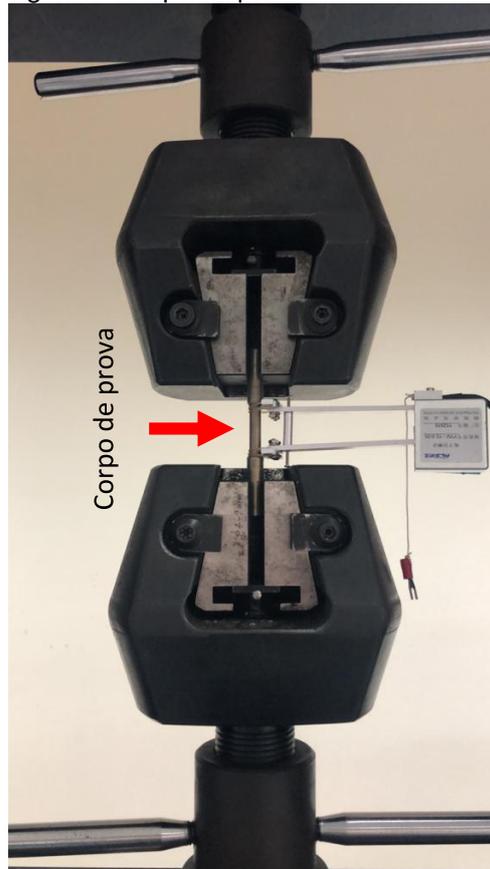
Para cada amostra já embutida, foram realizados 5 indentações e posteriormente retirada uma média dos resultados obtidos.

3.2.5 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma ASTM E8/E8M, à temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo WDW-100E, da empresa Shijin.

Na figura 7 é possível observar um corpo de prova durante o ensaio de tração, com a ajuda de um extensômetro para auxiliar no detalhamento dos resultados.

Figura 7- Corpo de prova do latão 60/40 durante o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

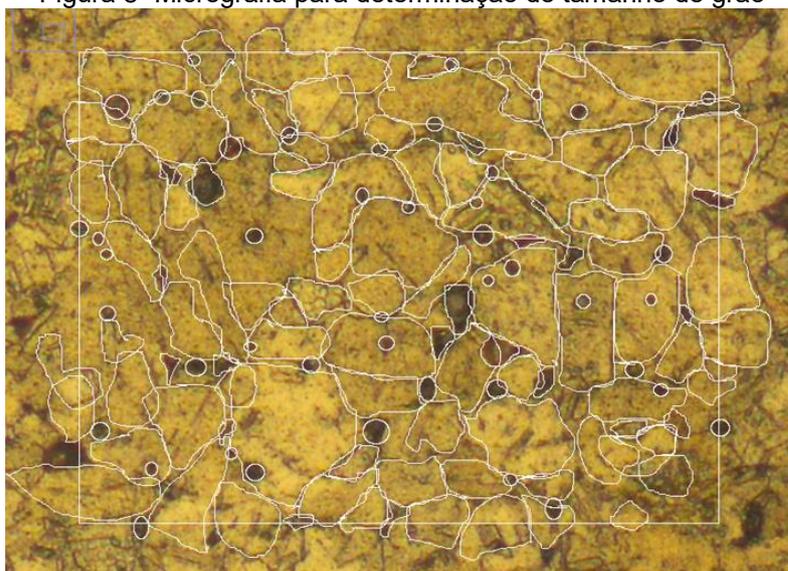
Todos os ensaios propostos foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (DAEMA) da UTFPR, Câmpus Londrina.

3.2.6 Determinação do tamanho de grão

Com o auxílio do *Image j*, foi selecionado uma imagem para cada tempo de tratamento térmico, essas imagens foram obtidas com auxílio de microscopia óptica. Após este processo, para iniciar a medição do tamanho de grão, foi selecionado um quadrado com medidas específicas no meio da micrografia.

Já com o quadrado dimensionado foi medido manualmente (com o auxílio da ferramenta *Image j*) os tamanhos de grão para as micrografias selecionadas. Na figura 8 é possível observar como essa medição foi realizada em uma micrografia.

Figura 8- Micrografia para determinação do tamanho de grão



Fonte: Aatoria Própria.

Através das micrografias obtidas foram medidos os grãos separadamente e analisados conforme a sua tonalidade. Esses dados foram tratados posteriormente para retirada da média da área obtida e do desvio padrão.

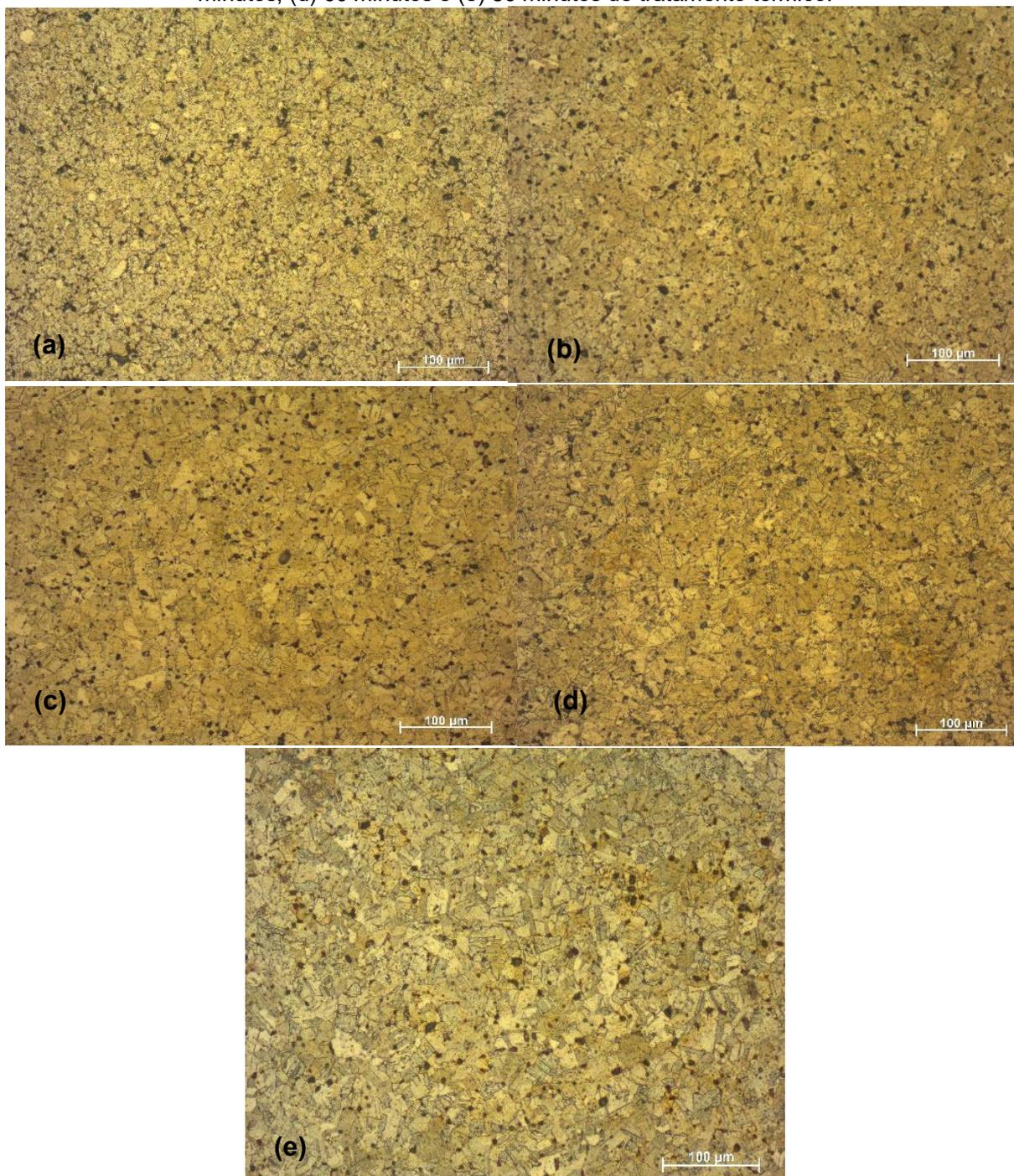
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A figura 9 apresenta micrografias do material após os diferentes tempos de tratamento, enquanto que na figura 10 são destacadas, em maior ampliação, as micrografias após 15 e 80 minutos de tratamento.

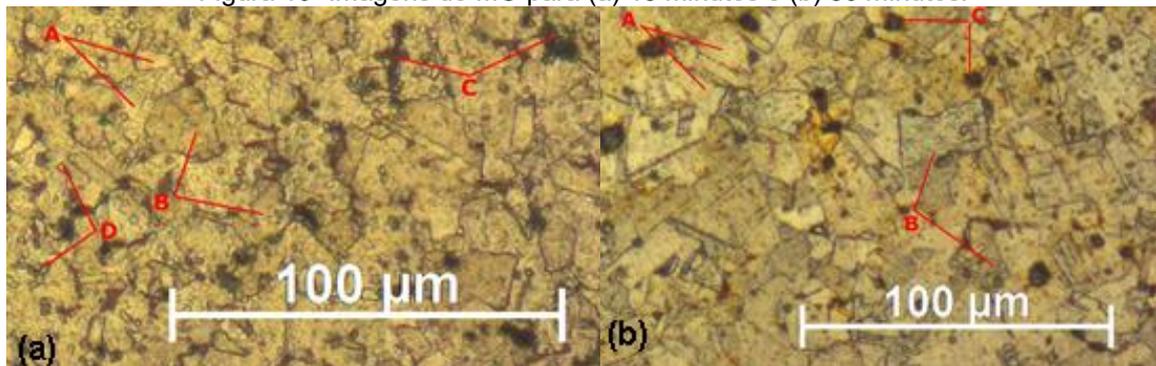
De acordo com o diagrama de equilíbrio de fases do sistema Cu-Zn (figura 3), latões com teores de zinco em torno de 40% são materiais bifásicos, cujas micrografias devem apresentar a fase alfa (CFC) e a fase beta (CCC), em maior ou menor proporção, conforme a composição específica da liga.

Figura 9- Imagens de MO das amostras recozidas a 480°C por: (a) 15 minutos, (b) 30 minutos, (c) 45 minutos, (d) 60 minutos e (e) 80 minutos de tratamento térmico.



Fonte: Autoria Própria

Figura 10- Imagens de MO para (a) 15 minutos e (b) 80 minutos.



Fonte: Autoria Própria

Os principais microconstituintes observados na figura 10 são grãos com geometria mais regular, alguns com tonalidade mais clara (A), outros com tonalidade mais escura (B), e outros microconstituintes enegrecidos de formato irregular (C). Além destes, na figura 10(a), observam-se inúmeros grãos minúsculos recém nucleados (D), evidenciando que o processo de recristalização do material está em curso.

Após 80 minutos de tratamento o processo de recristalização já está completo, além disso, os contornos dos grãos são em geral mais bem definidos após 80 minutos de tratamento, enquanto que no material após 15 minutos de tratamento muitos contornos apresentam-se deformados, provavelmente em virtude do processamento termomecânico prévio.

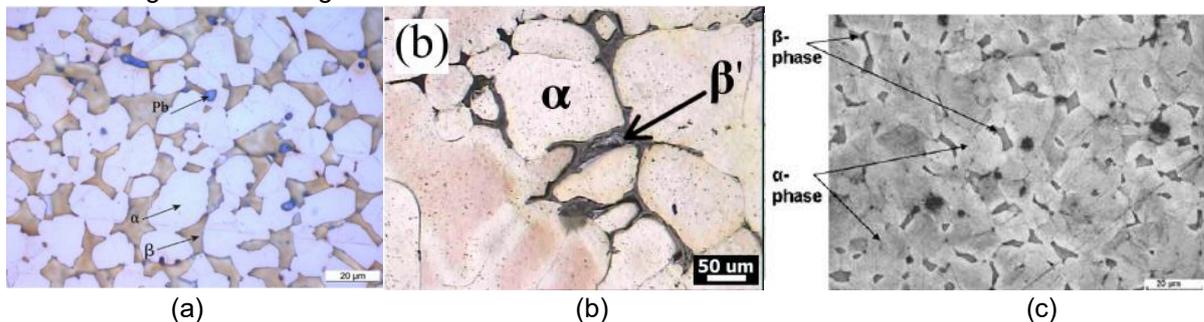
Segundo Pinto (2016, p.34), os grãos maiores mais claros (A) seriam cristais da fase beta, enquanto que os grãos maiores mais escuros seriam cristais da fase alfa. Por sua vez os microconstituintes enegrecidos seriam partículas de chumbo, segundo Toufatzis e colaboradores (2011), dado que os teores de chumbo atingem até 3%.

Entretanto, conforme a composição química típica do material estudado que consta na certificação do material (tabela 2), há apenas traços de chumbo no material. Isso parece incompatível com a proporção da área representada pelos pontos enegrecidos na microestrutura do material.

Além disso, mesmo que se leve em consideração o teor máximo de zinco (38%) possível no material, a proporção de fase beta na microestrutura deveria ser pequena, conforme o diagrama de equilíbrio de fases do sistema Cu-Zn (figura 2), porém é possível analisar que a proporção de grão mais escuros em relação aos grãos mais claros na figura 10 não é pequena. Dessa forma, requer-se uma leitura diferente da proposta de Pinto (2016, p.34) na microestrutura da matéria.

Neste caso, é razoável assumir que as manchas enegrecidas na microestrutura são, na verdade, cristais da fase beta, distribuídos entre os grãos da matriz de fase alfa, conforme indicado por Garcia (2009), Rajabi e Doostmohammadi (2018) e Pantazopoulos e Toulfatzis (2012). A figura 11 apresenta as micrografias obtidas por estes autores. Particularmente, a figura 11.c apresenta a micrografia de um latão CuZn36%Pb2%, com proporção de Zn equivalente ao material estudado neste trabalho, a menos do conteúdo de chumbo.

Figura 11- Micrografias de diferentes latões 60/40 demonstrando fase alfa e beta.



Fontes (com adaptações): (a) Garcia (2009); (b) Rajabi e Doostmohammadi (2018)

(c) Pantazopoulos e Toulfatzis (2012);

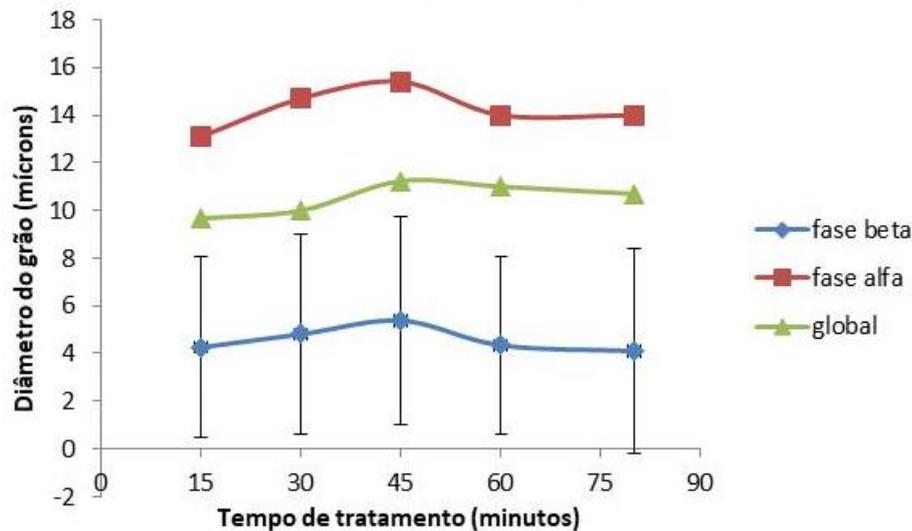
Com estas considerações, assume-se que na figura 10 os microconstituintes do tipo A e B são grãos da matriz de fase alfa, enquanto que as manchas escuras correspondem à fase beta, mais rica em zinco. A tabela 03 apresenta os resultados de tamanho de grão determinados por meio do software *Image J*, enquanto que a figura 12 é a representação gráfica dos dados.

Tabela 03- Diâmetro médio dos grãos das fase alfa e beta (μm).

Tempo (minutos)	Beta		Alfa		Global	
	Média (μm)	Desvio Padrão	Média (μm)	Desvio Padrão	Média (μm)	Desvio Padrão
15	4,26	3,79	13,1	13,2	9,67	12,0
30	4,81	4,20	14,7	11,6	10,00	11,3
45	5,38	4,39	15,4	13,7	11,24	12,9
60	4,34	3,70	14,0	12,0	11,00	11,8
80	4,10	4,33	14,0	12,3	10,70	12,0

Fonte: Autoria própria

Figura 12- Diâmetro médio dos grãos em função do tempo de tratamento.



Fonte: Autoria própria

Os resultados parecem indicar um ligeiro aumento do tamanho de grão entre 15 e 45 minutos de tratamento. Entretanto, levando-se em conta a dispersão dos resultados, como exemplificado pelas barras de erros padrão na curva correspondente à fase beta na figura 12, é mais razoável considerar que não há praticamente variação significativa do tamanho de grão, nos intervalos de tempo de tratamento considerado neste trabalho.

Dessa forma, os resultados sugerem que a nucleação e o crescimento dos novos grãos ocorreram principalmente entre 15 e 30 minutos de tratamento, tendo os novos grãos atingido o tamanho médio original neste intervalo de tempo.

4.2 ENSAIO DE DUREZA

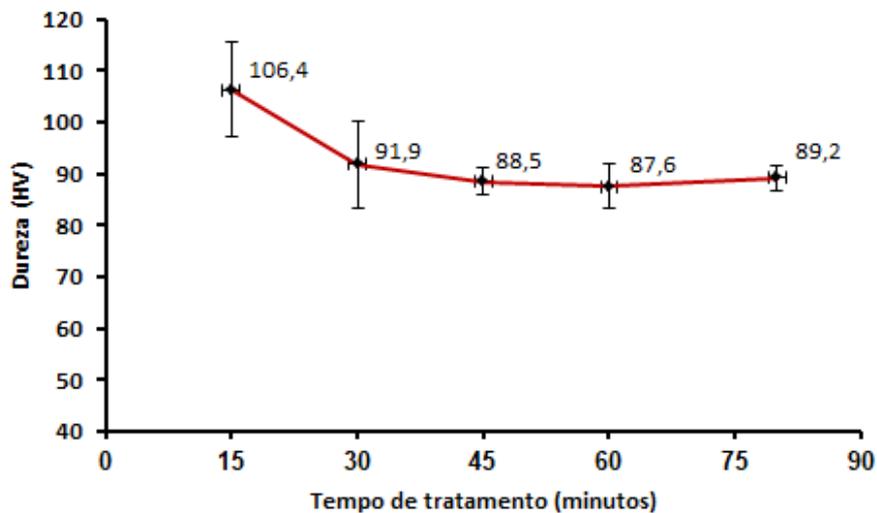
Os resultados dos ensaios de dureza são apresentados na tabela 4, enquanto a figura 13 tem-se a representação gráfica dos resultados.

Tabela 4- Dureza (HV) e desvio padrão para os diferentes tempos de tratamento térmico.

Tempo (minutos)	15	30	45	60	80
Média (HV)	106,4	91,9	88,5	87,6	89,2
Desvio padrão	9,2	8,5	2,7	4,2	2,4

Fonte: Autoria Própria

Figura 13- Variação da dureza com o tempo de tratamento.



Autor: Autoria própria

Pode-se observar que a dureza apresenta um declínio com o tempo de tratamento até 30 minutos de tratamento, estabilizando a partir deste tempo. Além disso, pode-se observar também que a dispersão dos valores diminuiu com o tempo de tratamento.

Estes resultados sugerem que mesmo após 15 minutos de tratamento o material ainda retém, pelo menos em parte, o seu estado interno inicial, resultado do processamento termomecânico a que tenha sido previamente submetido. Até 15 minutos o processo de recristalização é inexistente ou incipiente e o material se encontra no mesmo estado como recebido, ou próximo deste.

A partir de 15 minutos de tratamento a recristalização e o crescimento dos novos grãos formados são mais efetivos e o material torna-se mais uniforme e apresenta menor resistência à deformação, uma vez que os novos grãos possuem menor densidade de discordâncias.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

O material possui pronunciado comportamento dúctil, apresentando estricção e fratura tipo cone-taça, como pode ser observado na figura 14.

Figura 14- Cinco amostras em diferentes tempos de tratamento térmico, após a ruptura.



Fonte: Autoria Própria.

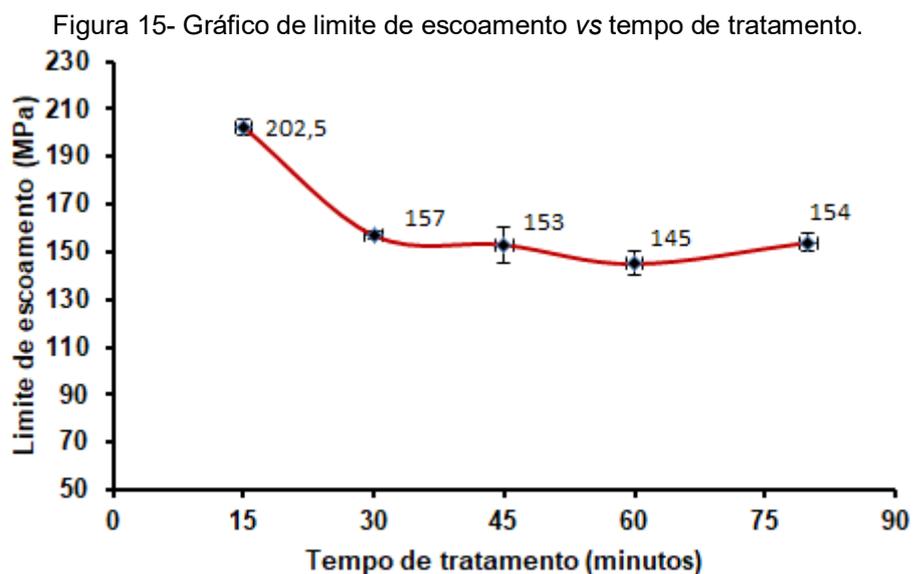
Na tabela 4 são apresentados os resultados médios dos limites de escoamento convencionais (0,2%) e os parâmetros n e K de Hollomon (Equação 2). Para a obtenção dos parâmetros de Hollomon, os logaritmos da tensão e da deformação no regime de plasticidade uniforme foram submetidos a análise de regressão linear simples, pelo método dos mínimos quadrados, com auxílio do programa Excel, sendo que o coeficiente de encruamento (n) corresponde a inclinação da reta, enquanto que o logaritmo de K corresponde ao intercepto da reta.

Na figura 15 demonstra-se esses resultados graficamente, com valores dos limites de escoamento obtidos, enquanto que a figura 16 é a representação gráfica dos resultados do coeficiente de endurecimento por deformação (n)

Tabela 4- Resultados do ensaio de tração.

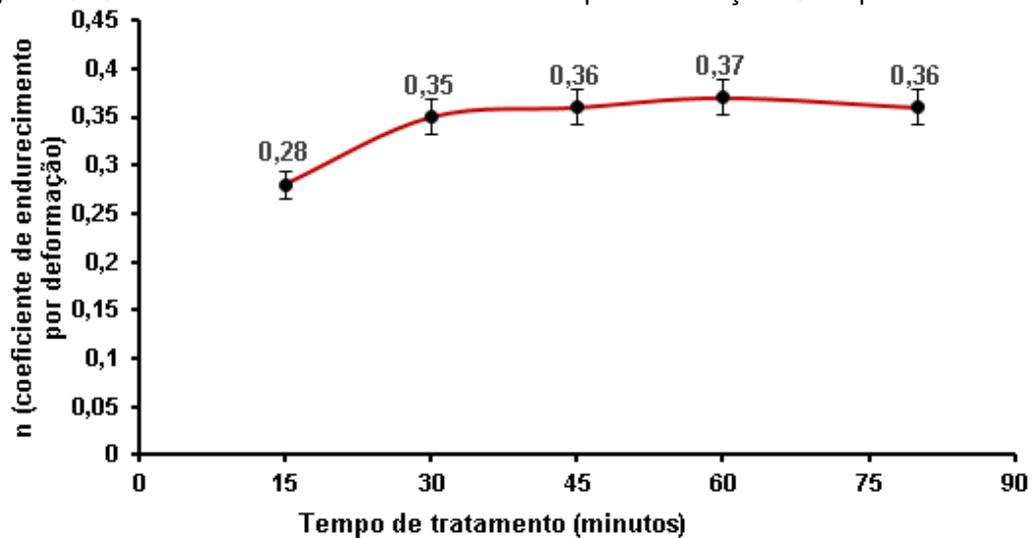
Tempo (minutos)	15	30	45	60	80
Limite de escoamento (MPa)	202,5	157,0	153,0	145,0	154,0
Desvio padrão	3,5	1,7	7,6	5,0	4,0
n (Hollomon)	0,28	0,35	0,36	0,37	0,36
K	706	723,3	717,0	726,6	705,0

Fonte: Autoria Própria.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 16- Gráfico do coeficiente de endurecimento por deformação vs tempo de tratamento.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados de limite de escoamento estão condizentes com o processo de recristalização discutido na análise microestrutural e com os resultados de dureza, ou seja, o limite de escoamento diminuiu no intervalo entre 15 minutos e 30 minutos de tratamento, permanecendo aproximadamente constante até o final do tratamento térmico. Além disso, se observa um acréscimo no coeficiente de endurecimento por deformação no intervalo entre 15 e 30 minutos de tratamento.

O coeficiente de endurecimento por deformação, como o próprio nome diz, é uma medida da habilidade do material para endurecer com a deformação, ou seja, quanto maior o valor de n mais persistente é o encruamento do material. O valor de n depende da deformação, mas os parâmetros n e K são de natureza empírica e requerem cautela na sua interpretação física (SCHON, 2013).

No Apêndice 2 é possível analisar melhor as curvas de tensão vs deformação e a curva de tensão vs deformação somente com o comportamento plástico para os 5 tempos de tratamento.

Segundo Pejkowski (2016), o coeficiente de endurecimento por deformação de um latão 60/40 sem tratamento térmico, fica próximo de 0,214. Este ponto auxilia na conclusão de que para o tempo de 15 minutos o material não sofreu alteração estrutural considerável.

Analisando Hall-Petch em função dos dados retirados dos ensaios de tração, esta análise fica prejudicada neste trabalho, pois por um lado até cerca de 30

minutos o material ainda apresenta os efeitos do processamento, enquanto que, por outro lado, não há variação importante no tamanho médio do grão e na resistência ao escoamento até 80 minutos de tratamento térmico.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises e ensaios realizados, foi possível concluir que:

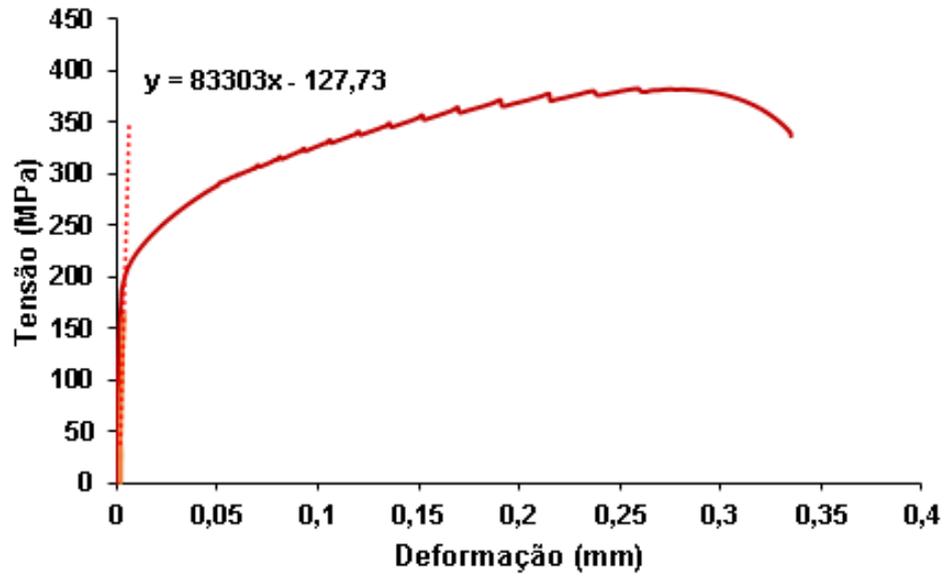
- O material recristalizou no intervalo de tempo até 30 minutos de tratamento térmico.
- O surgimento e o crescimento dos novos grãos no intervalo entre 15 e 30 minutos de tratamento foram tais que, não se observou variação importante no tamanho médio dos grãos entre os dois limites de tempo, mantendo-se o mesmo tamanho médio até 80 minutos de tratamento térmico.
- A dureza e a resistência ao escoamento do material apresentaram redução entre 15 e 30 minutos de tratamento, como efeito da recristalização do material, mantendo-se praticamente constantes até 80 minutos de tratamento.
- O coeficiente de endurecimento por deformação (n) apresentou elevação entre 15 e 30 minutos de tratamento térmico, mantendo-se também constante até 80 minutos de tratamento, como reflexo do processo de recristalização, por meio do qual os novos grãos apresentam maior densidade de discordância móveis e menor densidade total de discordâncias.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar aumentando as temperaturas de tratamento térmico com o objetivo de analisar melhor o crescimento da fase beta em matriz alfa.
- Análise da densidade das discordâncias feito com o auxílio de MET.
- Empregar maiores tempos para o tratamento térmico de recozimento, com o intuito de observar o contínuo crescimento do tamanho dos grãos.
- Reduzir os intervalos de tempo de tratamento até 30 minutos e prolongar o tempo de tratamento até 120 e 150 minutos.
- Analisar a microestrutura do material com auxílio de microscópio eletrônico de varredura com EBSD.
- Analisar por difração de Raios-X as possíveis fases presentes em função dos tempos empregados no recozimento.
- Estudar outros reagentes disponíveis que possam evidenciar melhor os contornos de grão.

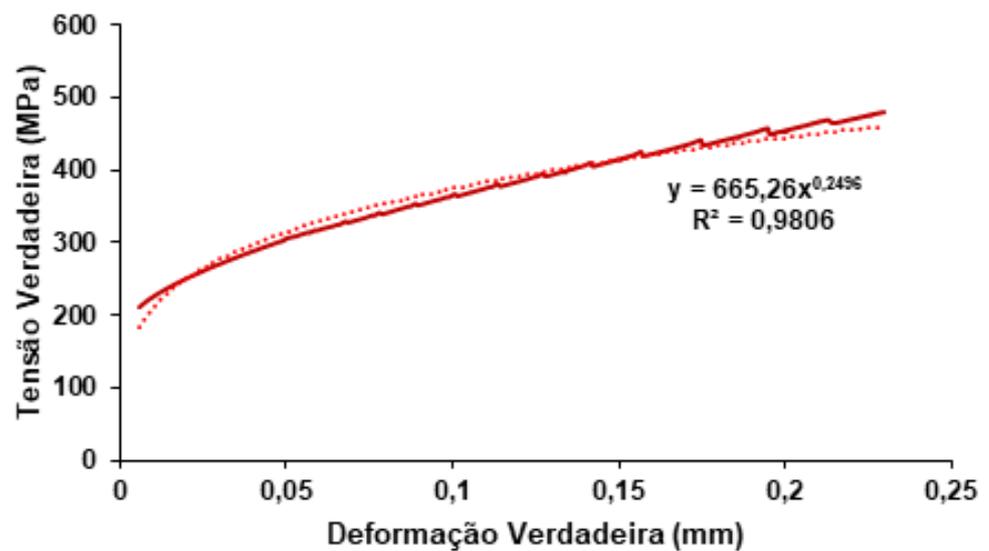
APÊNDICE 1

Figura 17- Gráfico de Tensão vs Deformação para 15 minutos de tratamento térmico.



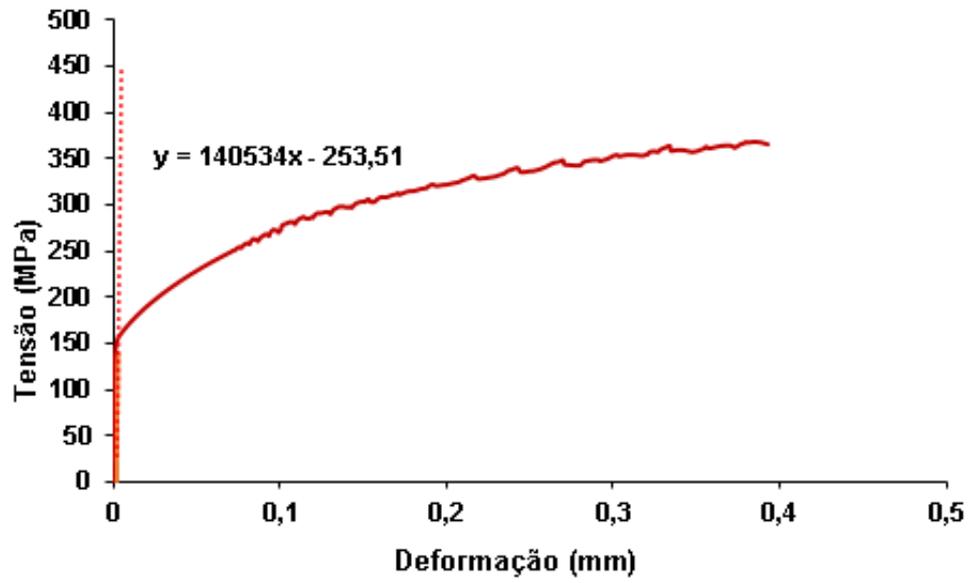
Fonte: Autoria Própria.

Figura 18- Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 15 minutos de tratamento térmico.



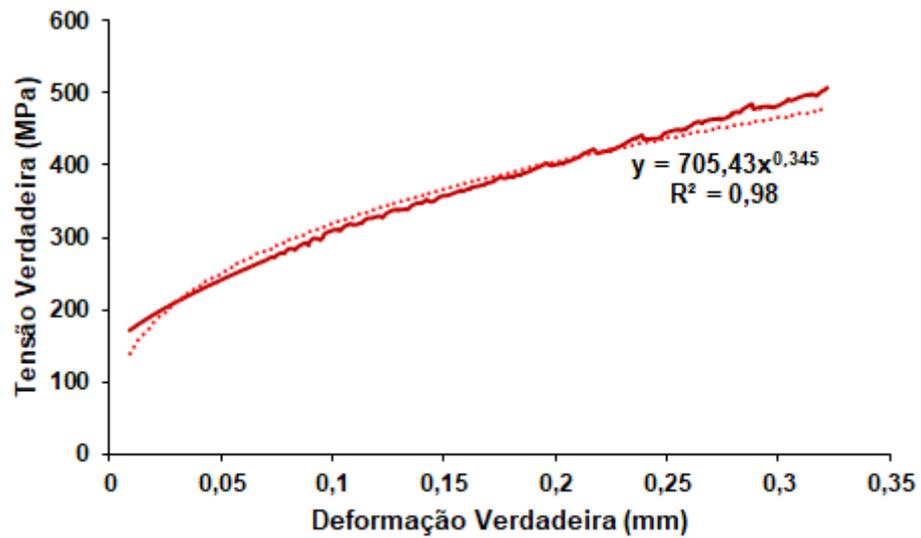
Fonte: Autoria Própria.

Figura 19- Gráfico de Tensão vs Deformação para 30 minutos de tratamento térmico.



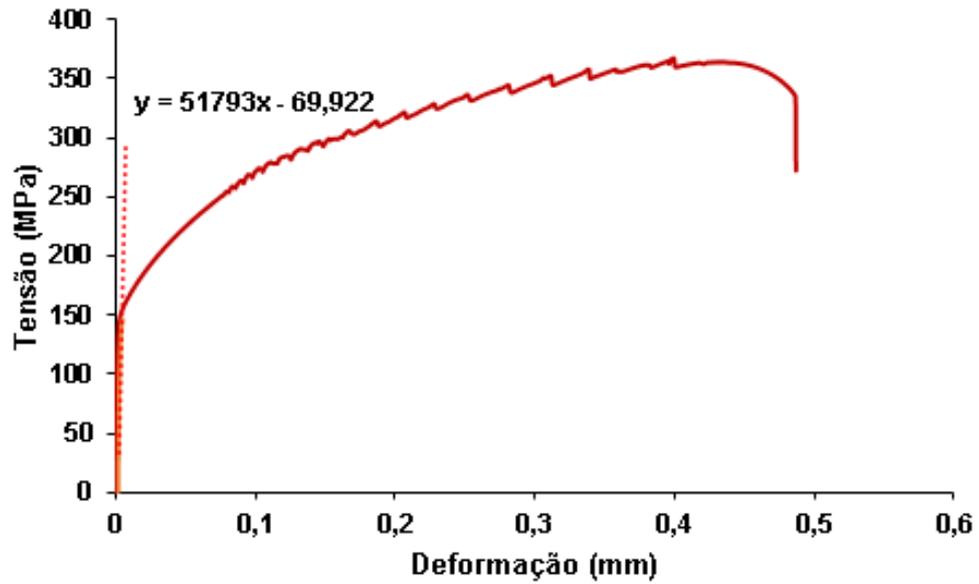
Fonte: Autoria Própria.

Figura 20- Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 30 minutos de tratamento térmico.



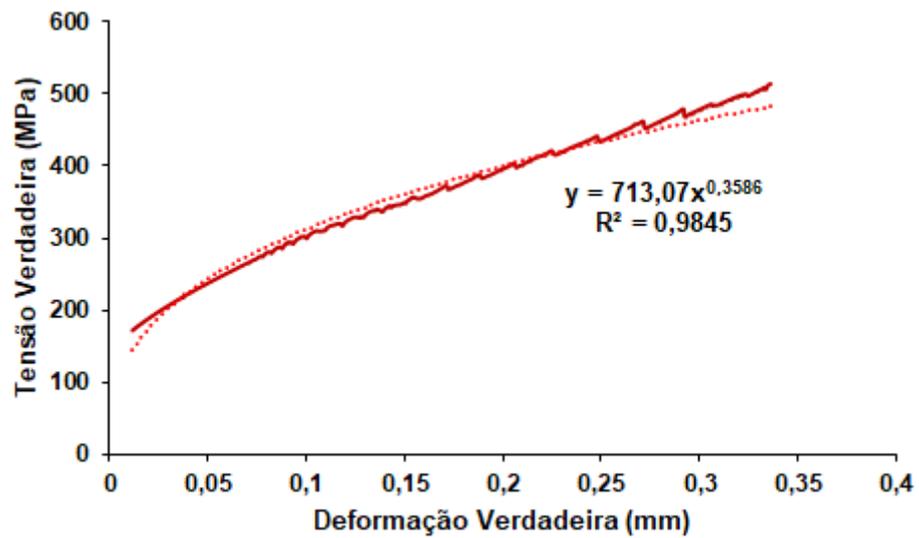
Fonte: Autoria Própria.

Figura 21- Gráfico de Tensão vs Deformação para 45 minutos de tratamento térmico.



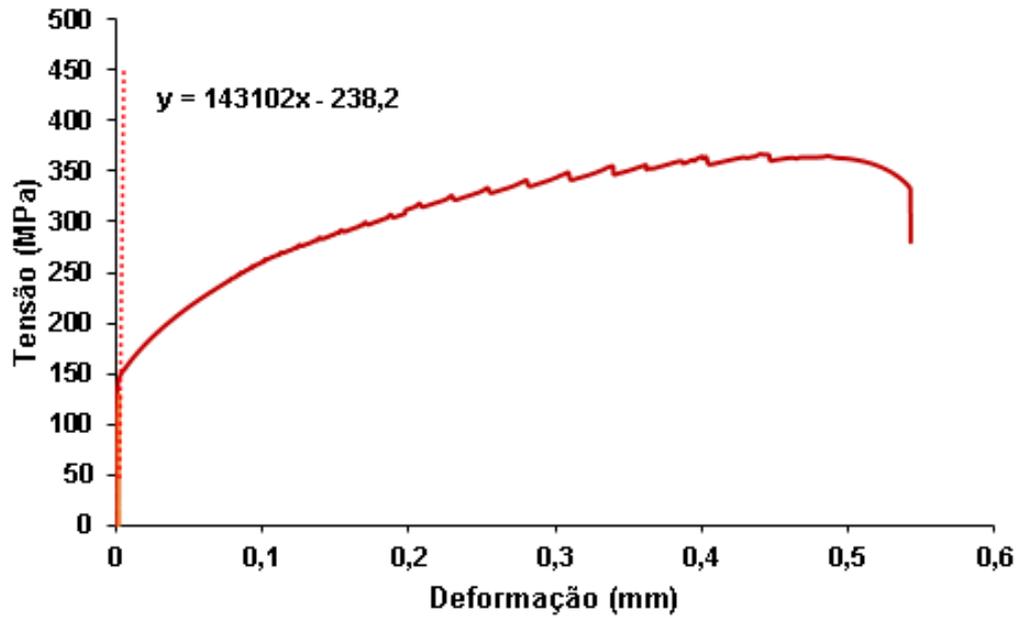
Fonte: Autoria Própria.

Figura 22- Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 45 minutos de tratamento térmico.



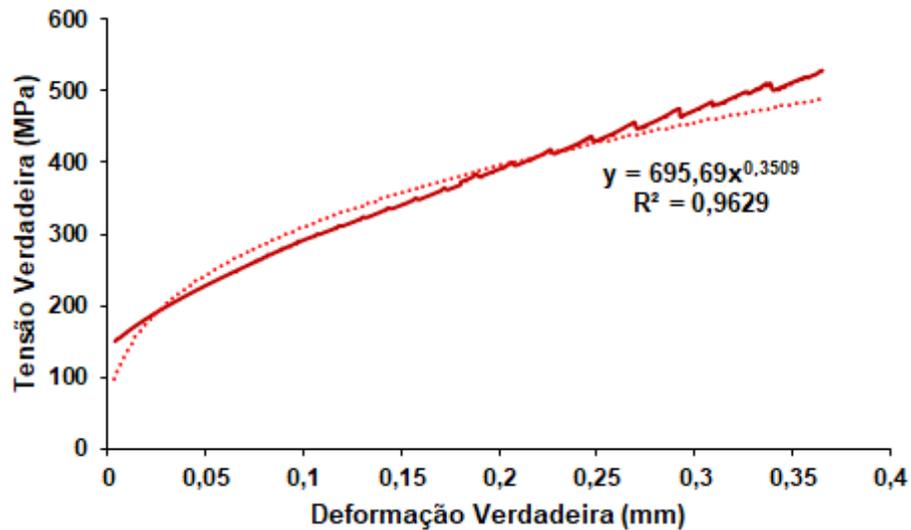
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23- Gráfico de Tensão vs Deformação para 60 minutos de tratamento térmico.



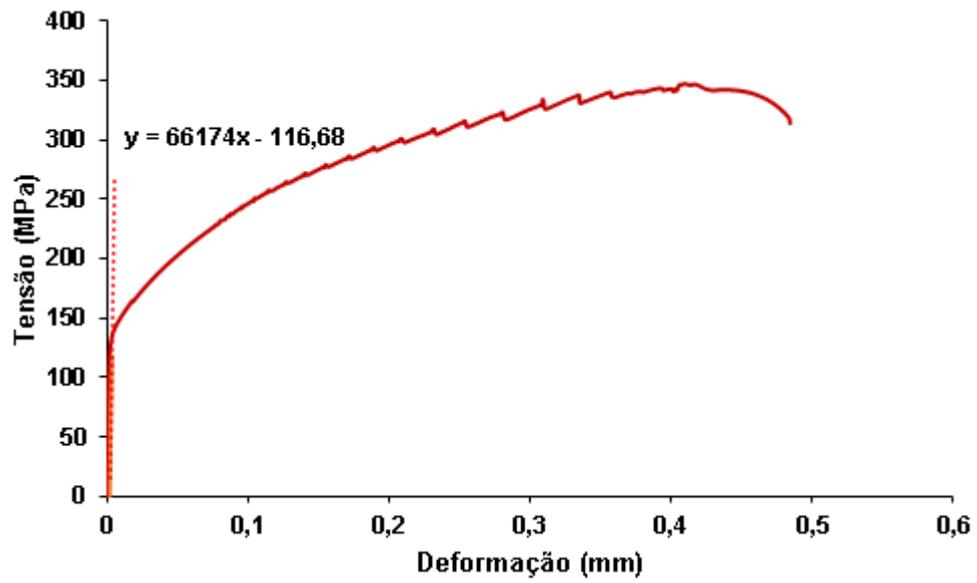
Fonte: Autoria Própria.

Figura 24- Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 60 minutos de tratamento térmico.



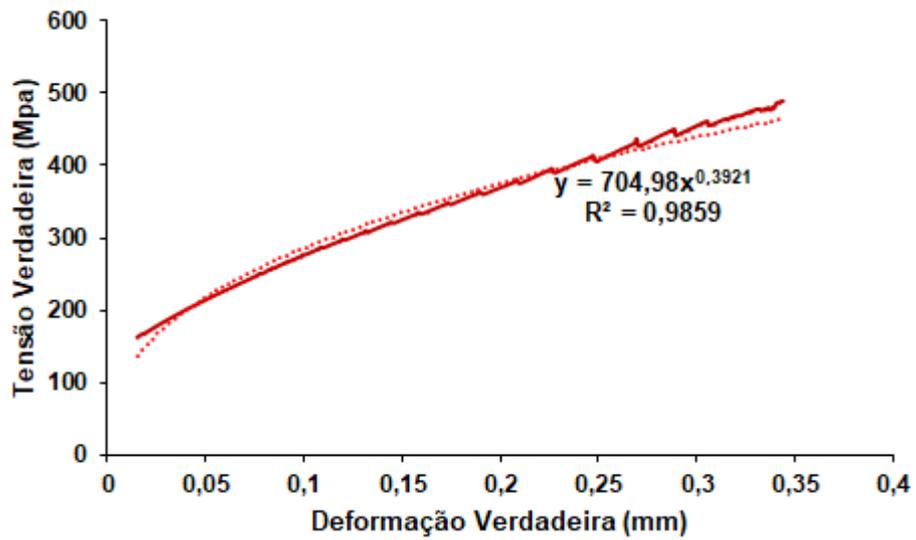
Fonte: Autoria Própria.

Figura 25- Gráfico de Tensão vs Deformação para 80 minutos de tratamento térmico.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 26- Gráfico de Tensão vs Deformação somente com comportamento plástico para 80 minutos de tratamento térmico.



Fonte: Autoria Própria.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – E112 – 96: Standard test method for Determining Average Grain Size, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – E92 – 82: Standard test method for Vickers hardness of metallic materials, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – E8/E8M - 13: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2013.

Antimicrobial Copper, **The copper advantage: A guide to working with copper and copper alloys**, sine datum. Disponível em: www.antimicrobialcopper.com.br.

ATLAS OF STRESS-STRAIN CURVES, 2ed. Materials Park, OH: ASM International, 202, p. 530

BANERJEE, M. K. Fundamentals of heat treating metals and alloys. Comprehensive Materials Finishing, Vol. 2, pp 1-49, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8SmlCgAAQBAJ&pg=RA1-PA49&lpg=RA1-PA49&dq=comprehensive+materials+finishing+%2B+banerjee&source=bl&ots=vNyMPHIMQY&sig=odiUbWtGCP03kJTgobKgjOth5A&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiO56Lx0ZLeAhUMiZAKHTF6BS4Q6AEwBHoECAQQAQ#v=onepage&q=comprehensive%20materials%20finishing%20%2B%20banerjee&f=false>.

BOWEN, A.W.; PARTRIDGE, P.G. **Limitations of the Hollomon strain-hardening equation.** Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 7, pp 969-978, 1974.

BUDINSKI, Kenneth G.; BUDINISKI, Michael K. **Engineering Materials: Properties and Selection.** 9. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2010. 774 p.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** LTC, v. 8º Edição, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento.** 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill Ltda, 1986. 315 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 272 p.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Equilibrium Diagrams: Select copper alloy diagrams illustrating the major types of phase transformation**. 1992, 36p.

DA SILVA, Marcio. Estudo do efeito da fase β na usinabilidade de ligas de latão livres de chumbo. 2015. 126 p. - Escola Politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

DIETER, George Ellwood. **Mechanical Metallurgy**. Reino Unido: Mcgraw-hill Book Company, 1988. 751 p.

DOWLING, N.E. **Mechanical Behavior of Materials**. 3rd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

E. P. De Garmo, J. T. Black, and R. A. Koser, DeGarmo's materials and processes in manufacturing. John Wiley & Sons, 2011.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 365 p.

GARCIA, P. Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, 17, 771-776, Setembro, 2009.

MAHAJAN, S.; PANDE, C.S.; IMAM, M.A.; RATH, B.B. Formation of annealing twins in f.c.c crystals. *Acta Materialia*, Vol 46, nº 6, pp 2215-2653."

MEYERS, Marc; CHAWLA, Krishan. **Mechanical Behavior of Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 856 p.

PANTAZOPOULOS, G.A.; TOULFATZIS, A.I. Fracture Modes and Mechanical Characteristics of Machinable Brass Rods. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 1, 106-114, 2012.

PERES, F.M. Métodos de Mecânica da Fratura Aplicados a Polietileno de Média Densidade Destinado à Extrusão de Tubos. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 2009.

- PINTO, João. Análise de defeitos em chapas de latão para aplicação na indústria decorativa. 2016. 57 p. – Faculdade de engenharia da universidade do Porto, Porto, 2016.
- RAJABI, Z.; DOOSTMOHAMMADI, H. Effect of addition of tin on the microstructure and machinability of α -brass. *Materials Science and Technology*, vol. 34, nº 10, 1118-1227, 2018.
- RIOS, P.R.; SICILIANO JR., F.; SANDIM, H.R.Z.; PLAUT, R.L.; PADILHA, A.F. Nucleation and growth during recrystallization. **Materials Research**, vol. 8, nº 3, pp. 225-238, 2005.
- STRATTON, S. W. **Circular of the bureau of standards**: Copper wire tables. 3. ed. Washington: Government Printing Office, 1914. 76 p.
- TERMOMECÂNICA (São Paulo). **Latão cartucho 60-40**. Elaborada por Termomecânica São Paulo S.A. Disponível em: https://www.termomecanica.com.br/download/conteudo_tecnico/Lat%C3%A3o%20Fio%20M%C3%A1quina%2063-37.pdf
- THOMPSON, Anthony W; BASKES, Michael I; FLANAGAN, William F. The dependence of polycrystal work hardening on grain size. **Acta Metallurgica**, [s.l.], v. 21, n. 7, p.1017-1028, jul. 1973; LU, L.; YOU, Z.s.
- U.S. CONGRESS (Office of Technology Assessment). **Copper: Technology and Competitiveness**, OTA-E-367 Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1988.
- UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, **Copper based alloys**. 2002. Disponível em: http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/microstructural_exam/cualloys.php
- VOORT, G. **Microstructure of copper and copper based alloys**. 2002. Disponível em: http://www.georgevandervoort.com/images/Metallography-Specific/Copper_Alloys.pdf