

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA DUREZA DE UMA LIGA Cu-Be ENVELHECIDA POR PRECIPITAÇÃO

Túlio José Silva do Rosário¹ Manoel Quirino da Silva Júnior²

Resumo: O presente trabalho teve como objetivos a especificação e análise de dureza de uma liga de cobre endurecida por precipitação. Foi realizado o estudo para analisar a dureza desse material e verificar a possibilidade de habilitá-lo para aplicações mecânica, a partir de manipulações para melhorar parâmetros de desempenho mecânico como a propriedade de dureza. Com essa propriedade aprimorada, o cobre e suas ligas podem abranger mais ainda seu leque de aplicações, com foco nas aplicações mecânicas. Para manipular a propriedade de dureza e outras, foram feitos tratamentos térmicos em um forno elétrico. Esse tipo de tratamento é bem comum no meio da engenharia de materiais, afim de melhorar o desempenho mecânico de materiais, em geral os materiais metálicos. Uma análise de microscopia ótica foi realizada no material solubilizado, onde pôde-se observar o material de forma mais clara, em seu arranjo de grãos. Por fim foi possível relacionar dureza com o tempo de envelhecimento, e sendo assim gerar um gráfico que mostra essa relação.

Palavras-chave: Dureza. Aplicações. Tratamentos térmicos. Microscopia ótica.

1. INTRODUÇÃO

Podemos considerar o cobre como sendo um metal de grande importância para o desenvolvimento da sociedade. Desde que foram descobertas as suas potencialidades e características, diversas aplicações foram atribuídas a esse metal.

Partindo para um olhar mais específico, analisando suas propriedades, o cobre é um excelente condutor elétrico, isso justifica sua grande utilidade nos setores de eletricidade. É praticamente unânime a utilização de cobre em fios para condução elétrica. Além disso podemos citar também que o Cobre é um material não corrosivo, e isso é uma ótima característica desse material. [1]

Atualmente, estudos vem analisando a viabilidade de implementar o cobre na área mecânica, mais precisamente aplica-lo em situações que exista esforços mecânicos, como em componentes de máquinas. O cobre puro não apresenta uma boa resistência mecânica, e para solucionar essa deficiência, estão sendo criadas ligas, a partir do cobre, para melhorar o desempenho deste material em situações de esforços mecânicos. É o caso da liga cobre-berílio, onde o Berílio é adicionado com o intuito de melhorar o desempenho mecânico da liga de Cobre e assim aumentar o campo de atuação desse material, fazendo com que se possa aplicar a liga de Cobre para outros fins. [2]

A fim de obter melhores resultados com materiais metálicos, foram desenvolvidos tratamentos térmicos que permite a manipulação das propriedades mecânicas dos materiais metálicos. Atualmente essa técnica já está muito desenvolvida e é muito utilizado nas indústrias. É praticamente indispensável esse tipo de medida nas indústrias metalúrgicas em geral. E para o estudo de melhoria de desempenho mecânico do cobre, esses tratamentos foram bastante presentes. A propriedade mecânica mais estudada foi a dureza, onde essa é muito importante para o desempenho do material em circunstâncias de esforços mecânicos, onde esse é o alvo de melhoria para abranger ainda mais a gama de utilização do Cobre e suas ligas. [3]

Sendo assim, os tratamentos térmicos e o incremento de materiais para unir-se ao cobre, formando as ligas, formam um leque de possibilidades de tornar o cobre um material mais alternativo e amplamente aplicável. Com o implemento dessas técnicas, o também se obtém melhoria no que diz respeito à alta plasticidade. A alta plasticidade ocorre devido a deformação plástica ocorrer ao mesmo tempo por maclação e escorregamento. [4]

O tipo de tratamento térmico utilizado em algumas ligas de cobre é o endurecimento por precipitação, que provém da solubilização e do envelhecimento, que são tratamentos independentes, porém, podem trabalhar em conjunto. Vale salientar também que para análise e aprimoramento dessa liga deve-se levar em consideração o teor do segundo elemento na liga, pois a dureza dessa liga está diretamente ligada a porcentagem em peso deste outro elemento contido nessa liga. [4]

Sendo assim, os tratamentos térmicos que podem ser aplicáveis a essa liga devem ser muito bem estudados e seus rendimentos devem ser avaliados, uma vez que é claro a possibilidade do aumento do leque de utilidades dessa liga nas situações de esforços mecânicos. E para o estudo de melhoria de desempenho mecânico do cobre, esses tratamentos foram bastante presentes. A propriedade mecânica mais estudada foi a dureza, onde essa é muito importante para o desempenho do material em circunstâncias de esforços mecânicos, onde esse é o alvo de melhoria para abranger ainda mais a gama de utilização do Cobre e suas ligas. [3]

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. LIGAS DE COBRE

Existem vários tipos de liga de cobre. Os elementos de liga são adicionados ao cobre com o intuito de melhorar a resistência, a ductilidade e a estabilidade térmica, sem causar prejuízos à formabilidade, condutividades elétrica e térmica e resistência à corrosão característicos do cobre. As ligas de cobre apresentam excelentes ductilidade a quente e a frio, ainda que um pouco inferiores às do metal puro. As ligas de cobre podem ser encontradas como produtos trabalhados mecanicamente, fundidos e metalurgia do pó. Entre os produtos trabalhados estão os arames, planos (placas, chapas, tiras e folhas), tubos, fio-máquinas, perfis extrudados e forjados. Já os produtos fundidos podem ser produzidos por vários métodos, tais como em areia, contínua, centrífuga, sob pressão, cera perdida, gesso e coquilha. [5]

2.1.1. EMBASAMENTO PARA O TRATAMENTO DA LIGA Cu-Be

Como base para o presente trabalho, foi utilizado o ASM Handbook Volume 2. Nesta literatura observou-se que na sessão que trata sobre a liga Cobre-Berílio existia a ausência de dados de dureza. Diversas outras propriedades mecânicas e elétricas são evidenciadas, porém, a dureza não é mostrada. Com base nessa problemática, analisou-se os gráficos de envelhecimento e foram definidas as características do tratamento que foi feito para o presente trabalho. Vale salientar que os gráficos abaixo são uma comparação entre duas ligas C17000 (97.9Cu-1.7Be), ambas com essa mesma composição. Os gráficos da esquerda são da liga C17000/TB00 - recozida, e os gráficos da direita são da liga C17000/TD04 - encruada. Podemos observar os gráficos na figura abaixo:

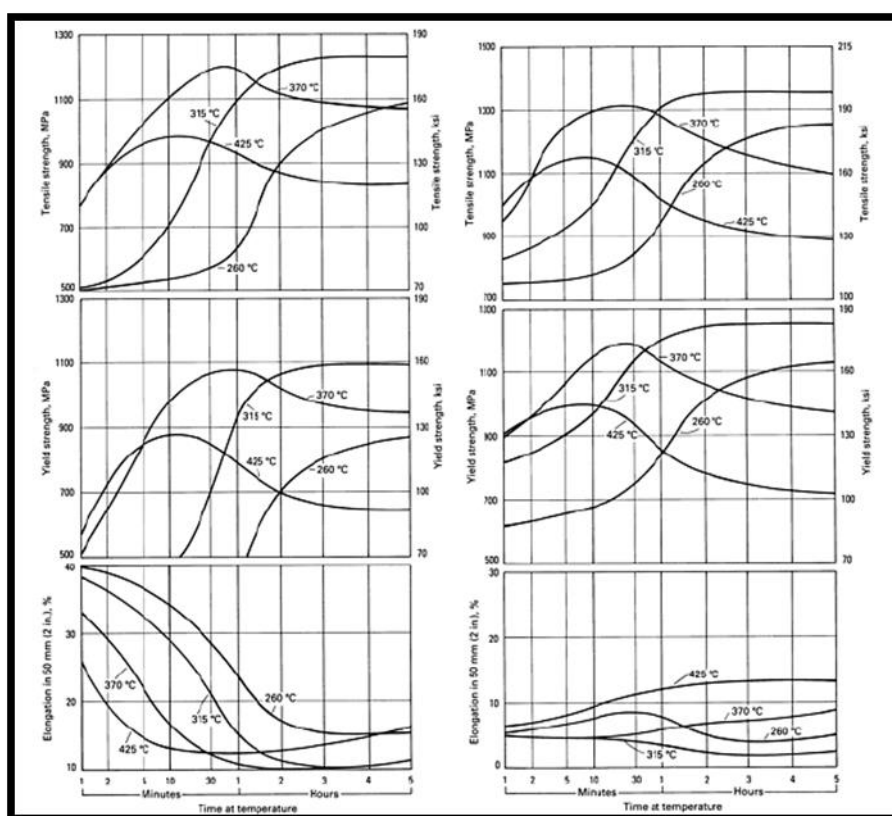


Figura 1. Gráficos que serviram como base para o estudo. [8]

(Minutes: Minutos; Hours: Horas; Time at temperature: Tempo na temperatura; Elongation in 50 mm: Deformação em 50 mm; Yield Strength: Escoamento; Tensile Strength: Limite de resistência a tração;)

2.2. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamento térmico pode ser caracterizado como sendo o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a destinação de mudar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final. Algumas vezes, peças metálicas sofrem tratamentos térmicos, durante o processo de fabricação, passando por ciclos de aquecimento ou resfriamento, que podem alterar suas propriedades de forma prejudicial. Por exemplo

podemos citar a operação de soldagem de estruturas de aço, que ao serem aquecidas até elevadas temperaturas podem sofrer têmpera e fragilização, na zona termicamente afetada (ZTA), comprometendo a tenacidade da estrutura como um todo. [9]

Os tratamentos térmicos são associados com o aumento da resistência do material. Porém, podem ser utilizados para alterar características de fabricabilidade, como usinabilidade, estampabilidade ou restauração de ductilidade, após intenso processo de conformação a frio. Pode-se dizer, então, que os tratamentos térmicos são processos de fabricação que são utilizados tanto para facilitar outros processos de fabricação como para aumentar o desempenho dos produtos através do aumento da resistência mecânica ou de outras características. [6]

2.2.1. ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

A resistência e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser melhoradas pela melhoradas pela formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase dentro da matriz da fase original: isso deve ser obtido através de transformações de fases que são induzidas por tratamentos térmicos apropriados. Esse processo é chamado de endurecimento por precipitação, pois as pequenas partículas da nova fase são denominadas “precipitados”. O termo “endurecimento por envelhecimento” também é usado para designar esse processo, pois a resistência se desenvolve ao longo do tempo ou na medida em que a liga envelhece. [10]

Uma vez que o endurecimento por precipitação resulta do desenvolvimento de partículas de uma nova fase, uma explicação desse procedimento de tratamento térmico pode ser mostrada através de um diagrama de fases. Muitas ligas que podem ser endurecidas por precipitação contém dois ou mais elementos de liga, porém a discussão é simplificada quando se faz referência a um sistema binário. O diagrama de fases deve possuir a forma que está mostrada para o sistema hipotético A-B como pode ser visto na Figura 1. [7]

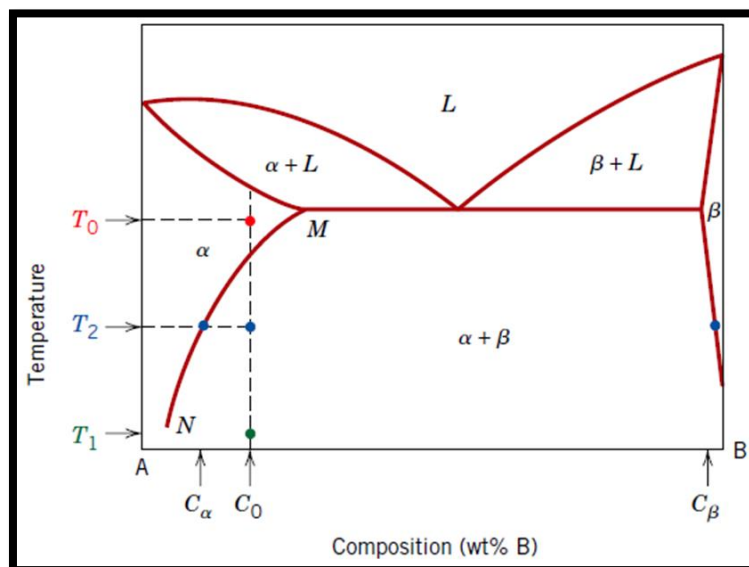


Figura 2. Diagrama de fases hipotético para uma liga endurecível por precipitação. [7]
(Temperature: Temperatura; Composition: Composição;)

Deve haver uma solubilidade máxima apreciável de um componente no outro, da ordem de vários pontos percentuais. Deve haver também um limite de solubilidade que diminua rapidamente com a concentração do componente principal com uma redução da temperatura. A solubilidade máxima corresponde à composição no ponto M. Adicionalmente, a fronteira do limite de solubilidade entre os campos de fases α e α + β diminui desde essa concentração máxima até um teor muito baixo de B em A, no ponto N. Vale salientar que a composição de uma liga que pode ser endurecida por precipitação deve ser menor que a solubilidade máxima. [7]

2.2.1.1. TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO

Para se obter o endurecimento por precipitação, se fazem necessários dois tratamentos térmicos diferentes. O primeiro é um tratamento térmico de solubilização, onde todos os átomos de soluto são dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica. Na Figura 1 considere uma liga com composição C_0 . O tratamento consiste em se aquecer a liga até uma temperatura dentro do campo de fase α – digamos, T_0 – e aguardar até que toda fase β seja completamente dissolvida. Nesse instante, a liga consiste em apenas uma fase α com uma concentração C_0 . Em seguida há um resfriamento rápido, ou têmpera, até uma temperatura T_1 , que para muitas ligas é a temperatura ambiente, na qual se previne qualquer processo de difusão ou surgimento da fase β. Dessa forma, existe uma situação fora de equilíbrio, a solução sólida da fase α, supersaturada com átomos de B, está presente na temperatura

2.2.1.2. TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO

Para o segundo tratamento, a solução sólida α supersaturada é aquecida normalmente até uma temperatura T_2 (Figura 1) na região bifásica $\alpha + \beta$, onde taxas de difusão começam a aparecer. Precipitados da fase β começam a se formar como partículas finalmente dispersas com composição C_β . Após o tempo de envelhecimento apropriado à temperatura T_2 , a liga é resfriada a temperatura ambiente. A solubilização e o envelhecimento estão representados no gráfico da temperatura em função do tempo, na Figura 2. A natureza dessas partículas da fase β depende tanto da temperatura de precipitação T_2 , quanto do tempo de envelhecimento nessa temperatura. [7]

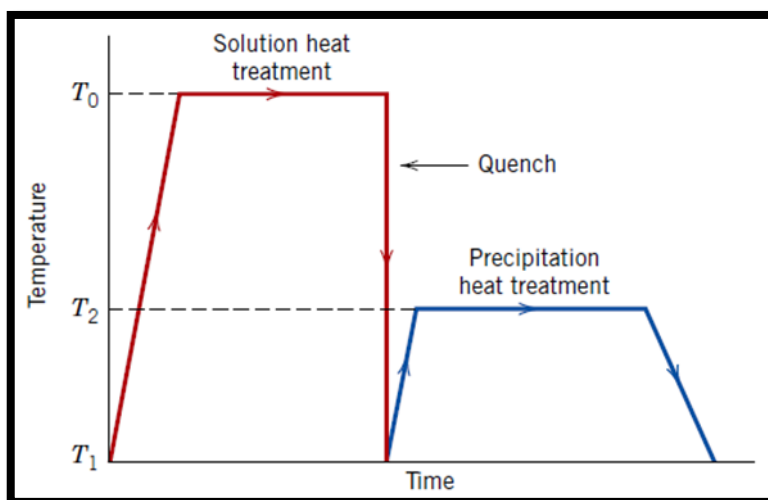


Figura 3. Temperatura x Tempo para tratamentos térmicos de Solubilização e Envelhecimento. [7]
(*Solution heat treatment*: Tratamento térmico de solubilização; *Quench*: Têmpera; *Precipitation heat treatment*: Tratamento térmico de precipitação;)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção veremos como foi realizado todo o processo experimental do tratamento, sendo evidenciadas e descritas cada etapa do processo. Os materiais e equipamentos utilizados também serão descritos.

3.1. PROCEDIMENTOS

Para a realização deste trabalho foi obtida uma liga comercial a qual esperava-se ser Cu-Be, cedida pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, onde a partir desta amostra toda a parte experimental para o desenvolvimento do trabalho foi feita. A liga foi disposta a uma caracterização de sua composição a partir de uma Espectroscopia de Fluorescência de Raios X - EFRX, e para isso duas amostras dela foram levadas ao Laboratório de Análises da Universidade Estadual do Rio Grande do Norte – UERN.

Foram fracionadas 5 amostras do material. Com o material puro (como comprado) foi realizado um ensaio de dureza, onde foram realizadas 30 medições de dureza desse material, para um melhor resultado de média dessas medições. Para esse ensaio utilizou-se o durômetro digital Mitutoyo HR-300, com todas as medições de dureza na escala Rockwell C.

Outra amostra do material foi submetida ao processo de solubilização a temperatura de 800°C, em um tempo de 30 minutos. Esse procedimento foi realizado em um forno elétrico tipo mufla da marca GP. Após esse tratamento térmico, foi realizado um ensaio de dureza semelhante ao que foi descrito acima, com 30 medições usando o durômetro digital Mitutoyo HR-300, obtendo os resultados na escala Rockwell C. Em seguida, essa amostra passou por um processo de lixamento para melhorar o aspecto superficial de uma de suas faces. O lixamento foi feito com a seguinte sequência de lixas, de acordo com suas granulometrias: 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200. Em seguida foi realizado polimento com alumina de 1 μm . Ambos, o lixamento e o polimento, foram realizados utilizando a lixadeira/politriz Arapol 2V-PU. Após essa preparação, a amostra ainda foi submetida a um ataque químico para em seguida passar por uma microscopia ótica utilizando o microscópio ótico GX51 da marca Olympus, onde foram tiradas fotografias de sua microestrutura com a câmera digital acoplada ao microscópio e auxílio do software Analysis GETIT.

Pode-se observar na Figura 3 que as melhores temperaturas são 315, 370 e 425°C, logo foi decidido trabalhar na temperatura de 390°C, por ser uma temperatura mediana as três mostradas no gráfico e também por ser uma temperatura que em que o forno usado para o tratamento melhor trabalhava, quando comparada as três.

Foi observado que o forno da instituição não operava bem em temperaturas abaixo de 390°C.

Para a parte do envelhecimento por precipitação e análise de dureza após esse tratamento, foram utilizadas três amostras do material. As três amostras do material foram submetidas a um processo de solubilização a uma temperatura de 800°C por um tempo de 1 (uma) hora. Esse processo foi feito no forno elétrico tipo mufla da marca GP. Após o término da solubilização as amostras foram retiradas do forno e resfriadas imediatamente em água com agitação. Em seguida, para evitar qualquer tipo de difusão, as amostras foram colocadas em uma geladeira. Para dar continuidade ao processo de endurecimento por precipitação e procedimento das premissas do trabalho, as amostras foram submetidas a um processo de envelhecimento. Todas as três amostras foram submetidas ao envelhecimento a uma temperatura de 390°C, porém, com tempos diferentes. Uma foi envelhecida no tempo de 5 minutos, outra no tempo de 10 minutos e a outra a 30 minutos. Após isso foram colocadas na geladeira para em seguida passarem por um ensaio de dureza. No ensaio cada uma passou por 30 medições no durômetro digital Mitutoyo HR-300, com medições na escala Rockwell C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A liga foi disposta a uma caracterização de sua composição a partir de uma Espectroscopia de Fluorescência de Raios X - EFRX, onde foram obtidos resultados de sua composição em percentual atômico e foram convertidos para percentual em peso, como pode se ver abaixo:

Cu: 84,54 wt% ; Al: 10,01 wt% ; Zn: 4,48 wt% ; Si: 0,42 wt% S: 0,183 wt% ; Ca: 0,172 wt% ; Ni: 0,188 wt% ; Co: 0,00107 wt%

Com os resultados obtidos, é possível constatar que a liga não é Cu-Be, como era esperado que fosse, e certamente se enquadra em uma liga Cu-Al (Cobre-Alumínio). Mesmo com esse resultado os tratamentos foram aplicados a liga, para ser observada a influência dos mesmos.

4.2. METALOGRAFIA

Através da microscopia ótica foram obtidas fotomicrografias do material. A fotomicrografia foi da amostra do material após a solubilização à 800°C por um tempo de 60 (sessenta) minutos. Abaixo veremos duas fotomicrografias do material passado pelo tratamento descrito acima.

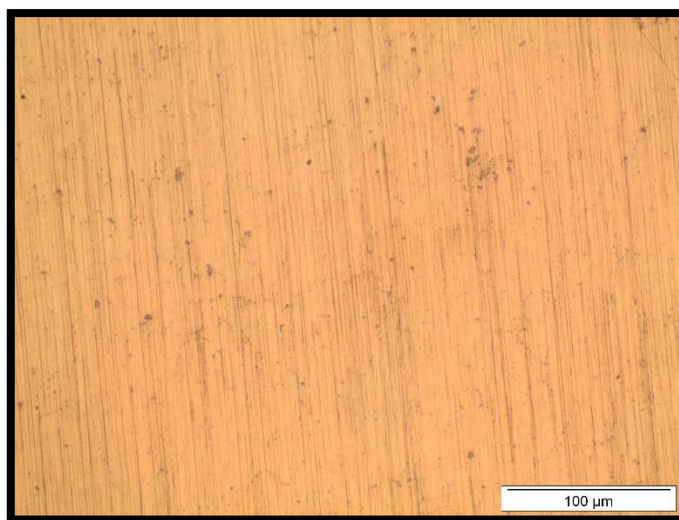


Figura 4. Fotomicrografia com zoom de 200x da amostra solubilizada a 800°C por 60 minutos.[Autoria própria]

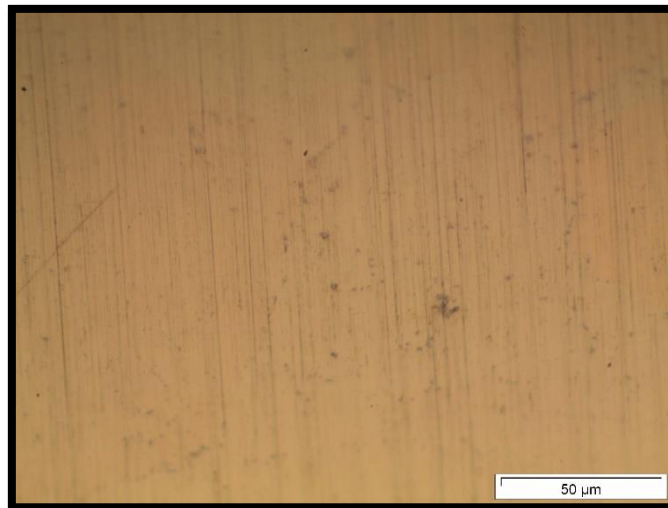


Figura 5. Fotomicrografia com zoom de 500x da amostra solubilizada a 800°C por 60 minutos.[Autoria própria]

Por meio da análise das imagens, pode-se perceber a existência de apenas uma fase, o que caracteriza um material solubilizado, uma vez que esse processo tem como objetivo deixar o material em apenas uma fase, sem a presença de precipitados ou alguma outra fase, o que proporciona ao próximo tratamento uma melhor eficiência.

4.3. ESTUDO DA DUREZA

A partir de ensaios de dureza Rockwell, foram realizadas 30 medições dessa grandeza para cada amostra estudada do material. Com as 30 medições de dureza para cada amostra do material, foi obtida a média para indicar o valor médio da dureza associado a cada amostra. As amostras foram: material puro (como comprado), material solubilizado a 800°C por 30 (trinta) minutos e mais 3 amostras do material solubilizado a 800°C por 1 (uma) hora e envelhecido por 5, 10 e 30 minutos, cada, sendo esse envelhecimento a 390°C. As durezas médias e desvio padrão foram calculados com o Microsoft Excel. Os valores médios de dureza associados a cada amostra serão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 1. Relação da dureza média e desvio padrão para cada amostra do material estudada. [Autoria própria]

	DUREZA (HRC)	DESVIO PADRÃO ASSOCIADO
MATERIAL COMO COMPRADO	34,84	2,1762
SOLUBILIZADO À 800°C POR 60(SESENTA) MINUTOS	34,67	0,8563
ENVELHECIDO À 390°C POR 5(CINCO) MINUTOS	35,4	1,1344
ENVELHECIDO À 390°C POR 10(DEZ) MINUTOS	36,38	0,7064
ENVELHECIDO À 390°C POR 30(TRINTA) MINUTOS	31,57	3,2104
ENVELHECIDO À 390° POR 60(SESENTA) MINUTOS	31,58	3,2405

A partir da análise dos resultados de dureza mostrados na tabela podemos identificar que o maior resultado de dureza foi observado na amostra que foi submetida ao envelhecimento por um período de 10 (dez) minutos. Relacionando o valor das durezas dessa amostra com a amostra do material como comprado, pode se constatar que a dureza teve um aumento de 4,42%. Como pode ser observar, os valores da dureza média das amostras envelhecidas a 30 e 60 minutos já começam a convergir, o que é uma justificativa para ter-se feito envelhecimento até o tempo de 60 minutos. De acordo com o que foi visto no Handbook, as curvas das propriedades tendem a ficarem constantes, sem alterações significativas, a partir de um certo tempo de envelhecimento.

4.3.1. GRÁFICO DE RELAÇÃO

Como o interesse maior do trabalho é a análise da influência do endurecimento por precipitação, um gráfico foi gerado com os resultados obtidos, onde relacionou-se a dureza em função do tempo de envelhecimento, que é a principal etapa desse processo de endurecimento.

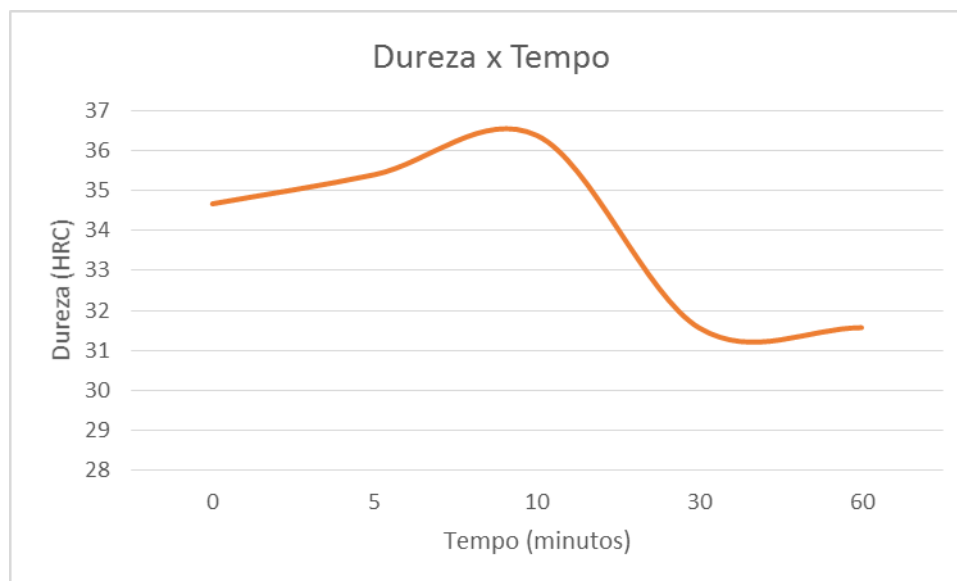


Figura 6. Gráfico que relaciona a dureza com o tempo de envelhecimento. [Autoria Própria]

4.3.2 GRÁFICO DE DESVIO PADRÃO DAS DUREZAS MÉDIAS

Como foi mostrado na Tabela 1, existe um desvio padrão associado para cada média de dureza. Esse desvio padrão informa que os valores das médias não estão muito diferentes entre si, uma vez que alguns desses desvios padrões são considerados altos. Porém, vemos que por mais que exista esse desvio padrão, as durezas são diferentes, mesmo essa diferença sendo baixa. Os desvios padrões em função dos tempo de envelhecimento, serão mostrados no gráfico abaixo:

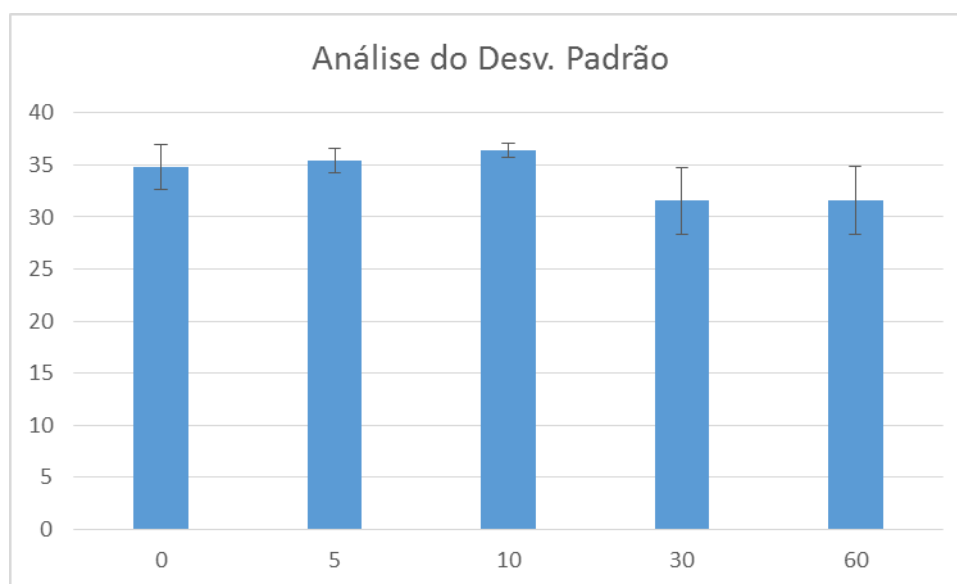


Figura 7: Análise do Desvio Padrão. [Autoria Própria]

5. CONCLUSÕES

A liga estudada foi submetida a esse processo de endurecimento baseado no ASTM Metals HandBook Vol.2, onde foi encontrada uma temperatura preferível, em meio as mostradas nessa literatura, para o envelhecimento. Analisando o tratamento que foi feito, pôde-se constatar que houve um aumento considerado na dureza, aumento esse de 4,42%. Essa máxima foi encontrada no envelhecimento feito por 10 minutos à temperatura constante de 390°C. Logo, é constatado que o tratamento é sim uma ferramenta para aumento de resistência em ligas algumas ligas de cobre.

É importante destacar que o tratamento feito no material foi baseado no proposto pelo Handbook para a liga Cu-Be, porém podemos observar nos resultados que a liga estudada não é uma liga Cu-Be, e certamente se encaixa em uma liga Cu-Al. Devido a isso o endurecimento por precipitação, da maneira que foi executado, não rendeu melhores resultados, como era o esperado caso fosse uma liga Cu-Be. Entretanto, mesmo sendo uma liga diferente houve um aumento na dureza da liga.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, Fábio. O que é Cobre e qual sua principal utilização?. Publicado em: 03/09/2012. Disponível em: <<https://www.industriahoje.com.br/o-que-e-cobre-e-qual-sua-principal-utilizacao>> Acesso em: 05/04/2018
- [2] O Cobre e suas aplicações. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/o-cobre-e-suas-aplicacoes>> Acesso em: 05/04/2018
- [3] Objetivos do Tratamento Térmico dos aços. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6442-objetivos-do-tratamento-termico-dos-acos#.Ws_xai4bPIV> Acesso em: 05/04/2018
- [4] TSCHIPTSCHIN, André Paulo. Metalografia e tratamento térmico do cobre e suas ligas. Disponível em: <http://pmt.usp.br/pmt3402/material/ligas_Cu.pdf> Acesso em: 05/04/2018
- [5] Resumo: Cobre e suas ligas. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=109>> Acesso em: 22/04/2018
- [6] Tratamento Térmico. E-disciplinas. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3975596/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf> Acesso em: 06/04/2018
- [7] CALLISTER, Jr., W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª Edição. LTC Editora, 2008.
- [8] ASM Handbook, Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1990 (6 th printing: 2000).