

MÉTODO TEÓRICO PARA PRODUIR, UMA LIGA Cu-Ni A PARTIR DE UM ESTOQUE DE LIGA Cu-20%Ni E NÍQUEL PURO

Yuri Vidal Félix ¹, Gilvan de Sousa Oliveira ², Ana Emília Diniz Silva Guedes ³

Resumo

Sabe-se que na maioria das aplicações em engenharia, usa-se ligas metálicas em vez de metal puro, ou seja, elementos estranhos são intencionalmente adicionados a um metal, com o fim de melhorar as propriedades usuais ou obter certas propriedades específica. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para produzir uma liga Cu-Ni com propriedades mecânicas preestabelecidas. Para desenvolver a liga foi utilizado o método de inequações a partir do diagrama Tensão x Porcentagem de massa de Ni e com base nos critérios estabelecidos para a liga, foi denominado um valor mínimo e máximo do percentual de Ni na liga, na qual foram encontrados os valores de 42% a 60% que atenda as especificações desejadas. Com o intuito de um processo economicamente viável foi definido como ideal a Liga Cu45%-Ni.

Palavras Chave: Materiais, Solução Sólida, Ligas, Cu-Ni.

Abstract

It is known that in most engineering applications, metal alloys are used instead of pure metal, i.e., foreign elements are intentionally added to a metal, in order to improve the usual properties or to obtain certain specific properties. The present work has the objective of developing a method to produce a Cu-Ni alloy with pre-established mechanical properties. In order to develop the alloy, the inequality method was used from the Strain x Percentage of Ni mass diagram and based on the criteria established for the alloy, a minimum and maximum value of the percentage of Ni in the alloy was found. values from 42% to 60% that meet the desired specifications. With the intention of an economically viable process was defined as ideal the Cu45%-Ni alloy.

Key word: Materials, Solid Solution, Alloys, Cu-Ni.

*Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Engenharia Mecânica e Produção do UNINORTE e constará dos Anais I Encontro De Trabalhos Científicos das Engenharias Mecânica e Produção Uninorte Laureate- I ETCEMP

Yuri Vidal Félix acadêmico de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Norte¹ e-mail: yuri.v.felix@gmail.com

Gilvan de Sousa Oliveira acadêmico de Engenharia Mecânica do Centro universitário do Norte². e-mail: gilloliveira1993@gmail.com

Ana Emília Diniz Silva Guedes prof. Dra do Centro Universitário do Norte³. e-mail: ana.guedes@uninorte.com.br

Introdução

A utilização de ligas metálicas no continente Europeu remonta ao terceiro milênio A.C., quando o homem calcólico descobriu, por experiência ou coincidência, que a combinação de certos elementos metálicos – formando ligas – melhorava as propriedades dos materiais, ampliando consideravelmente as possibilidades de aplicação¹. No caso do cobre, a introdução de arsênio, estanho e chumbo, além de melhorar a fluidez durante o vazamento, produzia diretamente um material com dureza superior à do cobre puro, sem necessidade de qualquer outro processo de aumento de resistência¹.

O cobre metálico é excelente condutor elétrico e térmico, flexível, relativamente barato e muito resistente à corrosão². Como perspectiva futura, supercondutores de elevadas temperaturas têm gerado grande expectativa. A descoberta desse fenômeno tem sido de grande importância, e atualmente os materiais à base de cobre estão entre os mais promissores. Por exemplo, compostos da família HgBaCaCuO são supercondutores a temperaturas abaixo de 135 K. Até o momento, não se conhece muitos materiais com resistência zero ao fluxo de elétrons numa temperatura considerada elevada para essa área de estudo².

Os metais com alta pureza têm quase sempre menor dureza e menor resistência que as ligas compostas pela mesmo metal base³. O aumento da concentração de impurezas resulta em um conseqüente aumento no limite de resistência à tração e no limite de escoamento³. A dureza de materiais metálicos pode ser aumentada utilizando quatro mecanismos, dentre os quais podemos citar: Endurecimento por refino de grão, trabalho a frio ou encruamento, formação de soluções sólidas³. Esse aumento de resistência mecânica via formação da solução sólida é conseqüente do aumento da restrição à movimentação de discordâncias³. As ligas de cobre-níquel são produzidas através desse mecanismo⁴.

No endurecimento por solução sólida os elementos de liga podem formar soluções sólidas substitucionais ou intersticiais (dependendo da relação de tamanhos atômicos entre o solvente e o soluto) impondo deformações nas redes cristalinas. A interação entre os campos de tensão formados e as deslocamentos provoca uma restrição à movimentação das deslocamentos, endurecendo a liga⁵.

Os elementos de liga são adicionados ao cobre visando melhoria da resistência mecânica, ductilidade e estabilidade térmica, sem causar danos consideráveis na forma, condutividade térmica e elétrica e resistência à corrosão, características típicas do cobre puro⁶. A escolha dessas ligas está relacionada aos estudos realizados previamente em ligas similares⁷⁻¹⁰.

As ligas à base de cobre são utilizadas em muitas aplicações industriais em função de suas propriedades, sendo uma delas o efeito memória de forma⁶. Essas ligas, nessa condição, podem recuperar grandes tensões ou gerar forças significativas sobre as mudanças de forma, e por isso são de interesse comercial⁵. Do ponto de vista de suas aplicações práticas, a tecnologia atual oferece, para esses materiais, três possibilidades de obtenção: a preparação de ligas policristalinas de grãos finos diretamente por fusão de seus constituintes, por pulimeturgia a partir do pó da liga, ou por meio da obtenção de monocristais⁶.

O níquel é um dos metais mais importantes no universo industrial desempenhando um papel bastante importante nas ligas ferrosas como elemento de liga. De acordo com os dados relativos a 2008 do consumo de níquel, cerca de 58% de níquel produzido é utilizado como elemento de liga nos aços inoxidáveis (vide figura 1), sendo esta a sua principal aplicação. A segunda principal aplicação do níquel reside na produção das suas ligas que em 2008 representava apenas 12%⁵.



Figura 1: Dados relativos ao consumo de níquel referente ao ano de 2008⁵

As ligas de níquel podem ser classificadas como ligas de fundição, ligas de conformação plástica e ligas de pulverometalurgia, sendo as ligas mais altamente ligadas produzidas pelo processo de fundição⁵. As peças produzidas por estes processos podem ser ligadas através de processos de soldadura, sendo o grau de exigência muito maior para as ligas com quantidades elevadas de elementos endurecedores por precipitação (como o alumínio, o titânio e o nióbio) devido à possível formação de fases frágeis⁵.

As propriedades das ligas de níquel podem ser controladas através de ajustes na composição química da liga, por conformação plástica e por tratamento térmico para que os produtos finais possuam as características desejadas⁵. O aumento da temperatura promove uma diminuição dos valores de resistência, sendo as ligas de níquel assim como as ligas de ferro-níquel (endurecidas por precipitação) as que apresentam os maiores valores de resistência. As ligas de níquel são utilizadas para aplicações ainda mais exigentes a altas temperaturas, sendo esta uma característica especial destas ligas. Elas conseguem suportar cargas a temperaturas até 80% da sua temperatura de fusão⁵.

As ligas de níquel têm suscitado um crescente interesse na indústria devido às suas principais características como a resistência à corrosão e resistência a altas temperaturas. A nível da resistência à corrosão as ligas de níquel preenchem a lacuna de desempenho existente entre os aços inoxidáveis e as ligas de materiais mais exóticos como o tântalo⁵.

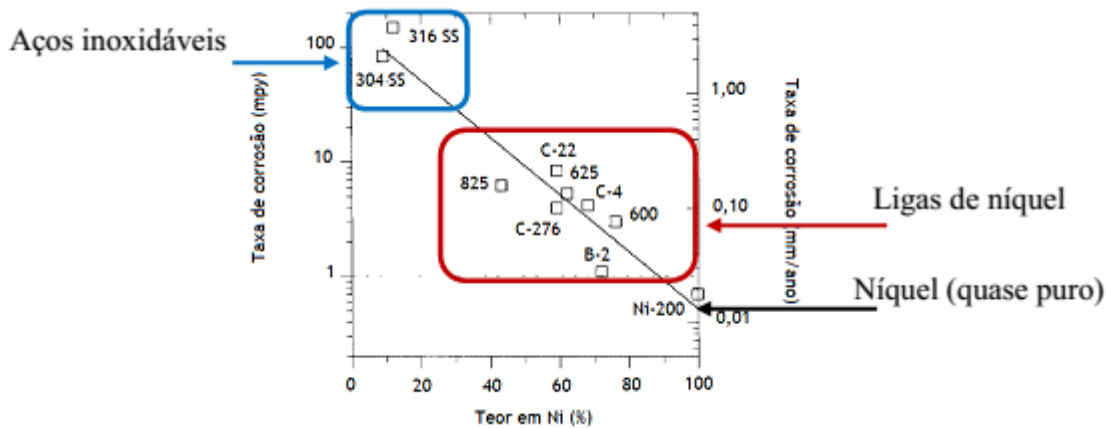


Figura 2 Influência do teor em níquel na taxa de corrosão num ambiente com 50% hidróxido de sódio (NaOH) à temperatura de 150°C⁵

Devido ao elevado custo as ligas de níquel são normalmente escolhidas apenas para condições de serviço severas onde a manutenção ou pureza do produto (em contato com a liga metálica) é de grande importância e onde aços inoxidáveis ou outros materiais alternativos não conseguem cumprir com as exigências⁵. As vantagens das ligas à base de níquel em relação aos aços inoxidáveis são as seguintes:

1. maior resistência à corrosão sob-tensão;
2. maior resistência à corrosão uniforme em especial em meios ácidos redutores como o clorídrico;
3. maior resistência à corrosão localizada como a corrosão por picadas.

Estas vantagens devem-se essencialmente a três características das ligas de níquel. A primeira é do níquel ser um metal mais nobre que o ferro sendo capaz de promover a repassivação do filme de óxido protetor na superfície do material⁵. A segunda é de apresentarem uma estrutura cúbica de faces centradas até a fusão mantendo as principais características microestruturais assim como as suas propriedades mecânicas. A terceira é a elevada capacidade de acolher elementos liga como o crómio e o molibdénio de forma a promover uma melhoria significativa nas suas propriedades em especial na resistência à corrosão⁵.

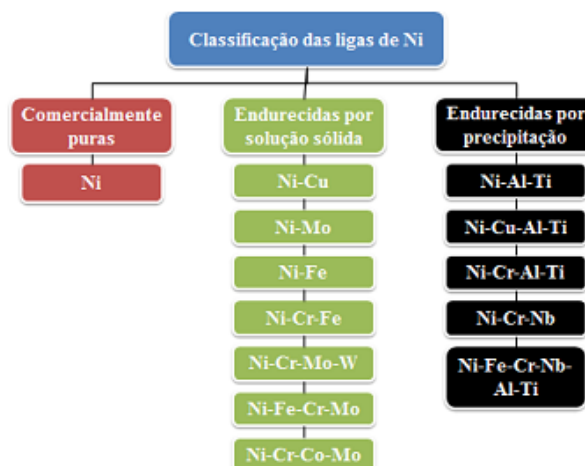


Figura 3: Esquema relativo à classificação das ligas de níquel⁵

Um metal puro solidificará em uma temperatura constante, enquanto uma liga solidificará em uma faixa de temperatura que depende da composição da liga¹¹. Considere a série de curvas de resfriamento para o sistema de cobre-níquel mostrado na Figura 4. Para quantidades crescentes de níquel na liga, o resfriamento começa a aumentar temperaturas A, A₁, A₂, A₃ até níquel puro a A₄ e termina em temperaturas crescentes B, B₁, B₂, B₃ até níquel puro em B₄¹¹. Se todos os pontos A, A₁, A₂, A₃ e A₄ estiverem unidos, o resultado é uma linha conhecido como *liquidus*, que indica o temperatura em que qualquer liga dada começará para solidificar¹¹. Da mesma forma, juntando os pontos B, B₁, B₂, B₃ e B₄, a linha *solidus*, a temperatura em que qualquer liga se tornará completamente sólida, é obtida⁸. Em outras palavras, em todas as temperaturas acima do *liquidus*, a liga ser um líquido, e em todas as temperaturas abaixo do *solidus*, a liga será um sólido. A temperaturas entre o *liquidus* e o *solidus*, às vezes conhecida como “zona mole”, tanto líquida quanto sólidos coexistem em equilíbrio¹¹.

Para que a liga, depois de pronta, atenda os critérios estabelecidos no objetivo do trabalho é necessário que, na hora da solidificação da liga, a mesma siga as curvas *solidus* e *liquidus* durante o resfriamento. Portanto, de acordo com Askeland (2008), para obter essa microestrutura final de equilíbrio, a taxa de resfriamento deverá ser extremamente baixa. Além disso, deverá ser dado tempo suficiente para que os átomos de cobre e níquel se difundam e produzam as composições indicadas no diagrama de fases.

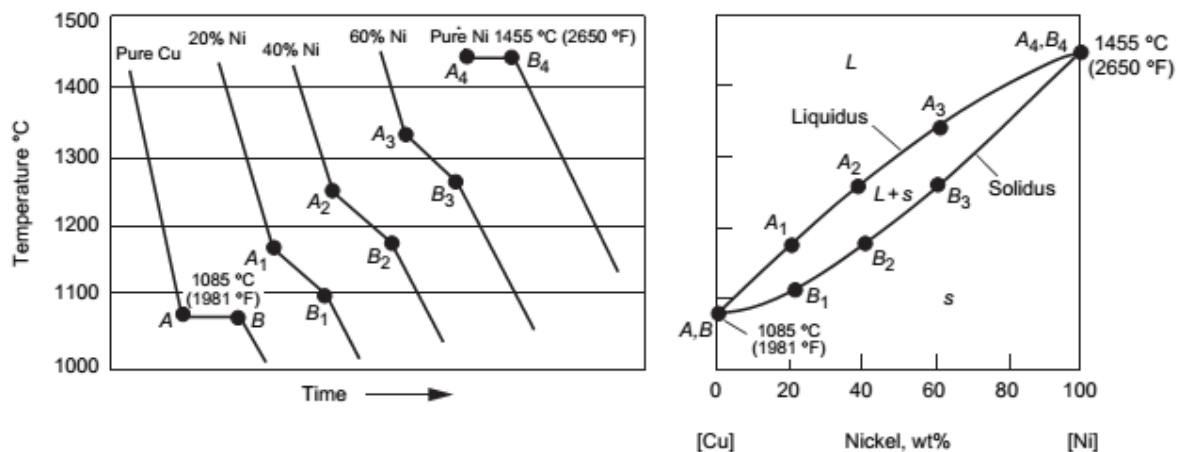


Figura 4: Construção do diagrama de fases a partir de curvas de resfriamento.

Fonte: ASM International© 2008

A difusão é o movimento dos átomos através da rede cristalina. Em todas as temperaturas acima do zero absoluto, os átomos em gases, líquidos e sólidos estão em constante estado de movimento¹⁰. Enquanto a difusão aleatória está ocorrendo constantemente em todos os metais a temperaturas acima do zero absoluto, de longe o caso mais importante de difusão ocorre quando há um gradiente de concentração¹¹. Neste caso, a força motriz da difusão é reduzir a energia livre de Gibbs do sistema. Por exemplo, se dois blocos da mesma composição de liga AB forem soldados juntos e depois aquecidos por algum tempo a temperatura elevada, a energia livre de cada parte da liga será inicialmente G₁ e G₂, e a energia livre do bloco soldado será G₃¹¹.

Como a difusão ocorre para reduzir o gradiente de concentração, as energias livres diminuirão para G_4 , a energia livre de um composto AB homogêneo. Portanto, uma diminuição na energia livre é produzida pelos átomos A e B difundindo-se de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração, ou diminuindo o gradiente de concentração¹¹.

A difusão desempenha um papel importante em muitos processos metalúrgicos, como transformações de fase, recozimento, endurecimento por precipitação, ligação por difusão, sinterização, carburação de aços e deformação por deformação. Como exemplo, a difusão pode ser usada para ajudar a eliminar os gradientes de concentração em uma peça fundida e produzir uma composição mais homogênea¹¹.

Os coeficientes de difusão intrínseca dependentes da concentração de níquel e cobre a 1273 K no sistema Ni-Cu foram calculados usando abordagem generalizada de Boltzmann Matano do estudo experimental perfil de concentração¹². Os coeficientes de difusão intrínseca do Ni e Cu foram aproximados em toda a faixa de concentração em Liga de Ni-Cu, Figura 5. Os resultados dos coeficientes de difusão são descritos por polinômios¹².

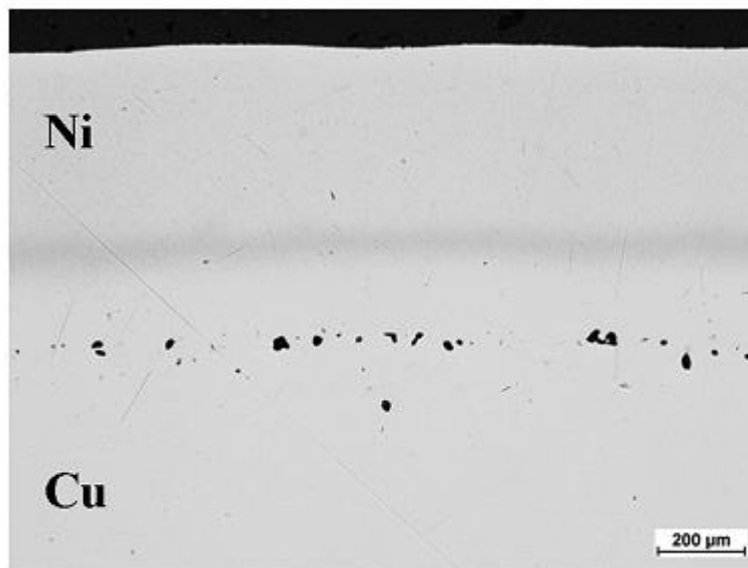


Figura 5: O resultado experimental da porosidade na difusão de Cu-Ni.

Fonte: Wierzba B.; Skibinski, W. 2016.

Uma das grandes utilidades das ligas com memória de forma são em sensores ou acionadores em dispositivos de segurança. Atualmente também são citadas outras aplicações, como o desenvolvimento de instrumentos ou componentes relacionadas à área médica, automotiva e aeroespacial. Uma variável igualmente importante para a utilização desses materiais, além da performance de memória de forma e resistência mecânica, é o conhecimento de sua resistência à corrosão em diferentes meios⁶. Com o propósito de conhecer a resistência à corrosão de ligas a base de cobre, vários

trabalhos já foram realizados, utilizando, entretanto, como eletrodos ligas policristalinas de cobre¹³.

Dentre as aplicações das ligas de cobre estão os processos de proteção de substratos de aço-carbono, a cobreação, que ocupa um lugar de destaque¹⁴. Em muitos casos ela constitui uma camada intermediária ótima para a subsequente niquelação: depósitos de cobre-níquel-cromo sobre aço-carbono proporcionam proteção e estética notáveis, o que justifica seu amplo emprego na atualidade¹⁴.

Atualmente, entre as ligas cuproníquel comercialmente importantes, a liga Cu10Ni (UNS C70600) é a mais utilizada por oferecer boa resistência à corrosão aliada a menor custo¹⁵. Apesar das boas características de resistência à corrosão, com a crescente utilização de tubos da liga UNS C70600 em sistemas de resfriamento, começaram a surgir problemas de corrosão localizada, que em alguns casos têm sido relacionados à presença de depósitos no interior dos tubos¹⁵. Esses depósitos podem ocasionar falhas prematuras, que não ocorrem por mecanismos de corrosão isolados, isto é, existe uma interação dos mecanismos. A presença destes mecanismos pode também estar associada aos problemas de corrosão-erosão, os quais estão diretamente relacionados com as propriedades mecânicas da liga¹⁵.

Em virtude da demanda por ligas metálicas cada vez mais flexíveis, que permitam atender exigências de diversas procedências, a diferentes temperaturas, existe o interesse pelo desenvolvimento de ligas que possam operar, com eficiência, em diferentes condições de operação. Em particular, é desejável que sejam resistentes a corrosão em diferentes meios e tenham uma resistência mecânica satisfatória.

Com base nos fatos descritos, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para produzir uma liga Cu-Ni, através do mecanismo de solução sólida, que tenha escoamento mínimo de 140MPa, um limite de resistência à tração mínimo de 420MPa e um alongamento superior a 20%, a partir de um estoque de liga Cu-20%Ni e níquel puro. Os resultados obtidos, que apontam as condições ideais de concentração da liga, poderão servir de base, visando a obtenção de ligas de alta performance para atender as necessidades do homem.

Material e métodos

Para o desenvolvimento da liga utilizou-se o modelo proposto por Askeland (2008), onde, a partir da Figura 3 (a, b e c), determina-se a composição mínima e máxima requerida para a liga, de forma a atender os critérios preestabelecidos de propriedades mecânicas da mesma.

O diagrama da Figura 6 representa um compilado das principais propriedades da liga Cu-Ni, como limite de resistência à tração, alongamento, limite de escoamento na qual estão dispostos de tal forma que na medida em que varia o percentual dos componentes da liga, essas propriedades também são alteradas.

Como o objetivo do trabalho é demonstrar um método para produzir ligas metálicas, no caso ligas de Cobre, com base em limites pré-estabelecidos é necessário, portanto delimitar esses respectivos limites no diagrama demonstrado na Figura 6.

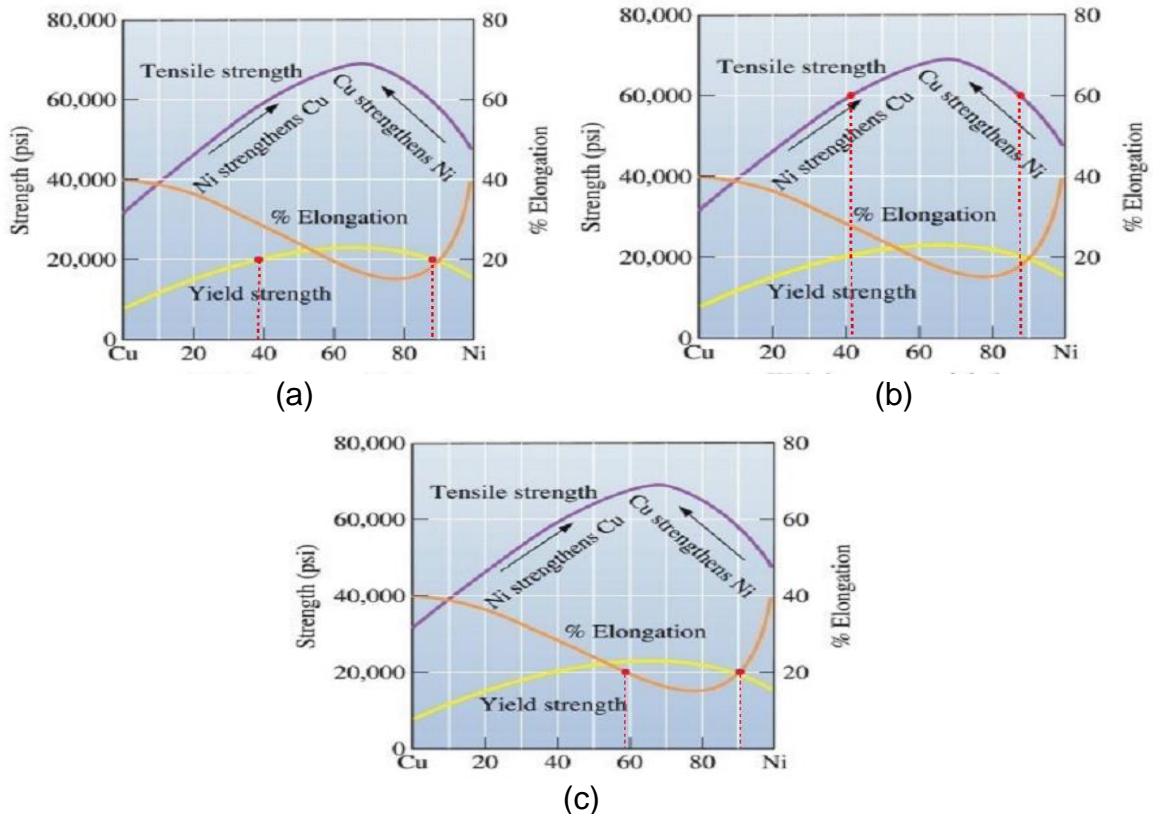


Figura 6: Diagrama de porcentagem de massa de Cobre e Níquel, onde (a) limite de escoamento e intervalo > 39%Ni e < 88%Ni, (b) limite de resistência à tração e intervalo > 42%Ni e < 87%Ni e (c) alongamento e intervalo < 59%Ni e > 91%Ni.

Fonte: ASM International® 2008.

Os valores de percentual de cada componente foram obtidos através do sistema de inequações, na qual foi preciso analisar e responder cada inequação separadamente e depois comparar os gráficos lado a lado para encontrar o conjunto solução que resolve as inequações do sistema¹⁷.

$$S = \{x \in \mathbb{R}; x < a \text{ e } x \geq b\}. \quad (1)$$

Com base na Figura 6 pode-se observar que: (a) demonstra o intervalo determinado, onde para que a liga tenha um limite de escoamento mínimo de 120MPa se faz necessário que a mesma contenha um percentual de Ni entre 39 e 88% na matriz do Cu (b) demonstra que liga para possuir um limite de resistência à tração acima de 420MPa é preciso conter um percentual de Ni entre 42 e 87% na matriz do Cu e por último, (c) demonstra os limites de percentual de Ni devem ser menores que 59% ou maiores que 91% para se obter um alongamento superior a 20%. Os pontos em vermelho indicam, no diagrama, os limites a serem utilizados para determinação da liga.

Tendo em mãos todos os diagramas com seus respectivos limites percentuais de Ni, se faz necessário organizá-los de forma a melhorar a sua visualização. Dessa forma, foi compilado todos os intervalos dos diagramas acima a fim de compará-los lado a lado para encontrar a solução que resolve as inequações

do sistema. Cada linha de inequação corresponde respectivamente às imagens *a*, *b* e *c* da Figura 6.

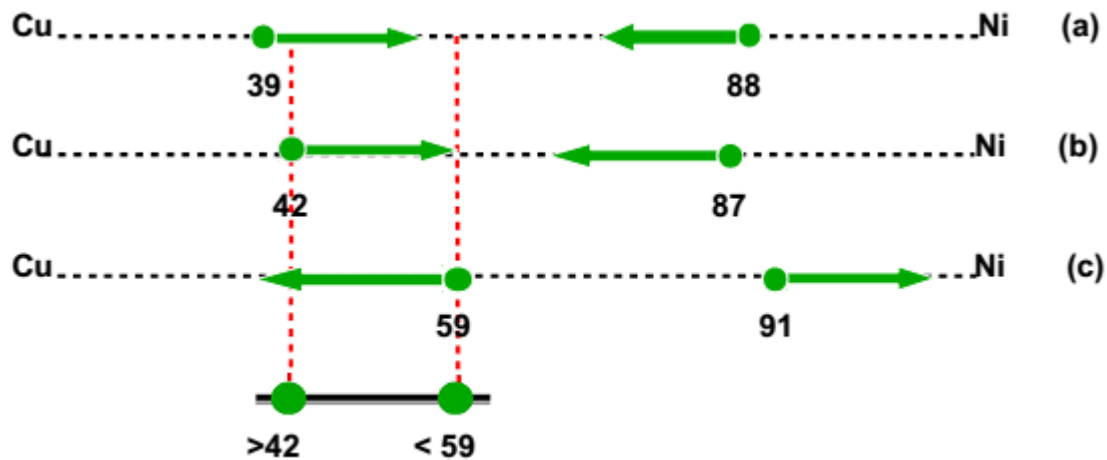


Figura 7: Compilação de todos os limites percentuais de Ni.

Fonte: Próprio autor.

Resultados e discussão

De acordo com a Figura 7, pode-se observar que há a ocorrência de pontos em comum, intersecção, entre os valores encontrados e com base neles é possível chegar aos resultados esperados. Ao plotar todos os pontos de limites, sobrepostos, traçou-se uma linha pela qual todos os pontos se cruzam e com isso pode-se comparar os valores em comum entre todos eles.

Para satisfazer todas as condições, segundo a Figura 7, o ideal é utilizar uma liga de cobre com teor de níquel de 42% a 59%.

É preferível selecionar o teor mais baixo possível de Níquel, pois o seu preço é comercialmente mais caro que o Cobre¹⁸⁻¹⁹. Além disso, ligas com teor de níquel mais baixo possuem temperatura de fusão menor, permitindo que os fundidos sejam fabricados com um menor consumo de energia. Portanto, uma liga razoável poderia ser Cu-42%Ni.

Há uma certa dificuldade em analisar com precisão os diagramas utilizados e isso pode gerar incertezas e imprecisões nos valores encontrados. Para isso, adotou-se um percentual maior de Ni para satisfazer essa margem de erro, dessa forma é possível obter mais segurança nos resultados.

Com base nisso, será utilizada a liga Cu-45%Ni como a liga que atende com segurança os critérios do trabalho.

Ligas com essa percentagem de níquel são conhecidas comercialmente como Constantan. As propriedades mecânicas dessas ligas atingem seu valor máximo para cerca de 65% de níquel, enquanto a resistividade elétrica atinge seu valor máximo para cerca de 55% de níquel. Embora tanto o cobre como o níquel apresentem elevado coeficiente de aumento da resistividade elétrica com o aumento da temperatura, a liga Cu-Ni que contém 45% de níquel possui a particularidade de ter esse coeficiente praticamente nulo, e, sendo assim, conhecida pelo nome comercial

de *constantan* é largamente utilizada para a fabricação de resistências elétricas, termopares elétricos e instrumentos elétricos em geral²⁰.

Na Tabela 1 estão despostas as principais ligas de Cu-Ni padronizadas e comercializadas no mercado, é possível observar que na medida que o percentual de Níquel aumenta, o conseqüente aumento das propriedades mecânicas da liga é percebido.

Liga (ASTM)	Composição	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
704	93,5Cu 5Ni 1Fe 0,5Mn	280-320	90-350	45-10	60-100	95-190
706	88,5Cu 10Ni 1Fe 0,5Mn	320-420	120-380	38-12	65-120	95-150
-	79,7Cu 20Ni 0,3Mn	340-460	150-420	40-12	80-135	240
710	78,3Cu 20Ni 1 Mn 0,7 Fe	340-470	150-420	40-14	80-130	120-235
-	74,7Cu 25Ni 0,3Mn	370	160	42	85	275
715	68,7Cu 30Ni 1Mn 0,3Fe	360-520	150-450	42-16	85-145	140-245
-	54,7Cu 44Ni1Mn 0,3Fe	480-700	200-550	45-5	95-165	290

Tabela 1: Ligas CuNi padronizadas.
Fonte: Barbosa, 2012.

Uma liga com essa composição, 45% de Ni em peso, para ser produzida a partir do estoque disponível para fundição, deve-se misturar uma quantidade de níquel puro com o lingote de Cu-20%Ni.

Para produzir, 10 kg da liga de Cu-Ni, pode-se adotar x como a massa da liga Cu-20%Ni, portanto, a massa de Ni puro necessária será (10 -x).

Sabendo que a composição final da liga deverá ser de Cu-45%Ni, o total de níquel necessário para 10 kg de liga será:

$$(10 \text{ kg}) (\text{Cu-45\%Ni} / 100\%) = 4,5 \text{ kg de Ni} \quad (2)$$

Como a massa total de Ni na liga será de 4,5 kg, é preciso encontrar a massa de Cu-20%Ni necessária, para então o que restar para completar os 10 kg, será de níquel puro.

A Equação 2 demonstra como encontrar a massa de Cu-20%Ni. Na qual soma-se o níquel da liga Cu-20%Ni + níquel puro adicionado = níquel total de 4,5 kg que será produzida.

$$(x \text{ kg}) \left(\frac{20\%}{100\%} \right) + (10 - x \text{ kg Ni}) \left(\frac{100\%}{100\%} \right) = 4,5 \text{ kg Ni} \quad (3)$$

$$0,2x + 10 - x = 4,5 \text{ kg} \quad (4)$$

O resultado proveniente da Eq. 4, expresso em x é equivalente a 6,875 Kg. Este valor refere-se a massa de Cu-20%Ni necessária. Portanto, para

desenvolver a liga requerida, é preciso fundir 6,875 kg de Cu-20%Ni com 3,125 kg de Ni puro. Que resulta num total de 10 kg de liga.

Para se certificar que os critérios preestabelecidos para liga foram atendidos, se faz necessário fundir o metal e vazá-lo em um molde na forma de corpo de prova, normalizados pela ISO/R377²¹, para após a solidificação, submetê-lo a um ensaio de tração e encontrar os resultados exatos de resistência à tração, escoamento e alongamento segundo a norma ABNT NBR ISO 6892²².

A liga completamente homogênea é aquela na qual todos os seus componentes estão na fase líquida antes do vazamento do metal. Portanto, é necessário aquecer a liga acima da temperatura *líquidos* que, para esta composição, foi baseado na temperatura de fusão do Níquel que é o componente de maior ponto de fusão, sendo esta de aproximadamente 1.450 °C¹¹.

É importante enfatizar que o diagramas de fase de equilíbrio identificam mudanças de fase sob condições de mudanças muito lentas na temperatura. Em situações práticas, onde o aquecimento e o resfriamento ocorrem mais rapidamente, os átomos não tempo suficiente para entrar em suas posições de equilíbrio, e as transformações podem começar ou terminar em temperaturas diferentes das mostradas nos diagramas de fase de equilíbrio. Nestas práticas circunstâncias, a temperatura real em que a transformação de fase ocorre dependerá tanto na taxa e direção da temperatura mudança. No entanto, os diagramas de fase informações valiosas para praticamente todo o metal operações de processamento que envolvem o aquecimento metal, como fundição, trabalho a quente, e todos os tratamentos térmicos.

De acordo com Barbosa (2012), a qualidade da peça fundida depende do metal utilizado como matéria-prima, e a qualidade deste depende basicamente de sua composição química, particularmente o seu nível de impurezas e da sua microestrutura, que é influenciada tanto pela composição química como pelas condições de resfriamento e do processo de fundição em geral.

Conclusões

Evidencia-se a grande importância e utilidade da liga para as aplicações atuais que exigem suas propriedades, conhecidas como ligas de alto desempenho.

No presente estudo foi possível observar a forma de manipulação dos materiais, metais, de tal modo a atender as demandas mais exigentes do mercado.

Dessa forma, sempre que é preciso trabalhar com um certo tipo de metal e o mesmo não atender as características ou propriedades mecânicas necessárias, a adição de outros metais junto a ele é uma boa solução para o problema, desde que seja analisado os requisitos mínimos de solubilidade sólida e solidificação.

Estudos como este são feitos frequentemente em situações reais em que se buscam produzir ligas com as mais diversas características e propriedades e serve como base para aplicações futuras, no intuito de aperfeiçoar o método e aumentar a variedade e viabilidade de produção de ligas metálicas.

Referências Bibliográficas

- 1 A. C. F. da Silva; P. M. Homem. **Ligas metálicas: investigação e conservação.** Secção de museologia, Dept. Ciências e Técnicas do Patrimônio, Universidade do Porto, 2008.
- 2 M. Rodrigues. **Cobre.** Química Nova na Escola, vol 34, pp 02, 2012.
- 3 W. D. Callister. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução.** 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. p 256.
- 4 J. F. Shackelford. **Ciência dos Materiais.** 6.ed. São Paulo: Pearson, 2008. p. 179.
- 5 B. M. G. Vieira. **Alteração das propriedades mecânicas de uma liga UNS N08826 por tratamento térmico de envelhecimento.** Universidade do Porto. Monografia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais (DEMM), 2010
- 6 M. Blanco; N. Barelli; A. V. Benedetti. **Desenvolvimento de um dispositivo para obtenção de monocristais de ligas à base de cobre.** Química Nova na Escola. vol 34 pp 03, 2003.
- 7 A. V. Benedetti; R. Z. Nakazato; P. T. A. Sumodjo; P. L. Cabot; F. A. Centellas; J. A. Garrido; **Electrochim.** Acta 1991, 36, 1409.
- 8 A. V. Benedetti; P. T. A. Sumodjo; K. Nobe; P. L. Cabot; W. G. Proud; **Electrochim.** Acta 1995, 40, 2657.
- 9 M. R. F. Hurtado; J. C. Ferrer; A. T. Adorno; P. T. A. Sumodjo; A. V. Benedetti. **Electrochem.** Soc. Proceedings, Pennington: NY, PV, 1998, 97-26, 665.
- 10 S. S. Rosatto; P. L. Cabot; P. T. A. Sumodjo; A. V. Benedetti; **Electrochim.** Acta 2001, 46, 1043.
- 11 F.C. Campbell. **Elements of Metallurgy and Engineering Alloys.** ASM International®, 2008, p. 64.
- 12 B. Wierzba; W. Skibinski. **The interdiffusion in copper-nickel alloys.** Journal of Alloys and Compounds. 2016. p 106.
- 13 A. I, F. Silva; J. C. AFONSO. **Avaliação do efeito da concentração de carbonato na eletrodeposição de cobre sobre discos de Aço-Carbono.** Química Nova na Escola. vol 31 pp 01, 2008.
- 14 W. A. Monteiro; J. A. G. Carrio; M. A. Carvalhal; I. M. Marques; C. R. da Silveira; G. F. Silva. **Comportamento elétrico e mecânico de ligas metálicas ternárias a base de cobre níquel obtidas por metalurgia do pó.** In 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 2010, Campos do Jordão. p. 4838.

- 15 Liberto, R. C. N.; Magnabosco, R.; Falleiros, N, A. **Propriedades mecânicas e resistência à corrosão da liga cu10ni-3al-1,3fe após endurecimento por precipitação.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, vol. 6, n. 2, p. 120, 2009.
- 16 Askeland, Donald. R.; PHULÉ, Pradeep. P. **Ciência e engenharia dos materiais.** 2.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011, p. 311.
- 17 Monticeli, A. R. **Um estudo sobre sistemas de inequações lineares.** Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Unicamp, Campinas, 2010.
- 18 Crundwell, F K; Moats, M. S.; Ramachandran, V. **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals.** 2011. Elsevier. Oxford UK, p. 73.
- 19 Schlesinger, Mark, E.; King, Matthew, J.; Sole, K. C.; Davenport, Willian, G. **Extractive Metallurgy of Copper.** 2011. Elsevier. Oxford UK. p. 29.
- 20 Barbosa C. **História do Cobre.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. p.21. Disponível em <<http://www.jorgestreet.com.br/arquivos/professores/neris/cobre.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- 21 ISO: International Standard Organization. **ISO 377:2013 Steel and Steel Products – Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing.** 2013.
- 22 ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6892 Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à temperatura ambiente.** 2013.