

A adoção de apostila em nosso curso e, em especial, nesta disciplina, se faz necessário na medida em que, dada a grande diversidade dos assuntos a serem abordados, não se encontra uma obra que possamos adotar como livro texto. Teríamos que eleger vários compêndios para se abranger todo o programa da disciplina, o que não é viável devido, além do fator custo, à dificuldade de adaptação dos discentes, nesta fase inicial, com o linguajar técnico utilizado nestas obras, nem sempre acessível ao estudante do Ensino de 2º Grau.

Aos menos avisados, porém, queremos deixar claro que não pretendemos, com esta abordagem, desestimular a busca da literatura técnica especializada pelos nossos alunos. Incentivamos, sim, não só a consulta de livros, como também de periódicos que veiculam artigos técnicos específicos, por entendermos que se constituem fonte vital para o desenvolvimento profissional no campo técnico-científico na atualidade. Para enfatizar o que acabamos de mencionar, esclarecemos que, como é praxe, citamos a bibliografia consultada para a compilação desta apostila, sendo que as obras referenciadas são encontradas, em sua quase totalidade, na biblioteca desta Escola, que tem por objetivo precípuo, servir aos seus alunos. Por outro lado, no próprio horário de aulas desta disciplina, procuramos abrir espaço para que os alunos, sob nossa orientação, possam tomar contacto com obras específicas na biblioteca.

Finalizando, fazemos as seguintes considerações:

1. a apostila pretende ser um ponto de partida, ou mesmo um meio, para se introduzir os alunos desta disciplina nos tópicos abordados. Não se propõe, portanto a esgotar os assuntos em pauta, ou seja, não se constitui em fim em si mesma;

2. ela funcionará como notas de aula; com isto, o aluno deverá se preocupar o mínimo com anotações, o que possibilitará sua maior participação em aula, facilitando o seu aprendizado;

3. as ilustrações se restringem ao estritamente necessário, já que este compêndio está voltado para a realidade desta Escola, o que implica dizer, adequado às possibilidades dos laboratórios da mesma. Portanto, nas aulas práticas se ilustrará o assunto com os próprios equipamentos ou instrumentos aqui encontrados.

IV. TEORIA DAS LIGAS

Neste capítulo estudaremos, de forma genérica, as ligas metálicas.

1. CONCEITOS E TERMINOLOGIA

Liga metálica é a associação de um elemento metálico, com um ou mais elementos, metálicos ou não metálicos, resultando em um material com características metálicas.

É normalmente obtida por solidificação de uma fase líquida. A notação utilizada para identificar uma liga entre A e B, é: liga A-B.

Exs.: liga Cu-Ni; liga Fe-C.

As ligas são homogêneas do ponto de vista microscópico, porém, heterogêneas na escala atômica.

Com os elementos disponíveis para a formação das ligas (aproximadamente 80) é possível formar cerca de três mil (3.000) ligas binárias e oitenta mil (80.000), ternárias. Porém, o número de ligas de interesse industrial está por volta de trinta. Elas são amplamente empregadas industrialmente porque possuem propriedades mecânicas superiores às dos metais puros, sendo que estas propriedades podem ser modificadas através da alteração de sua composição química e/ou sua estrutura.

Do ponto de vista de composição química e estrutural, uma liga é formada por componentes, fases e constituintes.

Componente é um elemento ou composto químico que entra na formação de cada fase. Em outras palavras o componente é o elemento ou composto formador da liga.

Fase é uma porção macroscopicamente homogênea, fisicamente distinta e separada das outras partes da liga por uma superfície de separação, denominada interface. Todos os pontos de uma fase apresentam a mesma configuração atômica; em outras palavras, se a fase é sólida, a mesma apresenta um sistema cristalino definido.

OBSERVAÇÃO: uma fase pode ser um sólido, um líquido ou um gás.

Constituinte é uma fase ou um agrupamento de fases que apresenta uma forma e distribuição característica ao microscópio ou seja, no exame microscópico.

OBSERVAÇÃO: o agrupamento de fases recebe o nome de mistura mecânica e poderá ser dito eutético ou eutetóide, conforme veremos em estudos posteriores.

2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS

As ligas metálicas podem classificar-se quanto ao número de componentes e quanto ao número de fases.

2.1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO NÚMERO DE COMPONENTES

Quanto ao número de componentes, elas podem classificar-se em binárias, ter-

nárias, etc. Ela é dita binária quando possui dois componentes; ternária, quando possui três componentes; etc.

2.2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO NÚMERO DE FASES, NO ESTADO SÓLIDO

Quanto ao número de fases, que as ligas apresentam no estado sólido, elas são classificadas em homogêneas ou heterogêneas. A liga é dita homogênea quando possui um único tipo de fase no estado sólido. A mesma é dita heterogênea quando possui duas ou mais fases diferentes no estado sólido.

3. CLASSIFICAÇÃO DAS FASES DE UMA LIGA NO ESTADO SÓLIDO

A fase de uma liga, no estado sólido, pode ser classificada conforme se verá a seguir. Ela pode ser um elemento puro, uma solução sólida ou um composto químico.

3.1. ELEMENTO PURO

Neste caso, a fase é composta de um único elemento. Então o componente será a própria fase. Isto ocorre quando os elementos componentes da liga são completamente miscíveis no estado sólido. Nas ligas Cd-Bi temos duas fases distintas: a fase Cd e a fase Bi.

3.2. SOLUÇÃO SÓLIDA

Assim como ocorre no estado líquido, também no estado sólido podemos ter a dissolução de um elemento em outro, ou seja, um elemento B pode se dissolver no elemento A, no estado sólido. Solução sólida é, pois, a dissolução de um elemento B na rede cristalográfica de um elemento A.

A notação utilizada para se identificar uma solução sólida de B em A é: A(B), onde B, elemento entre parênteses, é o soluto e A, elemento que antecede o parênteses, é o solvente.

EXEMPLOS: Ni (Cu) - indica solução de Cu em Ni;

Cu (Ni) - indica solução sólida de Ni em Cu;

Fe (C) - indica solução sólida de C em Fe.

Pode-se ter, também, solução sólida de um elemento em um composto (ou de um composto em outro composto). Além do mais, pode-se ter mais de um soluto dissolvido em um mesmo solvente.

OBSERVAÇÃO: solvente é o elemento ou composto que conserva a rede cristalina.

Em caso de ambos terem a mesma rede cristalográfica, solvente é o elemento que entra em maior quantidade na formação da liga. O componente solúvel é o soluto.

Quanto à disposição do soluto na rede cristalográfica do solvente, a solução sólida pode se classificar em: intersticial e substitucional.

3.2.1. SOLUÇÃO SÓLIDA INTERSTICIAL

E aquela em que os átomos do soluto se colocam nos interstícios da rede cristalográfica do solvente. A distribuição dos átomos do soluto nos interstícios é aleatória. A figura 32 ilustra este tipo de solução sólida.

A solução sólida de carbono no ferro constitui um exemplo de solução sólida intersticial.

Sendo os interstícios das redes cristalográficas de dimensão pequena, a solução sólida intersticial só poderá formar-se quando o átomo do elemento a se inserir for muito pequeno. Entre os elementos que apresentam facilidade de formar solução sólida intersticial em ligas metálicas, destacam-se os seguintes elementos: hidrogênio, carbono e boro.

3.2.2. SOLUÇÃO SÓLIDA SUBSTITUCIONAL

E aquela em que átomos do solvente são substituídos por átomos do soluto. Isto é, átomos do soluto ocupam posição principal na rede cristalográfica do solvente. Esta substituição pode se dar de forma desordenada (aleatória) ou ordenada. A figura 33-a e b ilustra este tipo de solução sólida.

A formação da solução sólida substitucional obedece a certas condições (fatores), denominadas regras de Hume-Rothery, que serão apresentadas a seguir:

- fator rede cristalina: os elementos componentes da liga devem apresentar a mesma rede cristalina;
- fator tamanho: a relação entre os átomos dos elementos componentes da liga, A e B, no tocante ao tamanho, deve estar compreendida entre 0,85 e 1,15, ou seja, $0,85 \leq \frac{r_A}{r_B} \leq 1,15$, onde: r_A - raio do átomo do elemento A; r_B - raio do átomo do elemento B.
- fator valência: os elementos devem possuir valências idênticas;
- fator eletronegatividade: não deve haver diferença apreciável de eletronegatividade entre os elementos componentes da liga.

Quando estas condições são plenamente satisfeitas, há possibilidade de formação de solução sólida em todas as proporções entre os elementos. Como exemplos típicos citamos as ligas Ni-Cu e Au-Cu. Nestas ligas um elemento se dissolve no outro em qualquer proporção.

3.3. COMPOSTO QUÍMICO

E uma fase que ocorre em uma liga metálica, quando os elementos participantes apresentam acentuada diferença de eletronegatividade. Há forte tendência de geração deste tipo de fase quando a liga se forma entre um elemento metálico e outro não metálico. Sua formação decorre de uma ligação química entre os elementos participantes. Os compostos químicos têm composição química fixa. Isto não ocorre nas soluções sólidas, onde a composição química pode variar em uma faixa ampla de composição, conforme veremos nos diagramas de equilíbrio.

Como exemplos podemos citar:

- Fe₃C nos aços e ferros fundidos (ligas Fe-C);
- NbC nos aços ligados ao nióbio;
- VC nos aços ligados ao vanádio;
- Fe₂N nos aços nitretados;
- MgCu₂ nas ligas Cu-Mg;
- MgZn₂ nas ligas Zn-Mg.

Os compostos químicos são, de um modo geral, caracterizados por alta dureza e elevada fragilidade. Estas características tornam estas fases prejudiciais, quando existem em forma maciça. Porém, são de grande interesse industrial quando estão finamente dispersas em uma matriz metálica, pois conferem à mesma (matriz) elevadas propriedades mecânicas.

4. EXPRESSÃO DA COMPOSIÇÃO DE UMA LIGA

A composição de uma liga pode ser expressada em porcentagem atômica, como ocorre nos trabalhos científicos, ou em porcentagem peso, como se verifica na prática industrial.

Consideremos uma liga binária formada pelos componentes A e B.

4.1. PORCENTAGEM PESO

Cada 100 g da liga é formada por X_g de A e, conseqüentemente, (100 - X)g de B.

$$\left. \begin{array}{l} Xg \text{ de A (\% peso de A): } X\%A; \\ (100 - X)g \text{ de B (\% peso de B): } (100 - X)\%B. \end{array} \right\} 100 \text{ g da liga A-B}$$

4.2. PORCENTAGEM ATÔMICA

Cada 100 átomos da liga é composta por Z átomos de A e (100 - Z) átomos de B.

$$\left. \begin{array}{l} Z \text{ átomos de A (\% atômica de A): } Z\%A \\ (100 - Z) \text{ átomos de B (\% atômica de B): } (100 - Z)\%B. \end{array} \right\} 100 \text{ átomos da liga A-B}$$

4.3. CONVERSÃO DE PORCENTAGEM PESO EM PORCENTAGEM ATÔMICA E PORCENTAGEM ATÔMICA EM PORCENTAGEM PESO

$$Z = \frac{100 \cdot X}{X + \frac{M_A}{M_B} (100 - X)}$$

(porcentagem peso em porcentagem atômica)

(porcentagem atômica em porcentagem peso)

$$X = \frac{100 \cdot Z}{Z - \frac{M_B}{M_A} (100 - Z)}$$

- Onde: X - % peso de A;
 (100 - X) - % peso de B;
 M_A - massa atômica de A;
 M_B - massa atômica de B;
 Z - % atômica de A;
 (100 - Z) - % atômica de B.

Tomemos como exemplo a liga contendo 60% de Cu e 40% de Ni, denominada cons tantan, empregada na fabricação de resistência elétrica e termopares. Convertamos esta porcentagem peso em porcentagem atômica, sendo dadas:

$M_{Cu} = 63,54$
 $M_{Ni} = 58,69$

SOLUÇÃO:

$$\% \text{ át. Cu} = \frac{100\% \text{ Cu}}{\% \text{ Cu} + \frac{M_{Cu}}{M_{Ni}} (100 - \% \text{ Cu})}$$

$$\% \text{ át. Cu} = \frac{100 \times 60}{60 + \frac{63,54}{58,69} (100 - 60)}$$

$$\% \text{ át. Cu} = \frac{6.000}{103,30} = 58,08\%$$

$$\% \text{ át. Cu} = 58,08\%$$

$$\% \text{ át. Ni} = 100 - \% \text{ át. Cu} = 100 - 58,08 = 41,92$$

$$\% \text{ át. Ni} = 41,92\%$$

V. DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO

1. INTRODUÇÃO

Os diagramas de equilíbrio são também denominados diagramas de fases. Traduzem o comportamento de uma liga quando a mesma sofre transformação no equilíbrio, ou seja, com resfriamento (ou aquecimento) razoavelmente lento.

O diagrama de fase é uma representação gráfica dos limites de temperatura e composição das zonas de domínio das fases presentes nas ligas, bem como das reações entre estas fases em um sistema metálico.

Sistema é uma porção de matéria isolada, que se constitui objeto de um estudo. Em outras palavras, é uma porção do universo que se considera separada do restante para um dado estudo.

2. CLASSIFICAÇÃO DAS REAÇÕES DAS LIGAS

Na formação ou transformação das ligas pode haver reação entre as fases presentes. Como estas reações envolvem três fases simultaneamente, considerando-se a liga formada por dois componentes, as mesmas (as reações) serão invariantes. Ou ainda, estas reações se passarão à temperatura constante. Elas se subdividem em dois grupos: reações eutéticas e reações peritéticas.

2.1. REAÇÕES EUTÉTICAS

São aquelas que ocorrem quando, no resfriamento, uma fase se transforma em duas novas fases.

- a) $L \rightleftharpoons \alpha + \beta$ (eutética - um líquido gerando dois sólidos);
- b) $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \beta$ (eutetóide - um sólido gerando dois novos sólidos);
- c) $L_1 \rightleftharpoons \alpha + L_2$ (monotética - um líquido gerando um sólido e outro líquido).

OBSERVAÇÃO: \rightarrow indica resfriamento
 \leftarrow indica aquecimento

2.2. REAÇÕES PERITÉTICAS

São aquelas que ocorrem quando duas fases, no resfriamento, geram uma nova fase.

- a) $L_1 + L_2 \rightleftharpoons \alpha$ (sintética - dois líquidos gerando um sólido);
- b) $L + \alpha \rightleftharpoons \beta$ (peritética - um líquido e um sólido gerando outro sólido);
- c) $\alpha + \beta \rightleftharpoons \gamma$ (peritetóide - dois sólidos gerando outro sólido).

OBSERVAÇÕES:

- em se tratando de metal puro, no resfriamento (ou aquecimento), tem-se uma fase líquida (ou sólida) gerando uma fase sólida (ou líquida) durante a solidificação (ou fusão);

$L \rightleftharpoons \alpha$

• Havendo alotropia, no caso do metal puro, tem-se uma fase sólida gerando outra também sólida, ao se atingir um ponto de transformação:



3. REGRA DAS FASES OU REGRA DE GIBBS

Esta regra nos diz quantas variáveis temos que fixar para definir um sistema que se encontra em equilíbrio.

Os fatores que comumente atuam sobre um sistema são: temperatura, pressão e composição (ou quantidade relativa dos componentes). Estes fatores, que são variáveis, são designados por variância ou grau de liberdade (V) do sistema. A regra das fases determina que: "o grau de liberdade de um sistema é igual ao número de componentes, menos o número de fases, mais dois." Matematicamente, temos:

$$V = C - F + 2$$

V - grau de liberdade (corresponde ao número de fatores que podemos fazer variar, arbitrariamente, dentro de certos limites, sem que o número e a natureza das fases se alterem);

C - número de componentes;

F - número de fases;

2 - corresponde aos fatores temperatura e pressão.

No caso particular das ligas metálicas, não se consideram os efeitos do fator pressão, pois os sistemas destas ligas normalmente são constituídos de fases líquidas e sólidas, onde a variação de pressão tem efeito desprezível sobre a temperatura de equilíbrio do sistema. Admitindo, então, que a pressão permanece constante (e igual à pressão atmosférica), podemos escrever:

$$V = C - F + 1$$

pois já foi retirado um grau de liberdade do sistema.

3.1. APLICAÇÃO DA REGRA

a) Consideremos uma liga de dois componentes (C = 2).

1. Nas zonas monofásicas, ou seja, campos onde existe uma única fase, como a líquida, soluções sólidas, compostos químicos, temos:

$$V = 2 - 1 + 1 = 2$$

ou seja, o sistema tem dois graus de liberdade. Neste caso o sistema é dito divariante, ou seja, pode-se variar a temperatura e a composição independentemente (dentro de certos limites), sem que haja variação na estrutura de fases.

2. Sobre as linhas líquidas, sólidas, de transformação de estado sólido ou qualquer outro de duas fases presentes simultaneamente, temos:

$$V = 2 - 2 + 1 = 1$$

ou seja, o sistema tem um grau de liberdade. Neste caso o sistema é dito univariante ou monovariante, ou seja, fixado uma variável, imediatamente resulta a fixação de outra. Em outras palavras, uma variação

de temperatura deverá ser acompanhada de uma alteração correspondente de composição e vice-versa, para que as duas fases continuem a existir simultaneamente.

3. Em regiões de presença de três fases, como por exemplo no caso em que uma fase líquida L está se transformando simultaneamente em duas fases sólidas, α e β , temos:

$$V = 2 - 3 + 1 = 0$$

ou seja, o sistema não tem nenhum grau de liberdade. Neste caso o sistema é dito invariante, ou multivariante, isto é, existe somente uma temperatura (definida) para a qual as três fases coexistem (existem simultaneamente).

b) Consideremos um metal puro (C = 1).

Se existem duas fases em equilíbrio, como por exemplo líquido $L \rightleftharpoons$ sólido α ou $L \rightleftharpoons$ sólido β , tem-se:

$$V = 1 - 2 + 1 = 0$$

ou seja, o sistema não tem nenhum grau de liberdade. Neste caso o sistema é dito invariante, isto é, durante a solidificação (ou fusão) ou durante uma transformação de estado sólido (transformação alotrópica) de um metal puro, a temperatura se mantém constante.

4. CURVAS DE RESFRIAMENTO

Elas traduzem o comportamento de um metal puro, ou de uma liga de composição fixa, ao ser resfriado, partindo-se do estado líquido. A fig. 34 está representando diversas curvas de resfriamento. O gráfico correspondente às curvas de resfriamento tem lançado no eixo das ordenadas a temperatura e, em abscissas, tempo. As curvas indicadas na fig. 34 representam:

- a) metal puro;
- b) liga com formação de solução sólida;
- c) liga com formação de eutético;
- d) liga com formação de solução sólida e eutético.

Se houver transformação de estado sólido, ela será detectada na curva de resfriamento. A fig. 35 traduz esta afirmativa, tomando-se como referência o ferro, ou seja, ela representa a curva de resfriamento do ferro puro.

OBSERVAÇÃO: as reações invariantes, a solidificação de um metal puro, a transformação alotrópica de um metal puro são traduzidas por uma horizontal (uma isoterma), pois estes fenômenos se passam à temperatura constante.

5. CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO

Nos ocuparemos dos diagramas de equilíbrio de ligas de dois componentes (ligas binárias). Podemos construí-los a partir das curvas de resfriamento.

Estes diagramas representam um sistema de ligas de dois componentes e são construídos lançando-se em ordenadas valores de temperaturas em que ocorrem modificações

na constituição das ligas e, em abscissas, as composições respectivas. Todos os pontos detectados nas curvas de resfriamento são colocados nesse sistema de coordenadas, permitindo definir todas as linhas e pontos críticos do respectivo sistema de ligas. Na figura 36 está representado o diagrama mais simples de ligas binárias (ligas de dois componentes A e B). O exemplo se refere às ligas Cu-Ni.

A linha líquida é definida por todos os pontos correspondentes às temperaturas de início de solidificação, de todas as ligas do sistema. Acima desta linha teremos somente fases líquidas.

A linha sólida é a sequência de todos os pontos relativos à temperatura de fim de solidificação das ligas do sistema. Abaixo dela teremos somente fases sólidas.

Entre as linhas líquidas e sólidas temos, simultaneamente, a existência de fase líquida e fase sólida.

NOTA: nos diagramas de equilíbrio, uma linha horizontal corresponde a um valor de temperatura (linha de temperatura) e uma linha vertical à composição nominal da liga (linha de composição).

OBSERVAÇÃO: as duas verticais extremas, que delimitam um diagrama de equilíbrio, correspondem ao comportamento dos componentes puros da liga.

6. APLICAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO

Através deste diagrama podemos determinar, para uma liga com composição química definida, que se encontra a dada temperatura, qual ou quais fases estão presentes na liga.

No caso de existirem duas fases presentes, podemos determinar a composição química de cada fase ou constituinte presente (regra da alavanca), bem como a quantidade relativa de cada fase ou constituinte presente (regra da alavanca ou dos segmentos inversos).

OBSERVAÇÃO: no caso de existir uma única fase presente, a composição química da fase coincide com a composição nominal da liga. E mais, logicamente, cem por cento (100%) desta liga é constituída por esta fase.

Tomemos para raciocínio a liga P - liga com composição nominal P - indicada na figura 37. Admitamos que esta liga se encontre à temperatura T, tal como indicado na figura. Podemos observar que o cruzamento da linha de temperatura T - linha horizontal - com a linha de composição da liga P - linha vertical, caiu em um campo de existência de fase líquida e sólida (ponto P). Logo, esta liga, em tais condições, é composta simultaneamente por duas fases: fase líquida L e sólida S. Determinemos a composição química e a quantidade de cada uma destas fases.

Composição química de cada fase presente - REGRA DA HORIZONTAL.

As interseções da linha de temperatura com as linhas do diagrama, mais próximas do ponto P - à direita (S) e à esquerda (L) - definem as composições das fases sólida e líquida L, respectivamente. S corresponde ao ponto Y no eixo das composições

e L, ao ponto X.

Quantidade relativa de cada fase presente - REGRA DA ALAVANCA (OU DOS SEGMENTOS INVERSOS).

Chamemos de P_L a quantidade de fase líquida L, expressa em percentagem, e P_S a quantidade de fase sólida S, também em percentagem.

As expressões seguintes traduzem, matematicamente, a regra da alavanca.

$$P_L = \frac{SP}{SL} \times 100$$

e

$$P_S = \frac{PL}{SL} \times 100$$

Onde:

\overline{SP} (segmento oposto à fase líquida) representa a quantidade de líquido;

\overline{PL} (segmento oposto à fase sólida) representa a quantidade de sólido;

\overline{SL} (segmento total) representa o total da liga.

Aplicando-se, pois, estas fórmulas, determina-se a quantidade percentual das fases presentes.

7. DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO TÍPICOS

Estudaremos três tipos de equilíbrio de ligas binárias, que servirão de subsídios para compreensão de todos os outros.

Em nosso curso nos atermos ao estudo de ligas de dois componentes - A e B - completamente miscíveis no estado líquido, ou seja, onde A se dissolve em B em qualquer proporção, e vice-versa, quando a liga se encontra no estado líquido.

OBSERVAÇÃO: nos diagramas de fases ou equilíbrio, temos a seguinte convenção para representação das fases sólidas:

elemento puro - representado por seu símbolo químico, precedido da palavra cristal ou não.

solução sólida - representada por uma letra grega ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \dots$);

composto químico - representado pela sua fórmula química;

A fase líquida se representa pela letra L.

7.1. LIGA DE DOIS COMPONENTES - A e B - COMPLETAMENTE MISCÍVEIS (SOLÚVEIS) NO ESTADO SÓLIDO

Este tipo de liga dá origem ao chamado diagrama isomorfo. A figura 38-a corresponde a este tipo de diagrama. O mesmo já havia sido comentado anteriormente.

T_{FA} : temperatura de fusão de A

T_{FB} : temperatura de fusão de B

T_{AMB} : temperatura ambiente.

α : solução sólida de B em A - A (B), ou A em B - B (A), já que um se dissolve no outro em qualquer proporção.

Este tipo de liga apresenta, portanto, um único tipo de fase à temperatura ambiente.

Na figura 38-b está indicado o estudo do resfriamento da liga K - 40% A e 60% B. Analisemos as diferentes temperaturas indicadas na figura.

- Em T_X :
Fase L - 40% A e 60% B.

- Em T_Y :
Inicia-se a solidificação.

- Em T_1 :
Fases L e α .
Composição de L (Corresponde à L_1) - 67% A e 33% B.
Composição de α (Corresponde à S_1) - 9% A e 91% B.
 P_L - quantidade de L

$$P_L = \frac{S_1 K}{S_1 L} \times 100 = \frac{31}{58} \times 100 = 53,4\%$$

P_{α} - quantidade de α .

$$P_{\alpha} = \frac{K L_1}{S_1 L} \times 100 = \frac{27}{58} \times 100 = 46,6\%$$

- Em T_2 :

Fases L e α .
Composição de L (Corresponde à L_2) - 85% A e 15% B.
Composição de α (Corresponde à S_2) - 21% A e 79% B.

P_L - quantidade de L

$$P_L = \frac{S_2 K}{S_2 L} \times 100 = \frac{19}{64} \times 100 = 29,7\%$$

P_{α} - quantidade de α .

$$P_{\alpha} = \frac{K L_2}{S_2 L} \times 100 = \frac{45}{64} = 70,3\%$$

- Em T_3 :
Encerra-se a solidificação

- Em T_3 :
Fase α - 40% A e 60% B.

- Em T_{AMB} :
Fase α - 40% A e 60% B.

Como exemplo de ligas que apresentam este tipo de diagrama, podemos citar Cu-Ni, Ag-Au, Au-Pt, Cu-Pt, Ni-Pt, Fe-Pt, dentre outras.

A figura 41 representa o diagrama para as ligas Cu-Ni, indicando a microestrutura correspondente a cada campo do diagrama.

7.2. LIGA DE DOIS COMPONENTES - A e B - COMPLETAMENTE IMISCÍVEIS (INSOLÚVEIS) NO ESTADO SÓLIDO

A figura 39-a corresponde a um diagrama de fases de uma liga de dois componentes que são insolúveis no estado sólido.

CEG : é a linha líquida

GEH : é a linha sólida

L : fase líquida

Cr.A: fase sólida composta só do elemento A (cristal de A)

Cr.B: fase sólida composta só do elemento B (cristal de B)

E : ponto eutético

Este ponto corresponde à liga eutética, que é a liga de menor ponto de fusão, dentro do grupo de ligas entre os componentes A e B. A liga eutética tem comportamento de um metal puro, ou seja, solidifica-se a uma temperatura constante.

No exemplo dado, E corresponde à seguinte composição química: 60% A e 40% B.

OBSERVAÇÃO:

Uma liga que está à esquerda de E, isto é, entre A e E, é chamada hipoeutética (de composição inferior à liga eutética); uma que está à direita de E, isto é, entre E e B, é chamada hipereutética (de composição superior à eutética).

T_{FA} : temperatura de fusão de A puro.

T_{FB} : temperatura de fusão de B puro.

T_E : temperatura eutética (corresponde à linha horizontal GEH).

T_{AMB} : temperatura ambiente.

Na figura 39-b está ilustrado o estudo do resfriamento de três ligas diferentes: liga E (eutética), liga X (hipoeutética) e liga Y (hipereutética), conforme indicado nos itens a, b e c, respectivamente.

a) Estudo da liga eutética E.

E corresponde a 60% A e 40% B.

Em T_1 :

Somente L com a composição correspondente ao ponto eutético E, que nós indicamos L_E .

Em T_2 :

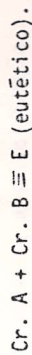
Idem em T_1 .

Em T_E :

Nesta temperatura ocorre a reação eutética, ou seja, a fase líquida, com a composição eutética, transforma-se simultaneamente em duas fases sólidas: Cr. A e Cr. B, dispostas, de um modo geral, lameladamente.



O produto da reação eutética é uma mistura mecânica de duas fases sólidas e recebe o nome de eutético.



Quantidade de Cr. A e de Cr. B contidos no eutético:

$$\% Cr. A = \frac{HE}{HG} \times 100$$

$$\% Cr. B = \frac{GE}{HG} \times 100$$

Ao se continuar o resfriamento da liga, nenhuma nova transformação estrutural ocorrerá na mesma. Assim, na T_{AMB} a liga será constituída somente de eutético (Cr. A + Cr. B). Inclusive a quantidade das fases presentes no eutético, ou seja, de Cr. A e de Cr. B, será a mesma que na T_E .

$$\% Cr. A = \frac{EB}{AB} \times 100$$

$$\% Cr. B = \frac{EA}{AB} \times 100$$

Resumindo, ultrapassada a temperatura eutética, no resfriamento a liga não sofrerá nenhuma nova modificação.

b) Estudo da liga hipoeutética X

No exemplo tomado, X corresponde à seguinte composição química: 85% A e 15% B.

Em T_1 :

Somente L, com composição correspondente ao ponto X.

Em T_X :

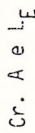
Inicia-se a solidificação, que só se concluirá ao se atingir T_E .

Em T_2 : Fase líquida L, com composição química correspondente ao ponto X', e fase sólida formada são do elemento A (Cr. A).

Para se saber as quantidades de L e Cr. A basta aplicar a regra da alavanca. A medida que a temperatura cai, entre T_X e T_E , a composição química da fase L vai variando segundo a linha CE.

Em T_E :

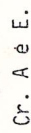
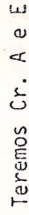
Tem-se Cr. A e a fase L com a composição correspondente ao ponto E.



Então, L_E sofre reação eutética:



Logo, ultrapassada a temperatura eutética, teremos:

Em T_{AMB} :

Quantidade de Cr. A e de E a esta temperatura.

$$\% Cr. A = \frac{XE}{AE} \times 100$$

$$\% E = \frac{XA}{AE} \times 100$$

c) Estudo da liga hipereutética Y

No exemplo tomado, Y corresponde à seguinte composição química: 30% A e 70% B.

Em T_1 :

Somente L, com a composição correspondente ao ponto Y.

Em T_Y :

Inicia-se a solidificação da liga que só se concluirá ao se atingir T_E .

Em T_2 :

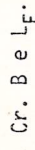
Fase líquida L, com composição química correspondente ao ponto Y', e a fase sólida formada são do elemento B (Cr. B).

Para se saber as quantidades de L e Cr. B basta aplicar a regra da alavanca.

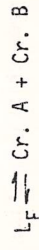
A medida que a temperatura cai, entre T_Y e T_E , a composição química da fase L vai variando segundo a linha DE.

Em T_E :

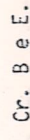
Tem-se Cr. B e a fase L com composição correspondente ao ponto E.



Então, L_E sofre a reação eutética:



Logo, ultrapassada a temperatura eutética, teremos:



Todos os comentários feitos para o eutético no item 7.2 se aplicam aqui também.

T_{fA} : temperatura de fusão de A puro.

T_{fB} : temperatura de fusão de B puro.

T_E : temperatura eutética (corresponde à linha horizontal GEH).

T_{AMB} : temperatura ambiente.

Para estudo do resfriamento de ligas de diferentes composições, utilizaremos as figuras 40-b e 40-c.

Na figura 40-b está ilustrado o estudo do resfriamento de três ligas diferentes: liga E (eutética), liga X - entre A e M - liga hipoeutética, liga Y - entre N e B - liga hipereutética, conforme indicado nos itens a, b e c, respectivamente.

a) Estudo da liga eutética E.

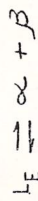
E corresponde a 60% A e 40% B.

Em T_1 : Somente L com a composição correspondente ao ponto eutético, que nós indicaremos L_E .

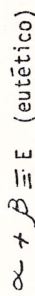
Em T_2 : Idem em T_1 .

Em T_E :

Nesta temperatura ocorre a reação eutética, ou seja, a fase líquida, com a composição eutética, transforma-se simultaneamente em duas fases sólidas: α e β , dispostas, de um modo geral, lamelaramente.



O produto da reação eutética é uma mistura mecânica de duas fases sólidas e recebe o nome de eutético.



Em T_E , α tem composição química correspondente ao ponto G e β , ao ponto H.

Quantidade de α e de β no eutético:

$$\% \alpha = \frac{HE}{HG} \times 100$$

$$\% \beta = \frac{GE}{HG} \times 100$$

Ao se continuar o resfriamento, ultrapassada a temperatura eutética, nenhuma nova transformação estrutural ocorrerá. Porém, α terá sua composição variando

Teremos de Cr. B e E.

Quantidade de Cr. B e de E a essa temperatura.

$$\% \text{ Cr. B} = \frac{YE}{BE} \times 100$$

$$\% \text{ E} = \frac{YB}{BE} \times 100$$

CONCLUSÃO:

Em resumo, à temperatura ambiente, podemos afirmar que se a liga tem composição:

- entre A e E - liga hipoeutética - sua estrutura é composta de Cr. A e de E;
- em E - liga eutética - sua estrutura é formada somente de E (eutético);
- entre E e B - liga hipereutética - sua estrutura é composta de Cr. B e de E.

L_E mais: para uma liga hipoeutética, quanto mais próxima for sua composição química do ponto A, maior será a quantidade de Cr. A e menor a de E; para uma liga hipereutética, quanto mais próxima estiver sua composição química do ponto B, maior será a quantidade de Cr. B e menor a de E.

Como exemplo de liga que apresenta este tipo de diagrama, podemos citar a liga Bi-Cd. Seu diagrama está evidenciado na figura 42. São raras as ligas que têm este comportamento. O mais comum é o caso que passaremos a analisar no item seguinte.

7.3. LIGA DE DOIS COMPONENTES - A e B - PARCIALMENTE MISCÍVEIS (SOLÚVEIS) NO ESTADO SÓLIDO

A figura 40-a corresponde a um diagrama de fases de uma liga de dois componentes que são parcialmente solúveis no estado sólido.

CEG : é a linha líquida.

CGEHD : é a linha sólida.

GM e HN : são chamadas linha solúvus.

As linhas solúvus separam as áreas de solubilidade sólida parcial de outras áreas sólidas bifásicas. É um limite das soluções sólidas terminais. A linha solúvus traz o máximo de soluto que se pode introduzir na rede cristalográfica do solvente.

L : fase líquida.

α : solução sólida de B em A (B dissolvido na rede cristalográfica de A).

β : solução sólida de A em B (A dissolvido na rede cristalográfica de B).

E : ponto eutético.

No exemplo dado, E corresponde à seguinte composição química: 60% A e 40% B.

segundo a linha GM e β , segundo a linha HN, ou seja, α se enriquecerá em A e β , em B.

Em T_{AMB} :

A temperatura ambiente α terá a composição correspondente ao ponto M e β , ao ponto N.

Quantidade de α e de β contidos no eutético nesta temperatura:

$$\% \alpha = \frac{EN}{MN} \times 100$$

$$\% \beta = \frac{EM}{MN} \times 100$$

b) Estudo da liga hipoeutética X

No exemplo tomado, X corresponde à seguinte composição química: 95% A e 5% B.

Acima da linha líquidus ^{tem somente fase líquida} com composição química correspondente ao ponto X.

Entre as linhas líquidus e sólidus - entre X' e X'' - fases L e α .

Abaixo da linha sólidus, inclusive à temperatura ambiente, somente a fase sólida α , com a composição correspondente ao ponto X.

c) Estudo da liga hipereutética Y

No exemplo tomado, Y corresponde à seguinte composição química: 5% A e 95% B.

Acima da linha líquidus tem somente fase líquida com composição química correspondente ao ponto Y.

Entre as linhas líquidus e sólidus - entre Y' e Y'' - fases L e β .

Abaixo da linha sólidus, inclusive à temperatura ambiente, somente a fase sólida β , com a composição correspondente ao ponto Y.

Na figura 40-c está ilustrado o estudo do resfriamento de duas ligas diferentes: liga Z - entre M e E - liga hipoeutética e liga W - entre E e N - liga hipereutética, conforme indicado nos itens d e e, respectivamente.

d) Estudo da liga hipoeutética Z

No exemplo tomado, Z corresponde à seguinte composição química: 80% A e 20% B.

Em T_1 : Somente L com a composição correspondente ao ponto Z.

Em T_2 : Inicia-se a solidificação da liga, que só se concluirá ao se atingir T_E .

Em T_3 : Fase líquida L, com composição correspondente ao ponto Z', e fase sólida α , com composição correspondente a Z''.

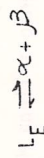
Para se saber as quantidades de L e α bastará aplicar a regra da alavanca. A medida que a temperatura cai, entre T_Z e T_E , a composição de L varia segundo a linha CE, e a de α , segundo CG.

Em T_E :

Tem-se α , com composição correspondente ao ponto G e L, com composição correspondente ao ponto E.

α e L_E

Então, L_E sofre a reação eutética:



Logo, ultrapassada a temperatura eutética, teremos:

α e E

Ao se continuar o resfriamento, nenhuma transformação estrutural ocorrerá, porém, α terá sua composição química variando segundo a linha GM.

Em T_{AMB} : A temperatura ambiente, α terá a composição correspondente ao ponto M e o eutético, ao ponto E.

Quantidade de α e E (constituintes presentes) na liga a esta temperatura:

$$\% \alpha = \frac{ZE}{ME} \times 100$$

$$\% E = \frac{ZM}{ME} \times 100$$

e) Estudo da liga hipereutética W

No exemplo tomado, W corresponde à seguinte composição química: 40% A e 60% B.

Somente L com a composição correspondente ao ponto W.

Em T_1 :

Em T_W :

Inicia-se a solidificação da liga, que só se concluirá ao se atingir T_E .

Em T_2 :

Fase líquida L, com composição correspondente ao ponto W', e fase sólida β , com composição correspondente a W''.

Para se saber as quantidades de L e β basta aplicar a regra da alavanca.

A medida que a temperatura cai, entre T_W e T_E , a composição de L varia segundo a linha DE, e a de β , segundo DH.

Em T_E :

Tem-se β , com composição correspondente ao ponto H e L, com composição cor-

respondente ao ponto E.

β e L_E .

Então, L_E sofre a reação eutética:

$L_E \rightarrow \alpha + \beta$.

Logo, ultrapassada a temperatura eutética, teremos:

β e E

Ao se continuar o resfriamento, nenhuma nova transformação estrutural ocorre, porém, β terá sua composição química variando segundo a linha HN.

Em T_{AMB} :

A temperatura ambiente, β terá a composição química correspondente ao ponto N e o eutético, ao ponto E.

Quantidade de β e E (constituintes presentes) na liga a esta temperatura:

$$\% \beta = \frac{WE}{NE} \times 100$$

$$\% E = \frac{WN}{NE} \times 100$$

CONCLUSÃO:

Em resumo, à temperatura ambiente, podemos afirmar que se a liga tem composi-

ção:

- entre A e M - liga hipoeutética - sua estrutura é formada só de α .
- entre M e E - liga hipoeutética - sua estrutura é composta de α e E;
- em E - liga eutética - sua estrutura é formada só de E;
- entre E e N - liga hipereutética - sua estrutura é composta de E e β ;
- entre N e B - liga hipereutética - sua estrutura é formada só de β .

E mais: para uma liga entre M e E, quanto mais próxima for sua composição química do ponto M, maior será a quantidade de α e menor a de E; para uma liga entre E e N, quanto mais próximo estiver sua composição química do ponto N, maior será a quantidade de β e menor a de E.

Como exemplo de ligas que apresentam este tipo de diagrama, podemos citar: Cu-Ag, Pt-Ag, Cu-Zn, Cd-Zn, Pb-Sb, Cu-Sn, Fe-C.

A figura 43 representa o diagrama para as ligas Pb-Sb, indicando a microestrutura correspondente a cada campo do diagrama.

• ÁTOMO INTERSTICIAL

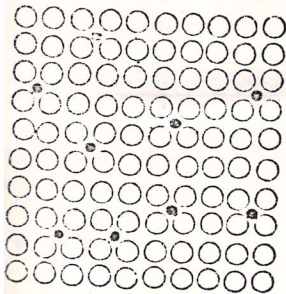


FIGURA 32

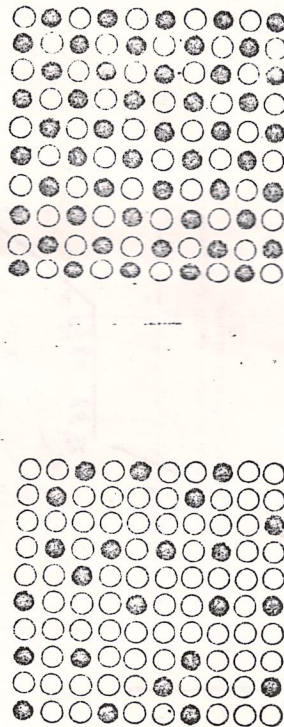


FIGURA 33

a - desordenada

b - ordenada

• ÁTOMO DE SOLUTO (átomo substitucional)

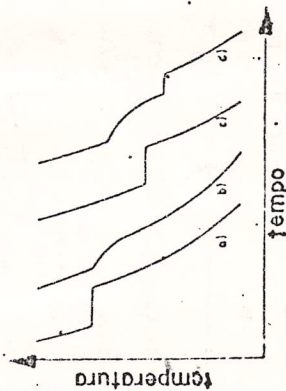
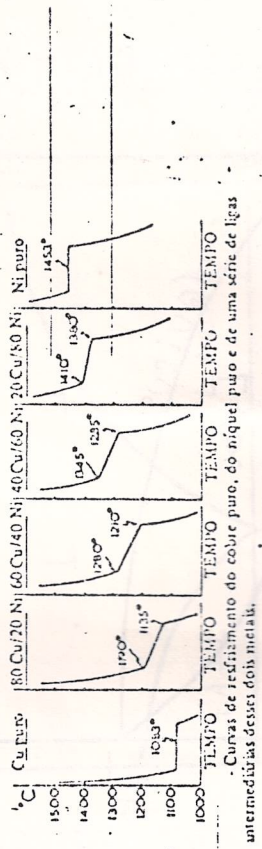


FIGURA 34



Curvas de resfriamento do cobre puro, do níquel puro e de uma série de ligas intermedias desses dois metais.

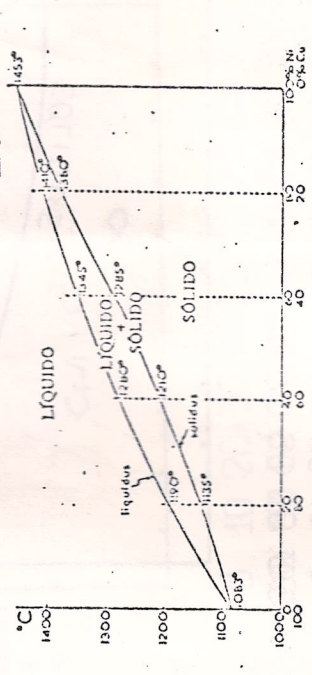


Diagrama de equilíbrio do sistema Cu/Ni. O diagrama foi construído a partir dos pontos característicos das curvas de resfriamento.

FIGURA 36

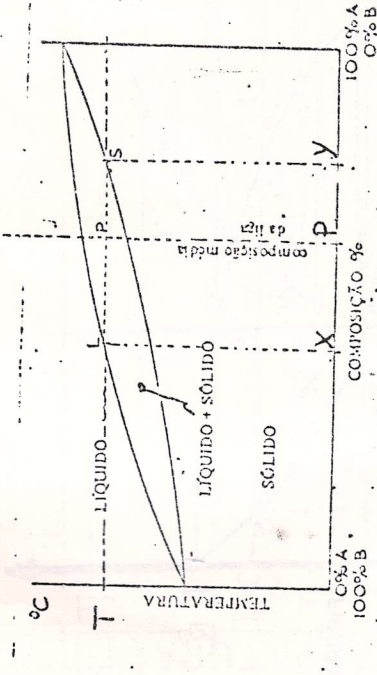


FIGURA 37

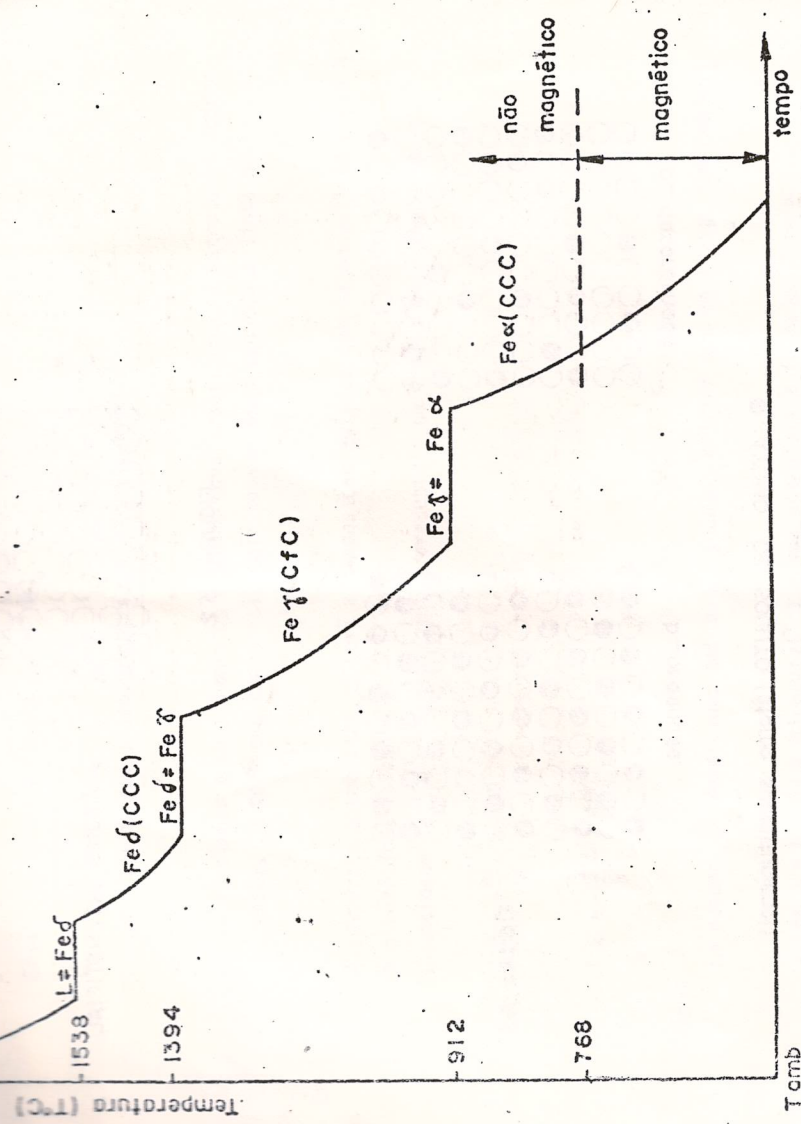


FIGURA 35

Temp. - Temperatura ambiente.
 → (Indica resfriamento)
 ← (Indica aquecimento)
 L - Líquido
 Fe δ - Ferro delta (ccc): só é estável até 1394°C.
 Fe γ - Ferro gama (fcc): só é estável até 912°C.
 Fe α - Ferro alfa (ccc): forma com que o ferro se apresenta à temperatura ambiente, em condições normais de pressão.
 768°C: Fe α não magnético ⇌ Fe α magnético

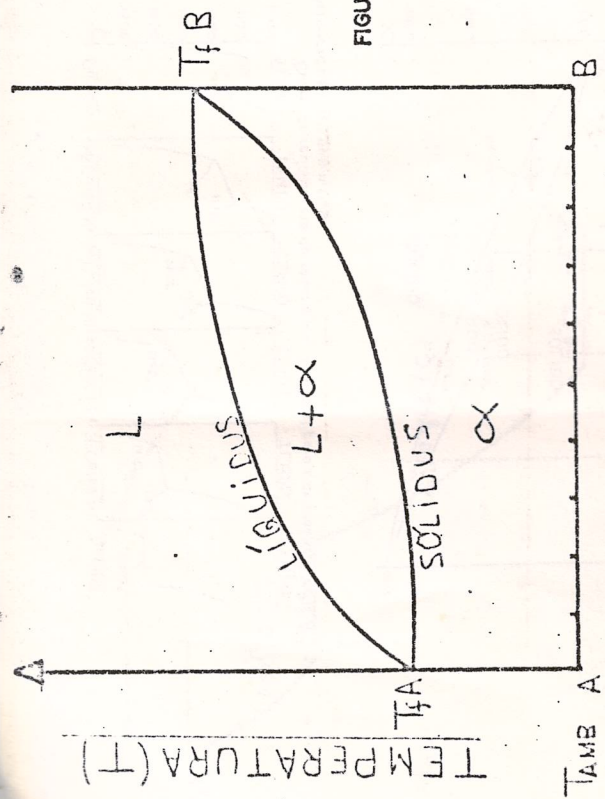


FIGURA 38-a

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

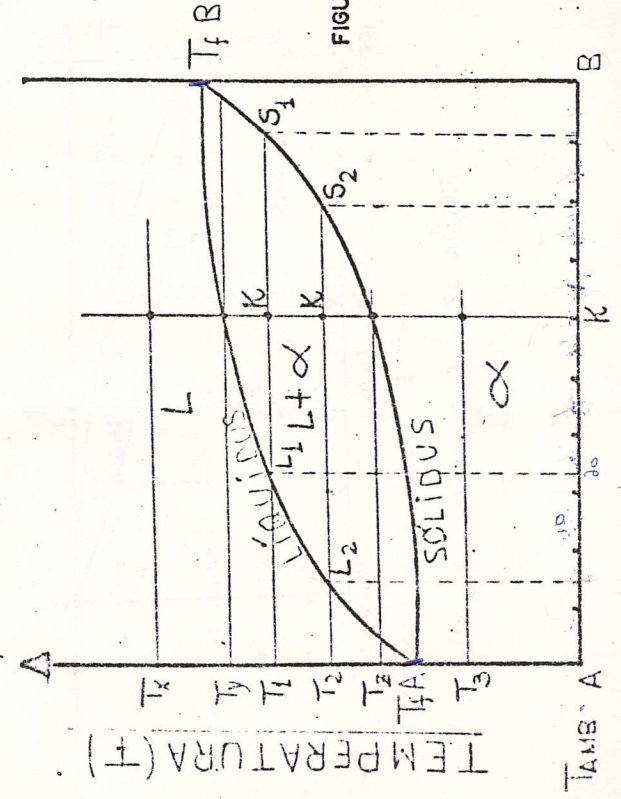


FIGURA 38-b

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

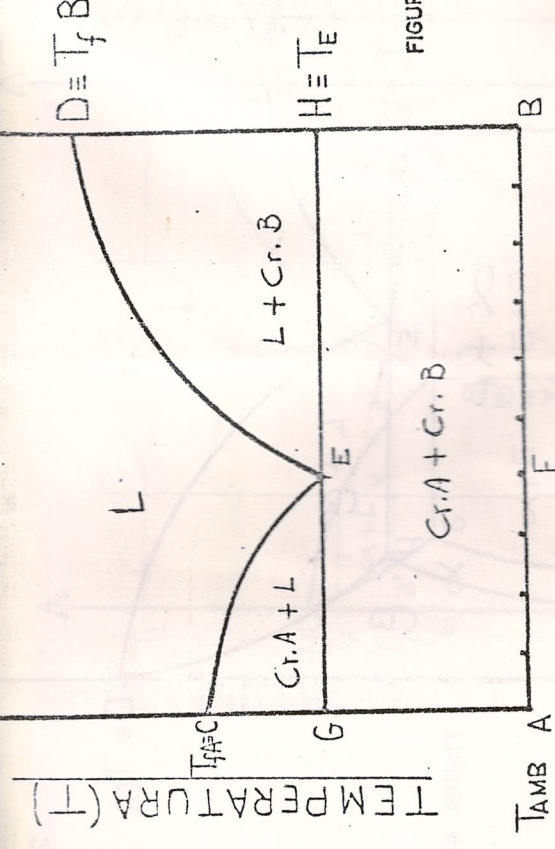


FIGURA 39-a

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

$$\% Cr.A = \frac{yE}{OE} \times 100 \quad \% E = \frac{yB}{OE}$$

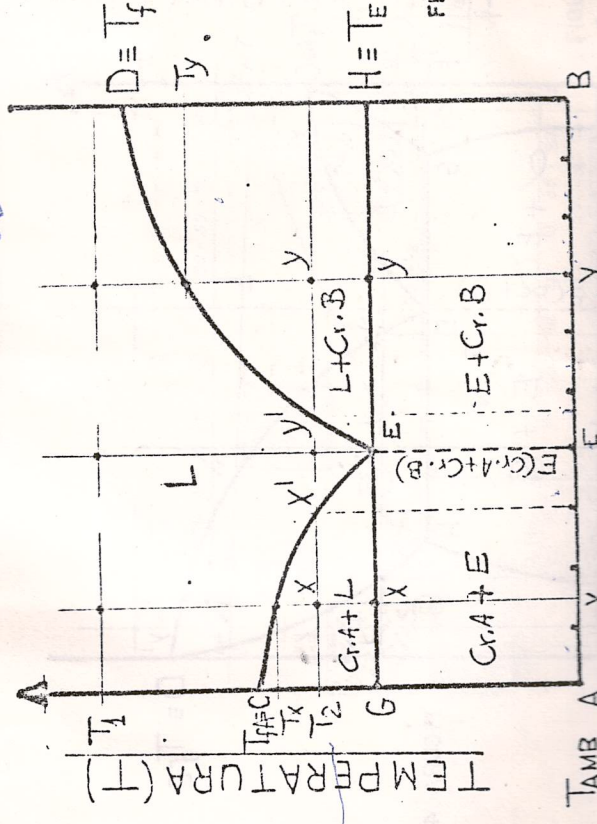


FIGURA 39-b

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

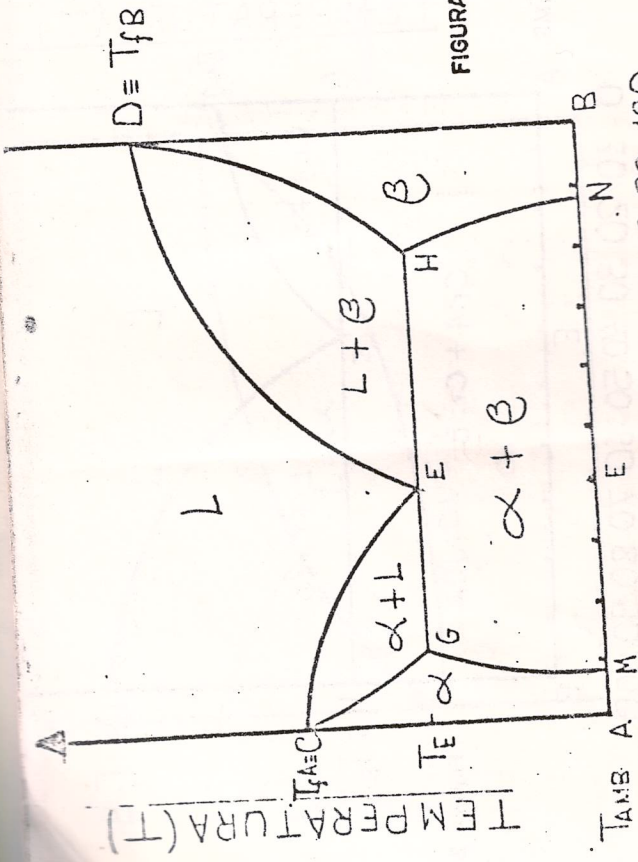


FIGURA 40-g

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

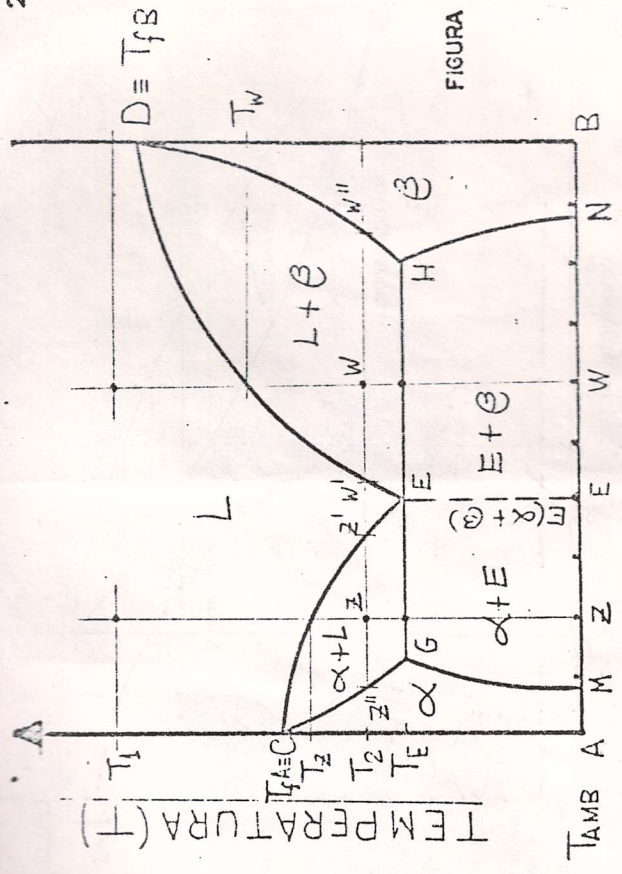
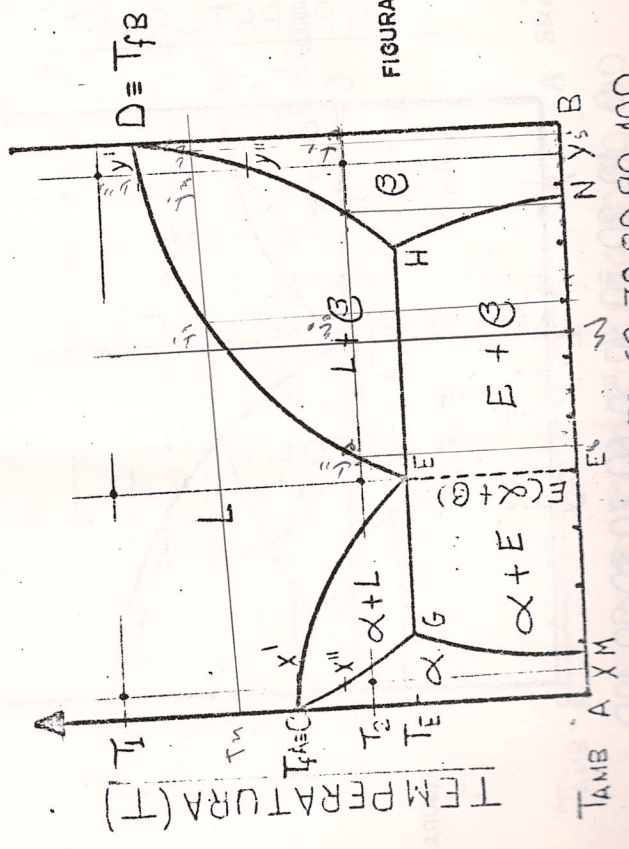


FIGURA 40-c

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

COMPOSIÇÃO (% PESO)

FIGURA 40-b



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

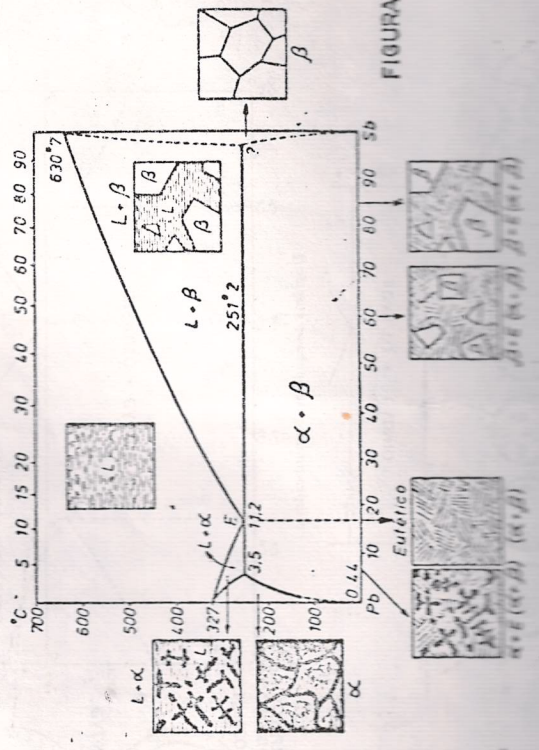


FIGURA 43

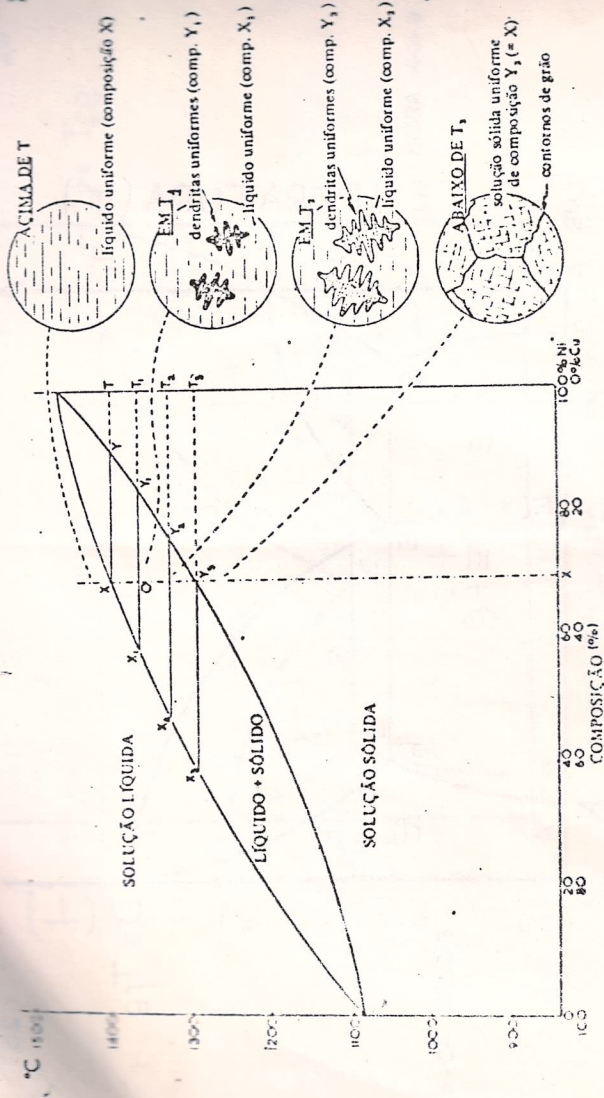
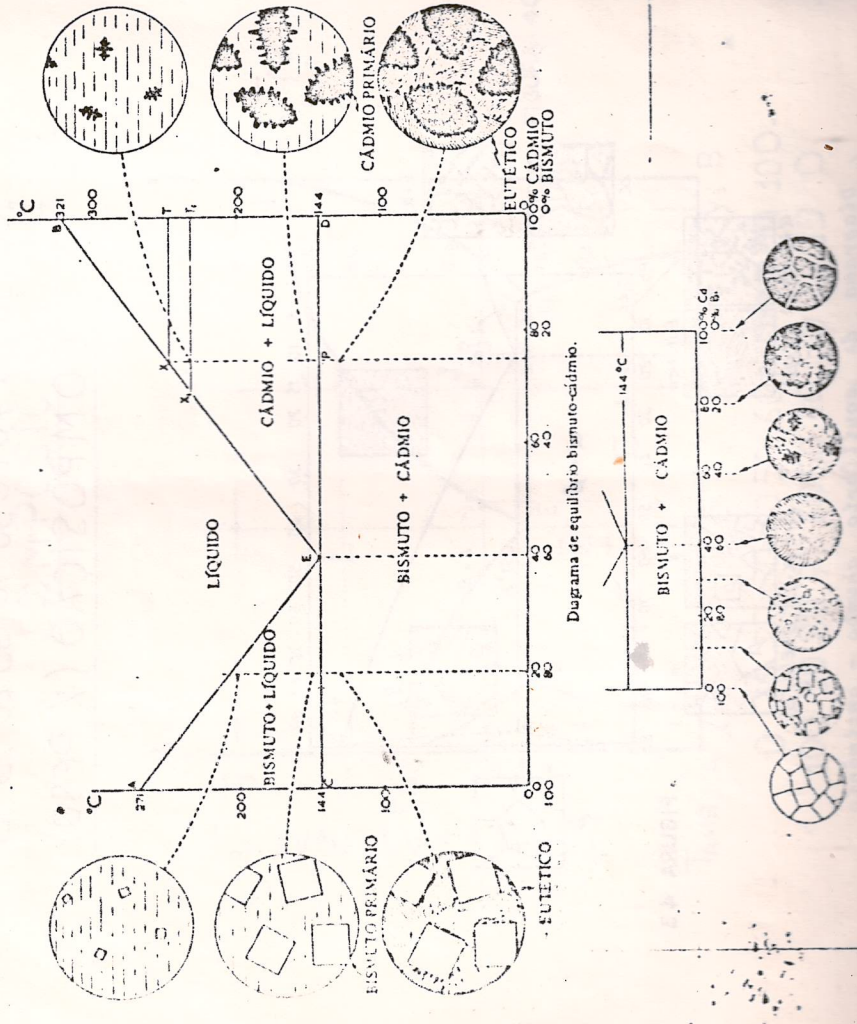


FIGURA 41 - Diagrama de equilíbrio cobre-níquel.



BIBLIOGRAFIA

- SEABRA, Antera Valeriana de - Metallurgia Geral - Ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa, Portugal)
- HIGGINS, R. A. - Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia - Ed. Difel
- COUTINHO, Telmo de Azevedo - Metallografia de Não Ferrosos - Ed. Edgard Blücher Ltda