



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS METÁLICAS (PQ07)



### SUA PROVA

- Além deste caderno contendo **5 (cinco)** questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



### TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



### NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



### INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**



## QUESTÃO 1

A capacidade térmica de um corpo – sólido, líquido ou gasoso – é uma grandeza física que relaciona o aumento de temperatura do corpo com a quantidade de calor transferido a este corpo, em condições conhecidas de outras variáveis. Permite o cômputo de grandezas termodinâmicas variadas em um sistema. A capacidade térmica à pressão constante é definida pela variação de entalpia com temperatura, a pressão constante,  $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ , ao passo que a capacidade térmica a volume constante é definida pela variação da energia interna com a temperatura, a volume constante,  $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$ . Capacidades térmicas são grandezas extensivas. A capacidade térmica por mol ou unidade de massa – referida por calor específico – é uma propriedade intensiva, característica para cada material.

- A) Partindo das definições de  $C_p$  e  $C_v$  e relações entre variáveis termodinâmicas, **demonstrar** que a diferença  $(C_p - C_v)$  por unidade de massa pode ser expressa pela relação  $\frac{\alpha^2 T}{\rho \beta}$ , em que  $T$  é a temperatura na escala kelvin,  $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$  é o coeficiente de expansão térmica a pressão constante,  $\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$  é o coeficiente de compressibilidade isotérmica e  $\rho$  é a densidade da substância.
- B) Considerando a aplicação do modelo acima a um gás ideal, **demonstrar** que  $(C_p - C_v) / n = R$ , em que  $R$  é a constante universal dos gases e  $n$  é o número de mols.
- C) Processos termodinâmicos idealizados que sejam reversíveis e adiabáticos são denominados de processos isentrópicos. **Demonstrar** que processos isentrópicos envolvendo gases ideais ocorrem com  $V^{(\gamma-1)}T = \text{constante}$ , em que  $V$  é o volume,  $T$  a temperatura e  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ . Considerar  $\gamma$  constante, independente de volume e temperatura.

Para apoiar as demonstrações requeridas, são disponibilizadas ao respondente as Relações de Maxwell.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

## QUESTÃO 2

Energia livre de Gibbs de um metal puro. Considere um metal sólido no ponto de fusão em equilíbrio com o metal fundido correspondente. Se a pressão  $p$  for aumentada em uma quantidade  $\Delta p$ , para  $p = p_0 + \Delta p$ , um novo equilíbrio será atingido e a temperatura será alterada na quantidade  $\Delta T$ . A mudança de temperatura ou a mudança do ponto de fusão em função da mudança de pressão pode ser encontrada a partir da energia de Gibbs do sistema líquido-sólido. Solidificação significa que uma fase líquida  $\alpha$  é transformada em uma fase sólida  $\beta$  na temperatura do ponto de fusão.

- A) A partir da relação entre a derivada da temperatura com a pressão e a razão entre variação de volume molar e entropia molar numa transição líquido-sólido, e da expressão para a variação de entropia em função da variação de entalpia e temperatura para o sistema líquido-sólido, encontre expressão para a variação da temperatura de fusão com a pressão e a partir desta última equação **mostre que a relação entre as mudanças na temperatura e pressão em um metal puro bifásico, em equilíbrio, é expressa por**

$$\Delta T_F = T_F(p) - T_F(p_0) = \frac{T_F(V_m^L - V_m^S)}{H_m^{fusão}} \Delta p$$

em que:  $\Delta T_F$  = mudança do ponto de fusão,  $p_0$  = pressão normal (usualmente 1 atm),  $p = p_0 + \Delta p$ ,  $T_F(p)$  = temperatura do ponto de fusão na pressão  $p$ ,  $V_m^L - V_m^S$  = diferença nos volumes molares de sólidos e líquidos à temperatura  $T_F$ ,  $H_m^{fusão}$  = calor molar de fusão, expresso por  $-(H_S - H_L)$ .

- B) Estime a mudança no ponto de fusão de um metal puro, causada por uma mudança de pressão de 5 kbar. Compute a variação de volume molar a partir dos seguintes dados: o volume molar do metal é  $8.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  para a fase líquida e  $8,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  para a fase sólida. O calor latente de fusão do metal é  $13,00 \text{ kJ mol}^{-1}$ . O ponto de fusão é  $1027 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- C) Escreva a energia livre de Gibbs ( $G_m$ ) molar (1 kmol) de um metal puro, como função da entalpia molar ( $H_m$ ), entropia molar ( $S_m$ ) e temperatura  $T$ . Pergunta-se:
- C<sub>1</sub> o comportamento das entalpias e entropias molares com temperatura diferem entre sólidos e líquidos?
- C<sub>2</sub> Qual apresenta maior variação com a temperatura, a entropia molar ou a entalpia molar?
- C<sub>3</sub> Represente qualitativamente em uma figura a energia livre de Gibbs molar de um metal líquido puro ( $G_m^L$ ) e do metal sólido correspondente ( $G_m^S$ ) em função da temperatura, com a pressão constante. Indique, esquematicamente, nesta figura, o ponto de fusão ( $T_F$ ), os comportamentos qualitativos (curvas) de  $G_m^L$  e  $G_m^S$ , a região líquida, a região sólida, e represente uma diferença da energia de Gibbs entre a fase líquida e sólida, na região de superresfriamento da fase líquida, ou seja, a “força de solidificação” a uma dada temperatura abaixo de  $T_F$ .
- D) As curvas de energias de Gibbs com a temperatura, a pressão constante, correspondentes a um metal sólido e seu fundido, podem ser utilizadas para estimar a “força de solidificação” a uma dada temperatura, em situação de superresfriamento da fase líquida. **Refaça a figura do item C<sub>3</sub>, considerando qualitativamente a mudança da temperatura de fusão devido a aumento do número de defeitos no sólido e indique como varia a “força de solidificação” na região de superresfriamento da fase líquida.**
- E) Para o item D), o ponto de fusão aumenta ou diminui?
- F) O ponto de fusão aumenta ou diminui quando o fundido é agitado? Justifique sua resposta.
- G) O ponto de fusão de equilíbrio do Ni puro é  $1726 \text{ K}$  à pressão padrão de  $1 \text{ atm}$ . Calcule a força molar de solidificação do níquel no superresfriamento máximo de  $319 \text{ K}$ . Pode-se considerar o calor de fusão do Ni como  $17,2 \text{ kJ/kmol}$ . Para a solução desta questão, considerar as funções de Gibbs para as fases líquida e sólida como lineares na região de interesse.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---



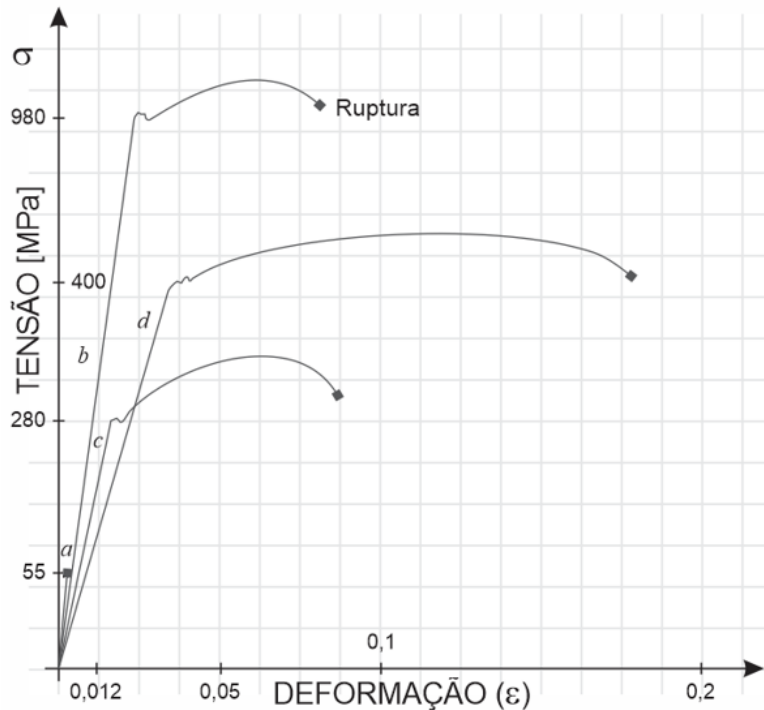
### QUESTÃO 3

A importância da resistência dos materiais cresce junto com a tecnologia e suas diversas vertentes. No caso da indústria aeroespacial, esta importância é o próprio fundamento dos estudos no desenvolvimento de equipamentos, componentes e máquinas completas. Por exemplo, no caso de aeronaves, espaçonaves e outros veículos espaciais, o risco de falhas de componentes e peças necessita ser minimizado, pois em geral não há muito o que se fazer em caso de acidentes.

Com o passar dos anos, junto com a experiência adquirida, estudos e conhecimento acumulado, foi-se desenvolvendo novas ligas e materiais adequados a cada situação. E, também, conhecendo-se mais as propriedades dos materiais, aumenta-se a capacidade de escolher o melhor material para dada aplicação.

Neste contexto, apresentam-se abaixo, tabela e gráfico, com as curvas características Tensão x Deformação ( $\sigma \times \epsilon$ ) para 4 (quatro) materiais diferentes.

Material (Ver curva característica $\sigma \times \epsilon$ no gráfico)		Tensão de escoamento, limite elástico ( $\sigma$ )[MPa]
a	Vidro silicato	55
b	Aço 17-7 PH	980
c	Aço ABNT 1020	280
d	Liga Al 2024	400



Considerando os materiais da tabela acima e o correspondente gráfico Tensão ( $\sigma$ )[MPa] x Deformação ( $\epsilon$ ):

- A) Qual é a ordem crescente de ductilidade dos materiais? Justifique.
- B) Podemos usar a liga Al 2024, curva (d), numa peça de satélite, em que os esforços atingem tensões de 700MPa, desde que seja usada uma peça com o dobro do comprimento projetado para o aço 17-7 PH (980MPa), mantidas as outras dimensões. Justifique.
- C) Sob uma tensão de 300 MPa, compare a deformação ( $\epsilon$ ) do Aço 17-7PH, curva (b), com a deformação da liga Al2024, curva (d). Explique.
- D) Sendo necessário um parafuso de 4mm de diâmetro, em que a tração atinge não mais que 1,00kN, foi recomendado o aço ABNT 1020. Justifique. (Considere  $\pi=3,14$ )
- E) Considere o projeto de um elemento de máquina no formato de um cubo, que em equilíbrio apresenta o seguinte estado de tensões:  
 Tensões normais:  $\sigma_x = 200 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_y = -184 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_z = 0$   
 Tensões de cisalhamento:  $\tau_{xy} = 256 \text{ MPa}$ ,  $\tau_{zx} = 0$ ,  $\tau_{yz} = 0$

Considerando-se operação somente na região elástica, pode-se afirmar que tanto o aço ABNT 1020 quanto a liga Al 2024 podem ser recomendados para a fabricação deste elemento. Justifique.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 4

---

Nas últimas décadas, a Engenharia dos Materiais vem ganhando grande importância, haja vista a crescente necessidade de desenvolvimento de ligas que atendam às mais diversas características mecânicas exigidas pelas condições operacionais das estruturas e dos componentes mecânicos projetados atualmente. Maior resistência mecânica, menor densidade, menor desgaste sob condições ambientais severas, elevada usinabilidade, baixa variabilidade das propriedades sob gradiente de temperatura, são algumas das propriedades mecânicas e físicas exigidas para o desenho de novas ligas.

**Neste contexto, na tentativa de executar projetos otimizados e seguros, é de fundamental importância conhecer as diversas ligas e propriedades associadas.**

- A) Uma das principais diferenças entre ligas ferrosas e não ferrosas é a *suscetibilidade à corrosão*. Defina esse processo e indique suas influências nas propriedades mecânicas.**
- B) Com relação às ligas ferrosas, cite as diferenças entre os aços de baixo, médio e alto carbono, no que se refere ao percentual de carbono, nível de ductilidade e resistência mecânica.**
- C) O que caracteriza as ligas de alta entropia e o que se pode dizer sobre a variação de suas propriedades mecânicas em altas temperaturas?**
- D) Na presença do hidrogênio, o metal sofre um processo de fragilização perdendo ductilidade, resistência mecânica e tenacidade. Explique a relação entre a concentração de hidrogênio no metal e a perda de ductilidade.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

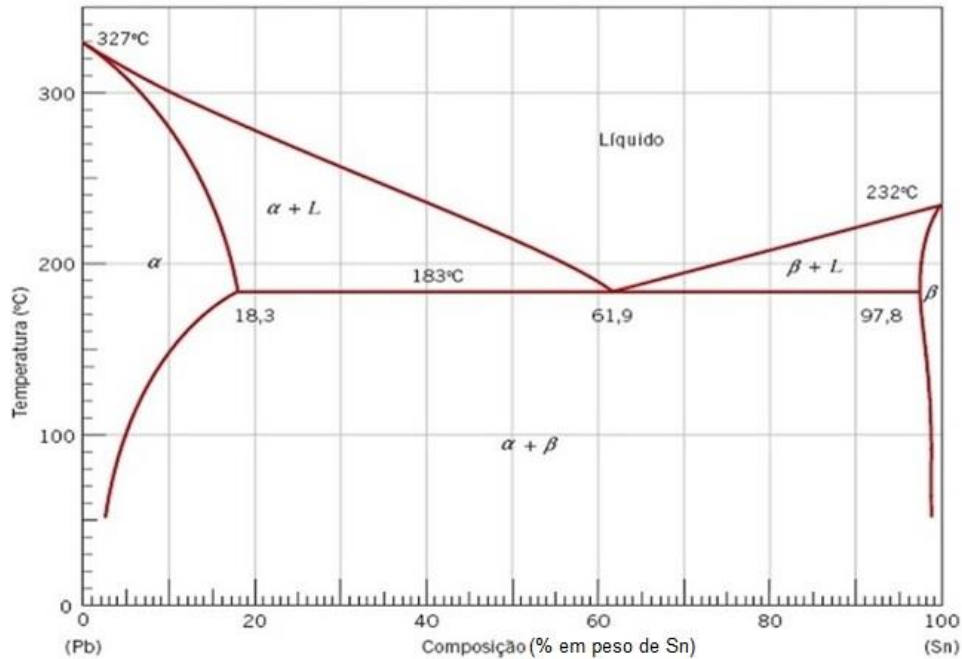
60

---

### QUESTÃO 5

O entendimento de diagramas de fases para sistemas de ligas metálicas é de fundamental importância para o pesquisador. Existe forte correlação entre microestrutura e propriedades físicas. O desenvolvimento da microestrutura de uma liga metálica está relacionado às características de seu diagrama de fases.

A partir do diagrama de equilíbrio binário de fases Chumbo (Pb)-Estanho (Sn) abaixo, considerando a pressão (P) de 1atm, responda as questões a seguir:



- A) As soluções sólidas são formadas por solutos e solventes sólidos. No cotidiano, os principais exemplos desse tipo de solução são as ligas metálicas.
  - A<sub>1</sub> Explicar conceitualmente o que é uma solução sólida em ligas metálicas.
  - A<sub>2</sub> Citar e descrever (explicar) os tipos de soluções sólidas existentes nas ligas metálicas
  - A<sub>3</sub> Descrever (explicar) a relação existente entre os tipos de soluções sólidas e as propriedades mecânicas das ligas metálicas.
  - A<sub>4</sub> Qual a máxima solubilidade sólida de estanho (Sn) no chumbo (Pb) e do chumbo (Pb) no estanho (Sn) no diagrama de equilíbrio binário de fases Pb-Sn?
  
- B) Os diagramas de equilíbrio de fases binários eutéticos apresentam zonas de crescimento acoplado ou cooperativo, que dependem da composição, do gradiente térmico ( $G_L$ ) e da velocidade de crescimento ( $V$ ) da interface sólido/líquido.
  - B<sub>1</sub> Explicar conceitualmente o que é uma zona de crescimento acoplado ou cooperativo nos diagramas de equilíbrio de fases binários eutéticos.
  - B<sub>2</sub> Citar e explicar quais os tipos de zonas de crescimento acoplado ou cooperativo existentes nos diagramas de equilíbrio de fases binários eutéticos.
  - B<sub>3</sub> Os elementos chumbo (Pb) e estanho (Sn), durante a solidificação, apresentam crescimento da interface sólido/líquido difuso ou não-facetado. A partir dessa informação, explicar que tipo de zona de crescimento acoplado ou cooperativo apresenta o diagrama de equilíbrio binário eutético de fases Pb-Sn.
  
- C) Considerando o resfriamento lento de modo a seguir o diagrama de equilíbrio Pb-Sn, determine a composição e a quantidade relativa (proporção) das fases e dos microconstituintes (se houver) presentes em equilíbrio, das ligas com 30% e 80% em peso de Sn, nas temperaturas de 200°C e 100°C.
  
- D) Uma liga Pb-Sn resfriada lentamente até a temperatura de 80°C, de modo a seguir o diagrama de equilíbrio binário de fases Pb-Sn, apresentou uma quantidade relativa (proporção) de 20% em peso da fase  $\alpha$  pró-eutética.
  - D<sub>1</sub> Qual a composição dessa liga?
  - D<sub>2</sub> Sabendo agora a composição dessa liga, calcule a quantidade relativa (proporção) da fase  $\alpha$  presente no microconstituente eutético dessa liga?
  
- E) A estrutura cristalina na fase sólida do chumbo é cúbica de face centrada e a do estanho é tetragonal.
 

A partir dessa informação e considerando a pressão (P) de 1atm, esboce qualitativamente o comportamento das curvas de Energia Livre (G) versus Composição (% em peso de Sn) nas temperaturas do diagrama de equilíbrio de fases Pb-Sn: 300°C, 200°C, 183°C e 100°C.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35



36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----





Realização

