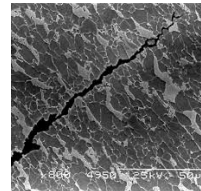
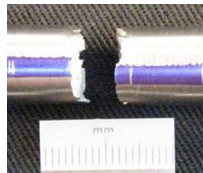


2. MODOS DE FALHA

Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

PGMEC



1

PRINCIPAIS CAUSAS DAS FALHAS MECÂNICAS

- uso inadequado;
- erros de montagem;
- defeitos de fabricação;
- manutenção inadequada;
- falha de projeto;
- materiais inadequados;
- tratamentos térmicos inadequados;
- condições operacionais imprevistas;
- garantia de qualidade inadequada;
- descontinuidades de fundição.

2

TIPOS DE FALHA

INDEPENDENTES DO TEMPO

Escoamento	Início de escoamento Colapso plástico
Ruptura	Dúctil Frágil
Fragilização por hidrogênio	
Flambagem	

3

TIPOS DE FALHA

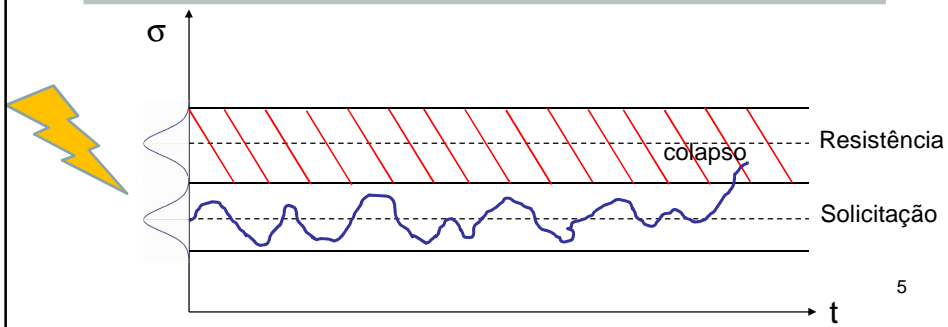
DEPENDENTES DO TEMPO

Fluência
Desgaste
Corrosão
Corrosão sob tensão
Fadiga

4

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Os modos de falha tratados como independentes do tempo são os que possuem igual probabilidade de ocorrer, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do equipamento considerado.



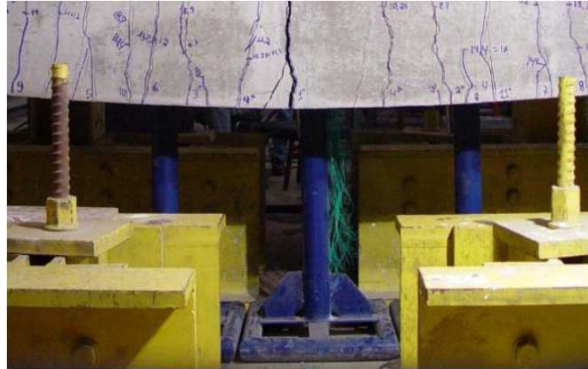
FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Falha por início de escoamento

$$\sigma_{eq\ max} = \sigma_{esc} \Rightarrow \textit{para ponto critico}$$

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

- ❑ Plastificação generalizada



7

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

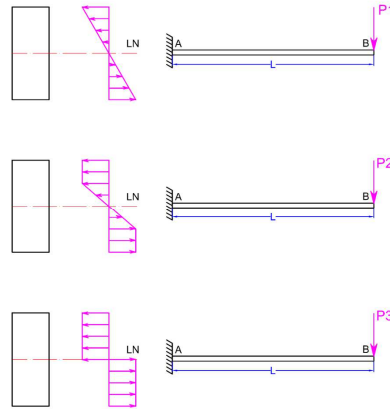
- ❑ Plastificação generalizada

$$\sigma_{eq\ max} = \sigma_{esc} \Rightarrow \forall\ ponto$$

8

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

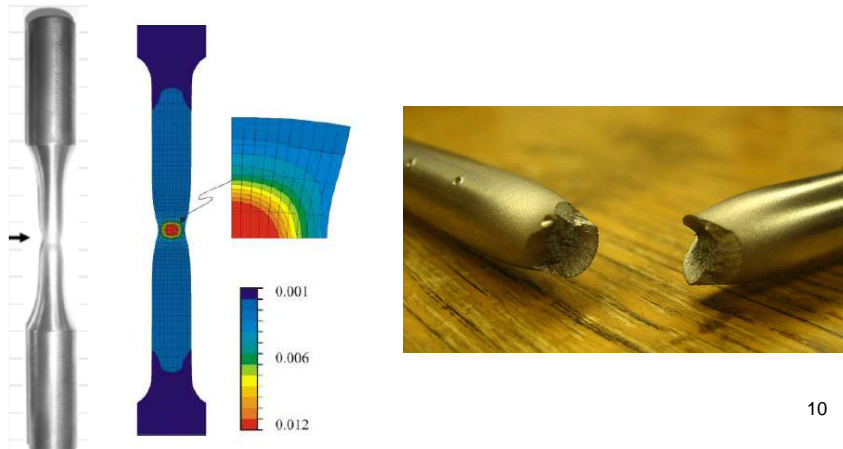
Plastificação generalizada



9

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fratura dúctil - caracterizada por uma apreciável deformação plástica antes da ruptura.



10

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

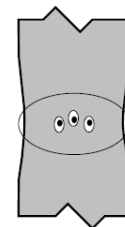
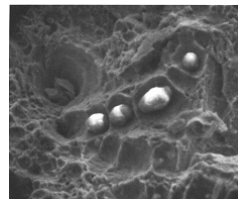
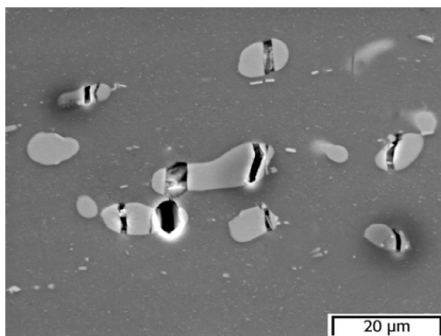
Fratura dúctil

Numa ruptura dúctil sob tração, a deformação plástica produz uma redução na secção transversal, provocando um estado triaxial de tração no interior do material. A triaxilidade de tensões diminui a capacidade de deformação plástica e a ruptura pode processar-se por um mecanismo de nucleação de vazios no centro do material.

11

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fratura dúctil



CRESCIMENTO DE VAZIOS

$$\epsilon > \epsilon_f^*$$

12

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

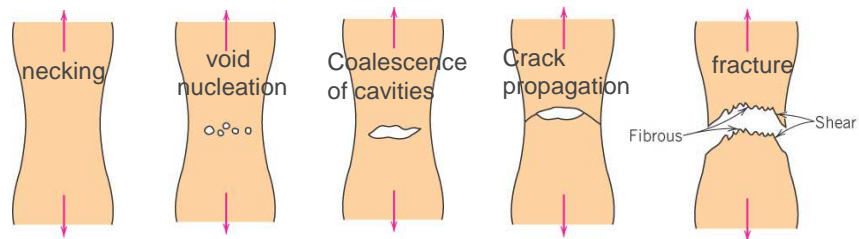
❑ Fratura dúctil

Esta nucleação passa para uma etapa de crescimento desses vazios, com a continuidade da deformação plástica até o instante em que os vazios começam a se unir levando à ruptura da região central. Posteriormente, tal fenômeno se estende tendo sequência por cisalhamento.

13

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

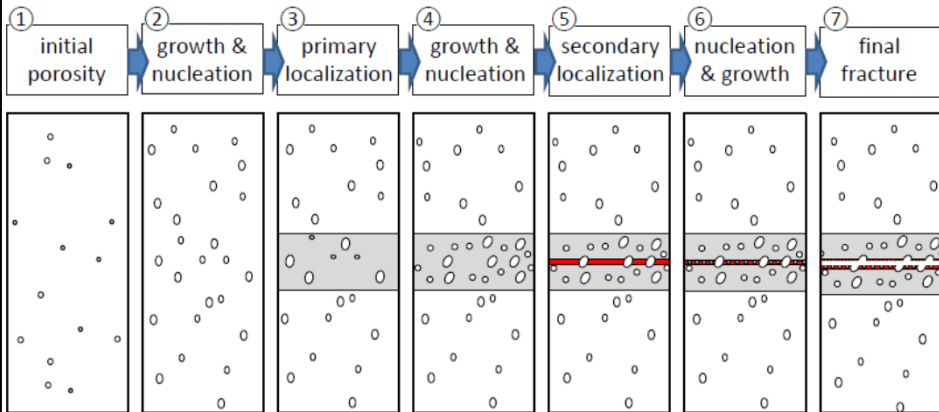
❑ Fratura dúctil



14

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

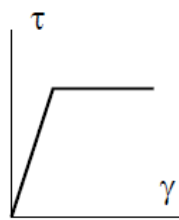
Fratura dúctil



15

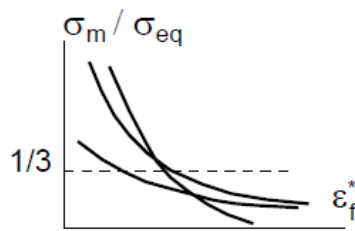
FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fratura dúctil



p/ cisalhamento:

$$\tau \geq \tau_{esc}$$

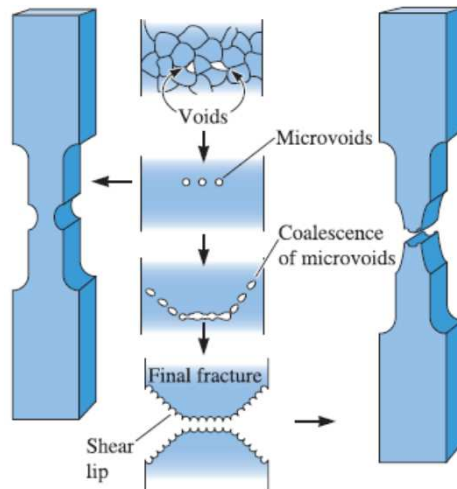


p/ nucleação:

$$\epsilon \geq \epsilon_f^* = f \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^{16}$$

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fratura dúctil

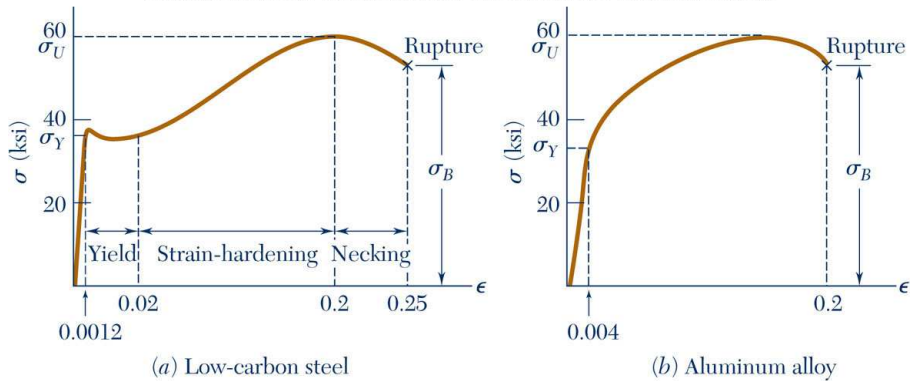


17

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fratura dúctil

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



18

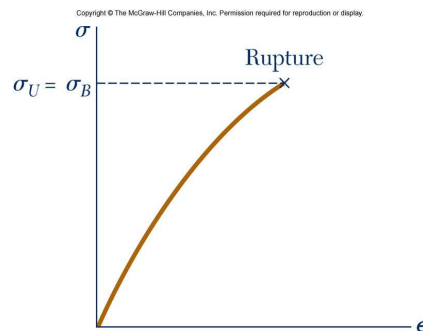
FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

 Fratura frágil

Em termos gerais, um material é frágil quando não se pode realizar deformações apreciáveis sem provocar a sua ruptura. Tal definição, entretanto, não é completamente precisa e absoluta, dado que se torna necessário definir as condições nas quais o material é deformado, ou seja, a que temperatura e velocidade de deformação.

19

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

 Fratura frágil

20

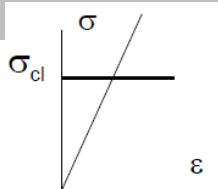
FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

 Fratura frágil

Uma ruptura frágil, metalurgicamente, é caracterizada pela separação do material segundo um plano perpendicular à tensão de tração, sendo este um plano atômico da rede cristalina. Tal mecanismo de ruptura é chamado de ruptura por clivagem.



$$\sigma_{\max} \geq \sigma_{cl}$$



21

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

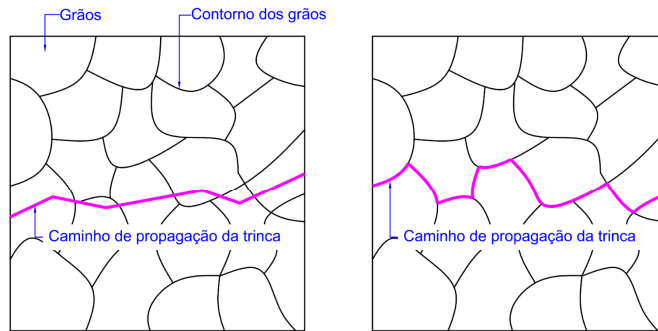
 Fratura frágil

Clivagem - em materiais cristalinos mais frágeis, a propagação de trincas resulta da quebra de ligações atômicas ao longo dos planos específicos. Tal condição leva a uma fratura transgranular na qual a propagação se divide através dos grãos.

22

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

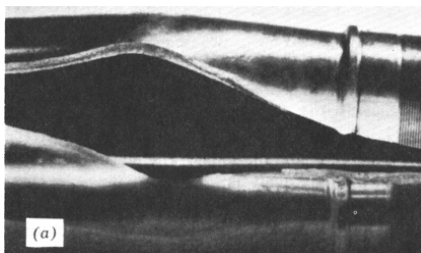
☐ Fratura frágil



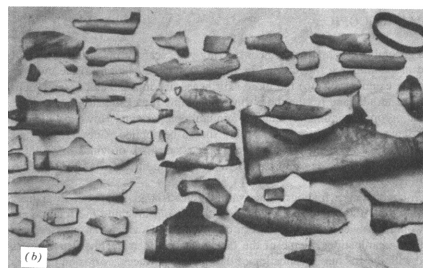
23

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Dúctil x Frágil



um único pedaço
grandes deformações



muitos pedaços
pequenas deformações

24

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fragilização por hidrogênio

A falha tem início quando átomos de hidrogênio são liberados, como nos processos de galvanização ou solda, ou em decorrência do próprio ambiente de trabalho, difundindo-se pela estrutura cristalina do material.

25

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

Fragilização por hidrogênio

O acúmulo dessas moléculas faz com que a pressão gerada no material atinja valores extremamente elevados com a formação de um estado de tensões de tração, podendo vir a levar o material a sofrer uma ruptura espontânea, mesmo com o componente descarregado.

26

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

 Flambagem

Essa falha ocorre quando os deslocamentos transversais passam a crescer de uma forma significativa, mesmo com carga constante. Tipo de falha característica de estruturas esbeltas nas quais ocorrem tensões de compressão.



$$\sigma_{CR} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \sigma_{esc}$$

....



FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

 Flambagem

A instabilidade que leva à falha por flambagem pode ocorrer de modo global (colunas), como de forma local, quando a instabilidade fica restrita a uma deformação localizada numa secção pontual das paredes da peça.

FALHAS INDEPENDENTES DO TEMPO

❑ Flambagem

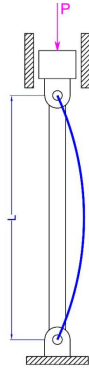


Figura 8 - Perfis já ensaiados mostrando a falha por flambagem local.

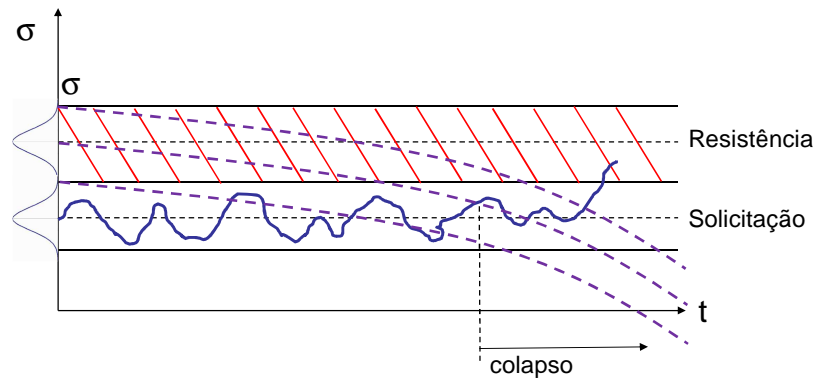
29

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Os modos de falha tratados como dependentes do tempo são caracterizados por algum tipo de envelhecimento ou desgaste do material, o qual passa a apresentar uma perda gradativa das suas propriedades.

30

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO



31

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Fluência

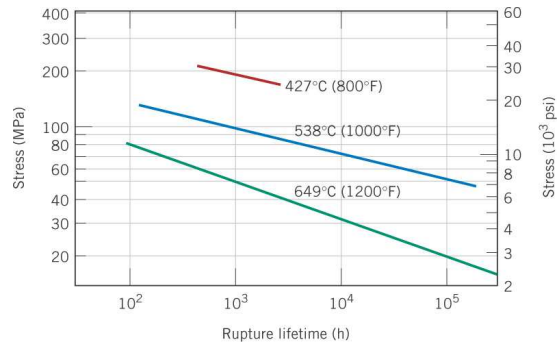
Mecanismo de falha presente para componentes que operam por longos períodos sob condições de temperaturas elevadas, ocasionando uma deformação irreversível no material que cresce de forma constante com o tempo, mesmo em situações que o carregamento atuante seja mantido constante.

....

32

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Fluência



33

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Fluência – bancada experimental



34

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Desgaste

O desgaste do material ocorre pela remoção de partículas do mesmo mediante dois processos distintos: desgaste adesivo e desgaste abrasivo.

35

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Desgaste

a) desgaste adesivo - corresponde a um processo de aderência e remoção de partículas de um dos elementos do par de atrito, normalmente por condições inadequadas de lubrificação;



36

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Desgaste

b) desgaste abrasivo - ocorre pelo arrancamento de pedaços de metal por partículas mais duras que colidem com este, tendo assim a dureza do material como principal variável.



37

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

Corrosão

Destruição de um corpo sólido por uma ação química ou eletroquímica não intencional, que invariavelmente se inicia na superfície do corpo.

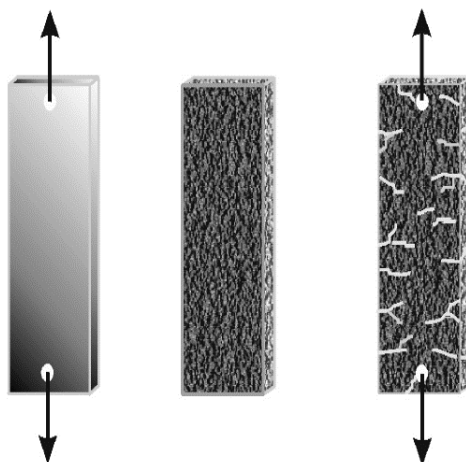


38

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO Corrosão sob tensão

Superposição de esforço mecânico com um meio ambiente agressivo. Esse tipo de corrosão difere da corrosão tradicional por envolver pontos muito localizados da peça (contornos de grão) e pela composição química do meio ambiente que irá ativar o processo.

39

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO Corrosão sob tensão

40

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO **Fadiga**

Processo de redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal de uma trinca a cada ciclo de carregamento.

41

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO **Fadiga**

A fadiga ocorre pela presença de tensões que variam com o tempo provocando deformações plásticas cíclicas localizados em pontos críticos. Essas deformações levam a uma deteriorização contínua do material que dá origem a uma trinca de fadiga, a qual passa a crescer com o tempo até atingir um tamanho suficiente para provocar a ruptura final.

42

FALHAS DEPENDENTES DO TEMPO

 Fadiga

43

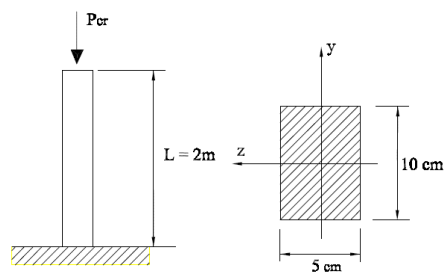
EXEMPLO 01

Calcular o tempo para que determinada liga ($C = 22$, $Q = 460$ kJ/mol) venha a romper por fluência numa temperatura de 650°C e 100 MPa. Anteriormente essa mesma liga rompeu após 20h quando testada no mesmo nível de tensão, mas numa temperatura de 750°C . Supor *Larson-Miller* e *Sherby-Dorn*.

44

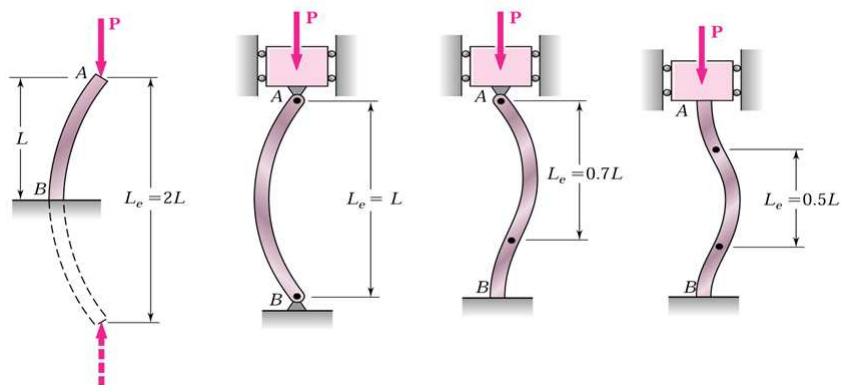
EXEMPLO 02

Para o arranjo ilustrado, determinar o comprimento da coluna para que não ocorra falha por flambagem, mas sim por escoamento do material ($E = 200 \text{ GPa}$ e $\sigma_{\text{esc}} = 2500 \text{ N/cm}^2$).



45

EXEMPLO 02 - continuação



extremidade livre e outra engastada

biarticulada

extremidade engastada e outra articulada

biengastada

46

EXEMPLO 03

Um ensaio de tração utiliza um corpo de prova de aço com secção circular e diâmetro inicial de 9,14 mm. Para as cargas de 2224 kgf e 2905 kgf, os diâmetros medidos foram de 8,69 mm e 8,33 mm, respectivamente. Determinar a tensão e a deformação real para as duas situações de carregamento, assim como os coeficientes “K” e “n”.

47

EXEMPLO 04

Os dados seguintes foram recolhidos a partir de um corpo de prova de magnésio de 12 mm de diâmetro ($L_0 = 30$ mm):

Carga (N)	Comprimento (mm)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
0	30	0	0,0
5000	30,0296	44,2	0,000987
10000	30,0592	88,4	0,001973
15000	30,0888	132,6	0,00296
20000	30,15	176,8	0,005
25000	30,51	221,0	0,017
26500	30,90	234,3	0,030
27000	31,50	238,7	0,050

48

EXEMPLO 04 - continuação

Após a fratura, o comprimento do corpo de prova é de 32,61 mm e o diâmetro é de 11,74 mm. Determinar:

- a) a tensão de engenharia na fratura
- b) a tensão verdadeira na fratura (considerar a equação de *Hollomon* para solução)
- c) a deformação específica verdadeira na fratura

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

- **Anderson, T.L.**, Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, 3a Ed., Taylor & Francis, USA (2005).
- **Beer, F.P.**, Johnston, E.R., Mazurek, D.F., *Mechanics of Materials 7ª Ed.*, McGrawHill (2010).
- **Rosa, E.**, *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânica, Santa Catarina (2002).