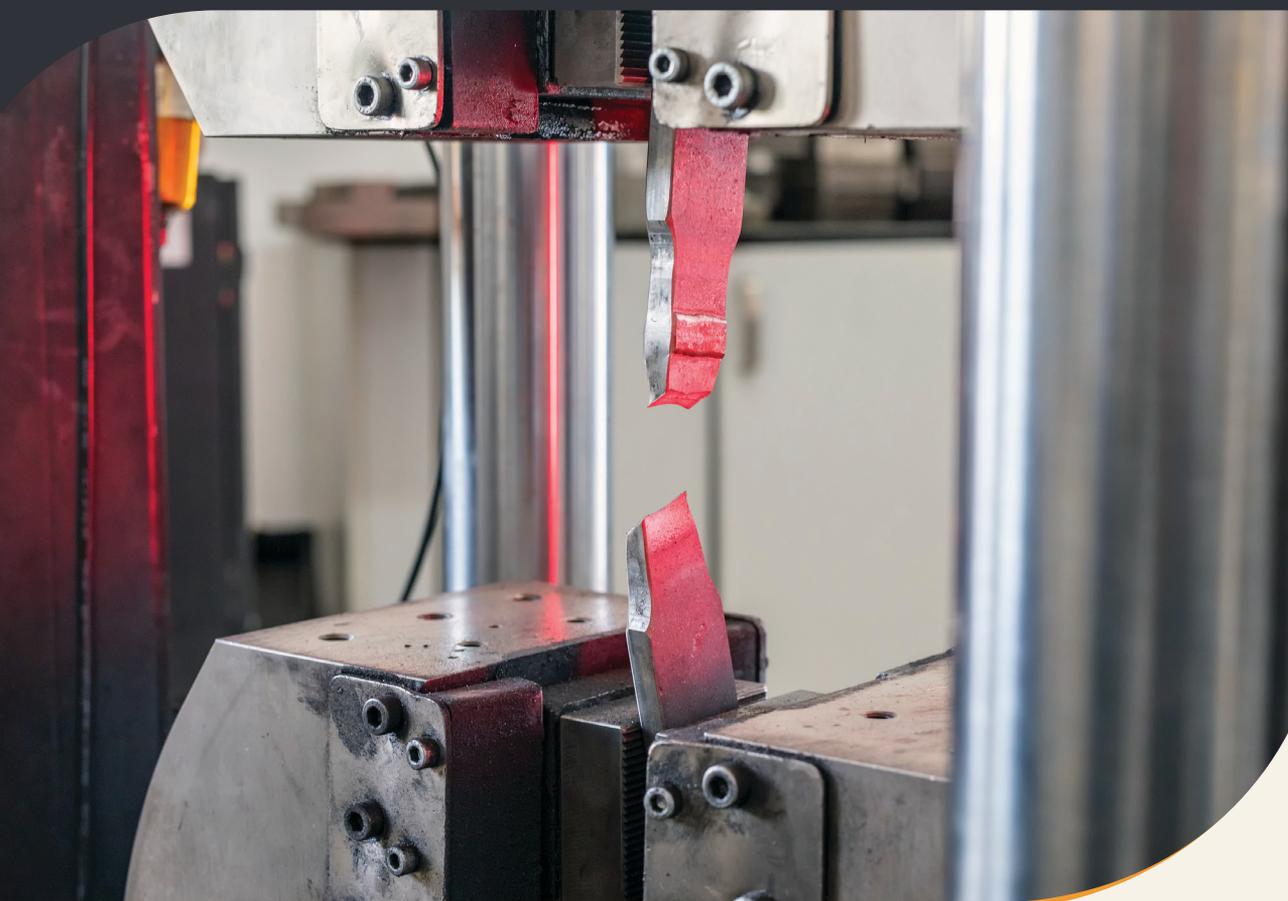


JULIO CEZAR DE ALMEIDA

PROJETO MECÂNICO

Enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura



Blucher

2ª edição revista e ampliada

Julio César de Almeida

PROJETO MECÂNICO

Enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura

2ª edição revista e ampliada

Projeto Mecânico: enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura

© 2024 Julio Cezar de Almeida

1ª edição (2018) – GEN LTC

2ª edição revista e ampliada (2024) – Blucher

Editora Edgard Blucher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editores Eduardo Blücher e Jonatas Eliakim

Coordenação editorial Andressa Lira

Produção editorial Lidiane Pedroso Gonçalves

Diagramação Villa d'Artes

Preparação Ana Lúcia dos Santos

Revisão Bianca Guedes

Capa Leandro Cunha

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blucher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Almeida, Julio Cezar de

Projeto mecânico : baseado na fadiga e na mecânica da fratura/ Julio Cezar de Almeida. – 2. ed. revista e ampliada - São Paulo : Blucher, 2023. 298 p.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2082-4

1. Engenharia mecânica 2. Resistência de materiais I. Título

22-6035

CDD 620.11

Índice para catálogo sistemático:

1. Engenharia mecânica

Conteúdo

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. A falha de um componente estrutural	11
1.2. Os carregamentos estáticos	12
1.3. A premissa da plastificação generalizada	12
1.4. Os carregamentos dinâmicos	13
1.5. O projeto tolerante ao dano	13
1.6. Conclusões	14
Referências	14
2. MODOS DE FALHA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS	15
2.1. Introdução	15
2.2. Deformação elástica excessiva	16
2.3. Deformação plástica e plastificação generalizada	16
2.4. Fratura	18
2.5. Propriedades dos materiais	18
2.6. Diagrama tensão x deformação real ou verdadeiro	25
2.7. O encruamento	28
2.8. Problemas resolvidos	30

2.9. Problemas propostos	34
Nomenclatura	40
Referências	41
3. CRITÉRIOS DE PROJETO PARA MATERIAIS DÚCTEIS	43
3.1. Introdução	43
3.2. Esforços combinados em um ponto	44
3.3. Critérios de falha por início de escoamento	48
3.4. Análise comparativa dos critérios de falha	55
3.5. Tensão tangencial correspondente à condição de escoamento	55
3.6. Concentração de tensões	57
3.7. Problemas resolvidos	59
3.8. Problemas propostos	67
Nomenclatura	71
Referências	72
4. CRITÉRIOS DE PROJETO PARA MATERIAIS FRÁGEIS	73
4.1. Introdução	73
4.2. Teoria da máxima tensão normal – TMTN	74
4.3. Teoria de Coulomb-Mohr	75
4.4. Problemas resolvidos	77
4.5. Problemas propostos	83
Nomenclatura	86
Referências	86
5. ELASTICIDADE E ANÁLISE PLÁSTICA	87
5.1. Introdução	87
5.2. Notação indicial	88
5.3. Tensores	89
5.4. Tensão e vetor tensão	91
5.5. Equações de equilíbrio interno	94
5.6. Tensões esféricas e desviatórias	96
5.7. Tensões e planos octaédricos	97

5.8. Tensor de deformações	98
5.9. Relações constitutivas	100
5.10. Análise plástica	101
5.11. Problemas resolvidos	109
5.12. Problemas propostos	115
Nomenclatura	120
Referências	121

6. FALHA POR FADIGA E RESISTÊNCIA À FADIGA DOS MATERIAIS **123**

6.1. Introdução	123
6.2. Tipos de fadiga	125
6.3. O mecanismo da falha por fadiga	126
6.4. Cargas cíclicas	128
6.5. Curva de Wöhler	129
6.6. O limite de fadiga corrigido	134
6.7. O projeto para a condição de fadiga em vida finita	139
6.8. O projeto para a condição de fadiga em vida infinita	141
6.9. O fator de concentração de tensão em fadiga	142
6.10. Problemas resolvidos	144
6.11. Problemas propostos	155
Nomenclatura	161
Referências	162

7. FADIGA DE BAIXO CICLO E DANO ACUMULATIVO EM FADIGA **163**

7.1. O projeto para fadiga de baixo ciclo	163
7.2. O modelo de Ramberg-Osgood	163
7.3. Curva deformação x número de ciclos	164
7.4. Curva tensão x deformação cíclica	167
7.5. A influência das tensões e deformações médias	169
7.6. Dano acumulativo em fadiga – lei de Palmgren-Miner	171
7.7. Problemas resolvidos	173

7.8. Problemas propostos	178
Nomenclatura	182
Referências	183
8. MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR	185
8.1. Introdução	185
8.2. A origem da mecânica da fratura	187
8.3. O trabalho de Griffith	188
8.4. Modos de carregamento da trinca	197
8.5. A tenacidade à fratura	205
8.6. Limitações da mecânica da fratura elástica linear	205
8.7. Coeficiente de segurança em fratura frágil	209
8.8. Problemas resolvidos	209
8.9. Problemas propostos	221
Nomenclatura	225
Referências	227
9. MECÂNICA DA FRATURA ELASTO-PLÁSTICA	229
9.1. Introdução	229
9.2. A abertura da frente da trinca – CTOD	230
9.3. A integral J	233
9.4. Correlação entre a integral J e o CTOD	235
9.5. Determinação experimental do CTOD e da integral J	236
9.6. A tensão crítica de falha	238
9.7. Problemas resolvidos	239
9.8. Problemas propostos	246
Nomenclatura	252
Referências	253
10. PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM FADIGA	255
10.1. Introdução	255
10.2. Propagação de trincas em regime elástico – lei de Paris	256
10.3. Leis de Paris para cargas na condição de amplitudes variáveis	259

10.4. Cálculo da vida em fadiga	260
10.5. Problemas resolvidos	261
10.6. Problemas propostos	269
Nomenclatura	274
Referências	275
11. TENACIDADE À FRATURA EXPERIMENTAL E FADIGA MULTIAXIAL	277
11.1. Introdução	277
11.2. O ensaio de tenacidade à fratura	278
11.2.1. Interpretação dos resultados do ensaio de tenacidade à fratura	280
11.3. Ensaio de tenacidade à fratura para j_{ic}	282
11.4. Fadiga multiaxial – conceituação preliminar	283
11.5. Modelos de fadiga multiaxial	286
11.6. Problemas resolvidos	287
Nomenclatura	296
Referências	297

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. A FALHA DE UM COMPONENTE ESTRUTURAL

A falha (ou o colapso) de determinado componente ou sistema, seja ele mecânico ou estrutural, pode ser considerada como consequência do não atendimento a uma condição original de projeto, a qual pode estar relacionada, normalmente, com as propriedades do material ou com os carregamentos envolvidos. Essa condição de falha pode ser caracterizada a partir de condições específicas bem definidas, dentre as quais se podem destacar: a) a ruptura total ou parcial do componente; b) a partir da condição de deformações exageradas ocorridas; c) a plastificação generalizada do componente; d) a eventual perda de instabilidade do componente; e) a partir de condições de desgaste do componente; f) a eventual perda de funcionalidade do sistema ou componente; ou g) o não atendimento a determinado coeficiente de segurança previamente definido em projeto. Segundo Collins (2006), qualquer modificação no tamanho, forma ou propriedade do material de determinado componente que o torne incapaz de realizar a função inicialmente pretendida deve ser considerada como uma condição de falha.

Visando a eliminar ou minimizar essas possíveis situações de falha, procura-se, entre outros aspectos, selecionar ou considerar materiais que apresentem uma elevada resistência com baixa densidade, além de garantirem-se boas propriedades térmicas, magnéticas e de corrosão, entre outras.

Ocorre, porém, que os materiais de engenharia apresentam, num contexto geral, características diferenciadas quando solicitados na condição de cargas estáticas ou cargas dinâmicas. Além disso, os materiais dúcteis apresentam falhas associadas às tensões de cisalhamento, mostrando uma boa quantidade de deformação antes da sua ruptura. Contrariamente, os materiais frágeis apresentam falhas associadas às tensões

de tração ou compressão, com um nível de deformação muito pequeno ou até mesmo imperceptível no momento da ruptura.

Pode-se concluir, para o componente avaliado, que a seleção do material, associada à sua forma e dimensões, será fundamental para um projeto adequado à prevenção de falhas. Essas premissas fazem com que o processo de projeto apresente um nível de importância cada vez mais significativo, dado que as considerações realizadas nessa etapa serão fundamentais para a funcionalidade e expectativa de vida do sistema a ser dimensionado.

1.2. OS CARREGAMENTOS ESTÁTICOS

O reconhecimento e a adequada aplicação das equações tradicionais da mecânica dos sólidos correspondem a uma condição de vital importância para as mais variadas situações de projeto, englobando, inclusive, os fatores de concentração de tensões que se façam necessários e aplicáveis.

Ao aplicar-se tal equacionamento a uma determinada condição de projeto, considera-se, entretanto, que os carregamentos atuem de forma estática ou, mais precisamente, não apresentem variação significativa na sua intensidade com o passar do tempo.

Carregamentos de tração, compressão e flexão geram tensões normais, enquanto carregamentos de cisalhamento e torção geram tensões tangenciais ou cisalhantes, caracterizando ainda a possibilidade de haver uma combinação de esforços que venham a contemplar a presença de tensões normais com tensões tangenciais, como é o caso de um eixo submetido a um carregamento de flexo-torção, por exemplo. Nessas circunstâncias, faz-se necessária a utilização de um determinado critério de projeto que possibilite a adequada combinação dessas tensões sem a perda de generalidade da questão conceitual envolvida.

Para o caso dos materiais dúcteis, a presente obra considera os seguintes critérios de projeto: a teoria da máxima tensão normal (critério de Rankine), a teoria da máxima tensão de cisalhamento (critério de Tresca) e ainda a teoria da máxima energia da distorção (critério de Von Mises). Para os materiais frágeis, repete-se a proposta da teoria de Rankine, além da teoria de Coulomb-Mohr. A discussão e a formulação matemática dessas teorias encontram-se detalhadas nos Capítulos 3 e 4, respectivamente.

1.3. A PREMISSE DA PLASTIFICAÇÃO GENERALIZADA

Os critérios de projeto convencionalmente utilizados, quando se contemplam materiais dúcteis, normalmente tomam por referência o limite de escoamento do material, favorecendo as condições de segurança e, com isso, deixando-se de utilizar um bom percentual da resistência ainda disponível no elemento solicitado.

Entretanto, determinadas condições de projeto permitem que o projetista trabalhe com um melhor aproveitamento da resistência real ou verdadeira do elemento solicitado, em detrimento das condições de segurança envolvidas. Com isso, o carregamento má-

ximo a ser considerado para um determinado ponto crítico da estrutura em análise acaba sendo avaliado a partir da condição da plastificação generalizada nesse ponto, em substituição ao limite de escoamento do material.

É evidente que tal condição não pode ser generalizada para qualquer situação de projeto, dado que a mesma depende de cada caso em particular e necessita, ainda, ser avaliada sob o ponto de vista do risco e das efetivas condições de segurança envolvidas.

Toda essa análise, contemplando alguns casos específicos da plastificação generalizada, são detalhadas no Capítulo 2 do presente livro.

1.4. OS CARREGAMENTOS DINÂMICOS

A utilização de materiais de elevada resistência, associados a um adequado critério de projeto, dentre os critérios enumerados para os materiais dúcteis ou frágeis, não garante, necessariamente, um comportamento satisfatório do componente em análise, visto que, sob condições de cargas dinâmicas, podem vir a ocorrer rupturas sob tensões até mesmo inferiores ao próprio limite de escoamento do material.

Cargas dinâmicas estão associadas à condição de cargas que variam com o passar do tempo, possibilitando identificar a presença de tensões máximas e mínimas, as quais, quando combinadas, possibilitam a caracterização das tensões designadas como tensão média e tensão alternada. A tensão alternada, conforme será discutido oportunamente, corresponde à principal responsável pelas falhas associadas aos carregamentos dinâmicos ou à condição de fadiga.

Nos Capítulos 6 e 7, métodos tradicionais para o projeto da vida em fadiga, como o método tensão x número de ciclos (S-N) e deformação x número de ciclos (ϵ -N), são discutidos, particularizando-se, ainda, as premissas das vidas em fadiga de alto e baixo ciclo, respectivamente.

Novos fatores de concentração de tensões também são discutidos, uma vez que, sob condição de fadiga, os fatores de concentração de tensões teóricos ou estáticos não são suficientemente adequados para quantificar pontos notáveis de concentração de tensão submetidos a cargas cíclicas.

1.5. O PROJETO TOLERANTE AO DANO

Objetivando melhorar as condições de projeto para os carregamentos dinâmicos, faz-se necessária a utilização de equações semiempíricas obtidas a partir de dados experimentais, as quais possibilitam o uso da ferramenta da mecânica da fratura na solução de problemas que contemplem a presença de trincas ou fissuras previamente identificadas e reconhecidas quando da solução do problema.

A mecânica da fratura elástica linear (MFEL) envolve conceitos aplicáveis e válidos para materiais relativamente frágeis que contemplam trincas agudas, podendo vir a

apresentar, ainda, a condição de escoamento em pequena escala na extremidade dessas trincas (Capítulo 8), enquanto que a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) contempla conceitos, agora válidos quando da existência de uma plasticidade significativa na ponta da trinca, vindo o material, ainda, a apresentar um comportamento não linear na região em análise (Capítulo 9).

Ainda nesse contexto, a previsão da vida de componentes e sistemas mecânicos pode ser relacionada, principalmente, a partir da equação de Paris, a qual relaciona parâmetros característicos do material com o número de ciclos de carga considerados, possibilitando com isso uma estimativa da vida remanescente de determinado componente previamente identificado como fissurado, assunto apresentado e discutido no Capítulo 10.

1.6. CONCLUSÕES

As práticas e ferramentas apresentadas ao longo dos diversos capítulos da presente obra têm por objetivo principal fornecer subsídios mínimos e adequados para que o engenheiro de projetos possa vir a avaliar de forma consciente as premissas de projeto a serem consideradas para as mais diversas situações.

Parte-se do pressuposto, evidentemente, de que os conceitos tradicionais de mecânica dos sólidos sejam efetivamente dominados pelo leitor, de tal forma que o entendimento das demais etapas de projeto possa ser avaliado e entendido com a maior naturalidade e tranquilidade possível e desejada.

A proposta de inserir problemas exemplos devidamente resolvidos ao final de cada capítulo tem por objetivo complementar auxiliar na familiarização das equações, unidades e conceituações envolvidas, de modo que o leitor se sinta à vontade na resolução de demais problemas sobre o assunto. Problemas propostos com suas respectivas respostas também fazem parte de cada Capítulo, sendo ainda possível identificar suas resoluções no site da Editora Blucher.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Julio César de.; LIMA, Key. Fonseca de.; BARBIERI, Renato. **Elementos de Máquinas** – Projeto de Sistemas Mecânicos. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2022.
- COLLINS, Jack. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas** – Uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- FAIRES, Virgil. 1979. **Elementos Orgânicos de Máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 1979.
- PASTOUKOV, Viktor.; VOORWALD, Herman. **Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural**. São Paulo: Editora UNESP, 1995.
- ROSA, Edson da. **Análise de Resistência Mecânica** – Mecânica da Fratura e Fadiga. Florianópolis: Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Modos de falha e comportamento mecânico dos materiais

2.1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico dos materiais é uma área de estudo crucial para a compreensão da segurança e da integridade estrutural de uma ampla gama de aplicações, desde edifícios até equipamentos industriais. A avaliação do comportamento mecânico de um material é influenciada por uma série de fatores, incluindo a sua microestrutura, as condições de carregamento e suas propriedades físicas e mecânicas.

Um aspecto fundamental na avaliação do comportamento mecânico de um material é o entendimento dos seus modos de falha. Cada tipo de material tem suas próprias características e limitações quando se trata de suportar cargas e tensões, e conhecer os modos de falha ajuda a prever e evitar possíveis problemas.

Os materiais sólidos, quando submetidos a determinados carregamentos, podem ser classificados, quanto ao seu comportamento mecânico, em dúcteis ou frágeis, dependendo de sua habilidade em deformarem-se plasticamente. Considerando-se essa premissa, determinado componente pode deixar de cumprir as funções para as quais foi originalmente projetado, a partir, fundamentalmente, de três modos distintos de falha, a saber:

- deformação elástica excessiva;
- deformação plástica e plastificação generalizada; e
- fratura.

Outros modos de falhas mais específicos, como o *creep*, a corrosão, o impacto, o desgaste, a vibração, o choque térmico, a radiação, a falha por lubrificação, entre ou-

tros, podem também vir a ocasionar a falha (ou o colapso) do componente em análise, não sendo, porém, escopo e objetivo do presente texto.

2.2. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA EXCESSIVA

No grupo das deformações elásticas excessivas, podem ser considerados, por exemplo, a deflexão elástica sob equilíbrio estável (deslocamentos exagerados) e o fenômeno da instabilidade elástica repentina (flambagem). A Figura 2.1 ilustra, de forma esquemática, essas duas condições. Observe que as falhas decorrentes dessa natureza estão associadas à rigidez do elemento considerado, e não necessariamente à sua resistência mecânica. Uma coluna com maior rigidez e de mesmo material, por exemplo, apresentará um maior índice de esbeltez e, provavelmente, não virá a flambar.

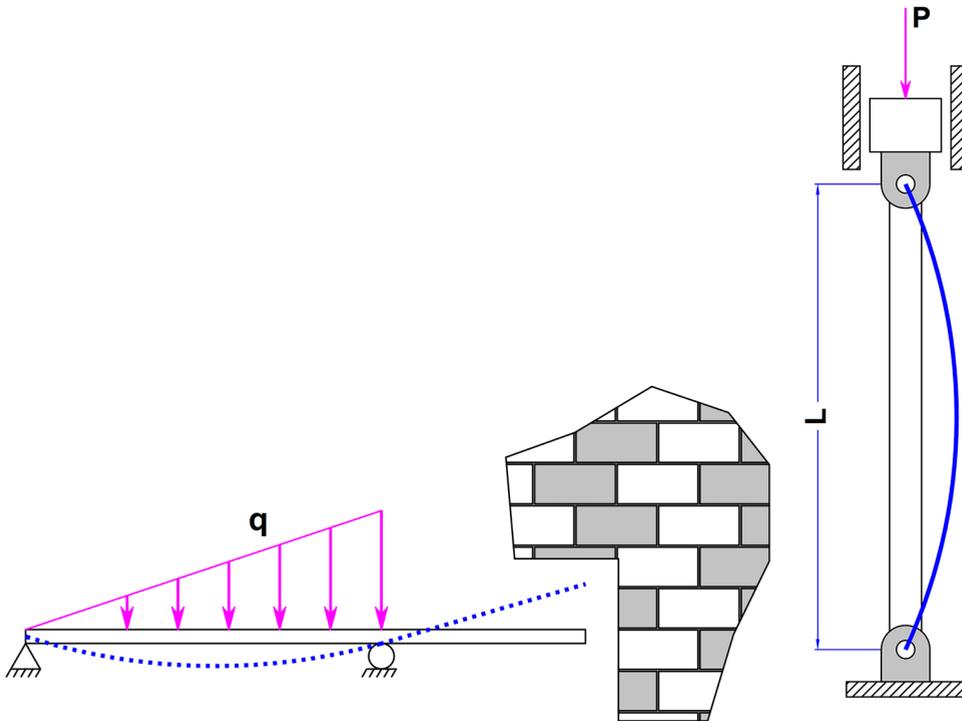


Figura 2.1 – exemplos de deformação elástica excessiva, sendo: (a) deflexão exagerada; e (b) instabilidade elástica de uma coluna esbelta.

2.3. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E PLASTIFICAÇÃO GENERALIZADA

A deformação plástica pode ser caracterizada pelo escoamento do material à temperatura ambiente. Nessas circunstâncias, as tensões resultantes nos pontos

críticos da estrutura estariam se igualando ou ultrapassando o limite de escoamento do material. Na prática, porém, torna-se pouco provável que um material dúctil venha a romper-se diretamente por escoamento, dado que, à medida que ele escoe, ocorrerá o seu encruamento correspondente, ou seja, uma movimentação de discordâncias que exigem níveis de tensão ainda maiores para a continuidade da deformação imposta. Já a plastificação generalizada é decorrente do aumento gradativo das solicitações externas, ocasionando uma passagem, também gradativa, do regime elástico para o regime plástico, na secção de maior solicitação da estrutura. O carregamento da Figura 2.2 apresenta, de forma esquemática, as etapas até a plastificação generalizada da viga ou, mais especificamente, no ponto correspondente ao seu engastamento.

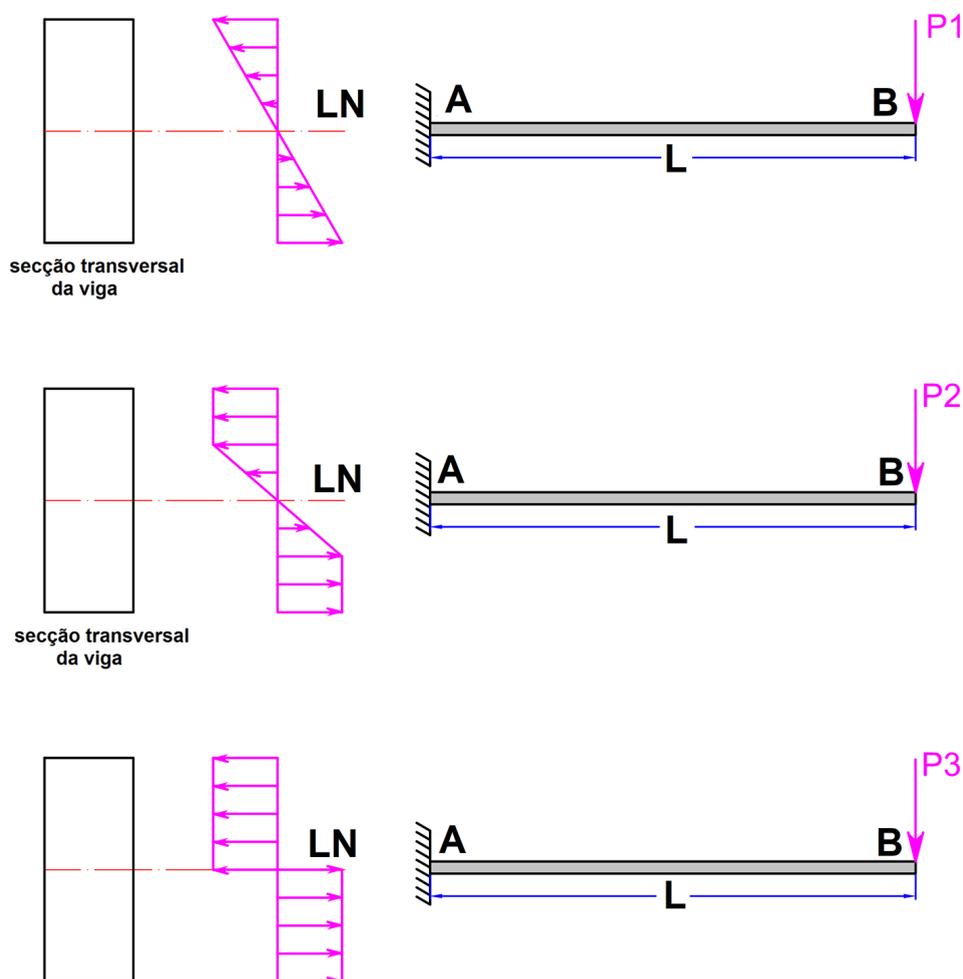


Figura 2.2 – solicitações gradativas até a plastificação generalizada no ponto de apoio de uma viga carregada e simplesmente engastada ($P_1 < P_2 < P_3$).

2.4. FRATURA

No contexto da falha por fratura, considerando-se materiais metálicos, o fenômeno poderá ocorrer de três maneiras distintas: (a) fratura frágil, (b) fratura progressiva (fadiga) e (c) fratura retardada.

A fratura frágil não é necessariamente uma característica exclusiva de um material classificado como frágil, dado que, em geral, os aços-carbono, por exemplo, apesar de serem materiais reconhecidamente dúcteis, podem vir a apresentar fraturas frágeis decorrentes de solicitações ocorridas em situações de baixas temperaturas. Diz-se, assim, que os aços-carbono estruturais apresentam uma transição dúctil-frágil, não apenas pela condição das baixas temperaturas, mas também em decorrência da taxa de carregamento e de um complexo nível de tensões, aos quais eles possam vir a ser submetidos.

A fratura progressiva ou por fadiga é, com certeza, o tipo de falha predominante nos materiais metálicos em geral. A falha por fadiga é preocupante porque ocorre sem apresentar sinais aparentes de deformação e mediante níveis de tensões normalmente inferiores ao próprio limite de escoamento do material. A falha é dita progressiva porque tem início numa mínima fissura ou trinca, localizada, normalmente, na superfície externa do componente, que aumentará gradativamente na presença de tensões alternadas (tensões que variam no transcorrer do tempo).

Por fim, tem-se a fratura retardada, em que a condição de falha não ocorre imediatamente após a aplicação de uma tensão excessiva, mas, sim, após um período. Um aço carregado estaticamente à temperatura ambiente, mas na presença de hidrogênio é um bom exemplo da condição de uma falha por fratura retardada. Quando o hidrogênio é absorvido pela superfície de um aço-carbono, por exemplo, ele pode se difundir para o interior da peça e formar bolhas de hidrogênio na microestrutura do material. Essas bolhas podem se tornar pontos fracos na estrutura, vindo a romper-se quando a peça é submetida a tensões.

2.5. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Determinadas propriedades dos materiais permitem definir e classificar características fundamentais para fins de seleção e projeto. Nessas circunstâncias, o ensaio ou teste de tração uniaxial corresponde a uma das principais aplicações experimentais para a definição dessas propriedades. Não se trata, evidentemente, do único tipo de ensaio disponível, em termos práticos, mas com certeza é o mais utilizado por sua simplicidade, seus custos envolvidos, seus resultados disponibilizados e sua razoável rapidez quanto à realização. Ele utiliza corpos de prova padronizados, conforme exemplos ilustrativos da Figura 2.3, os quais são submetidos a cargas uniaxiais em tração crescentes, objetivando medir as correspondentes elongações ocorridas. Na mesma Figura, é ilustrado, adicionalmente e de forma esquemática, o equipamento normalmente adotado para a realização desse tipo de ensaio.

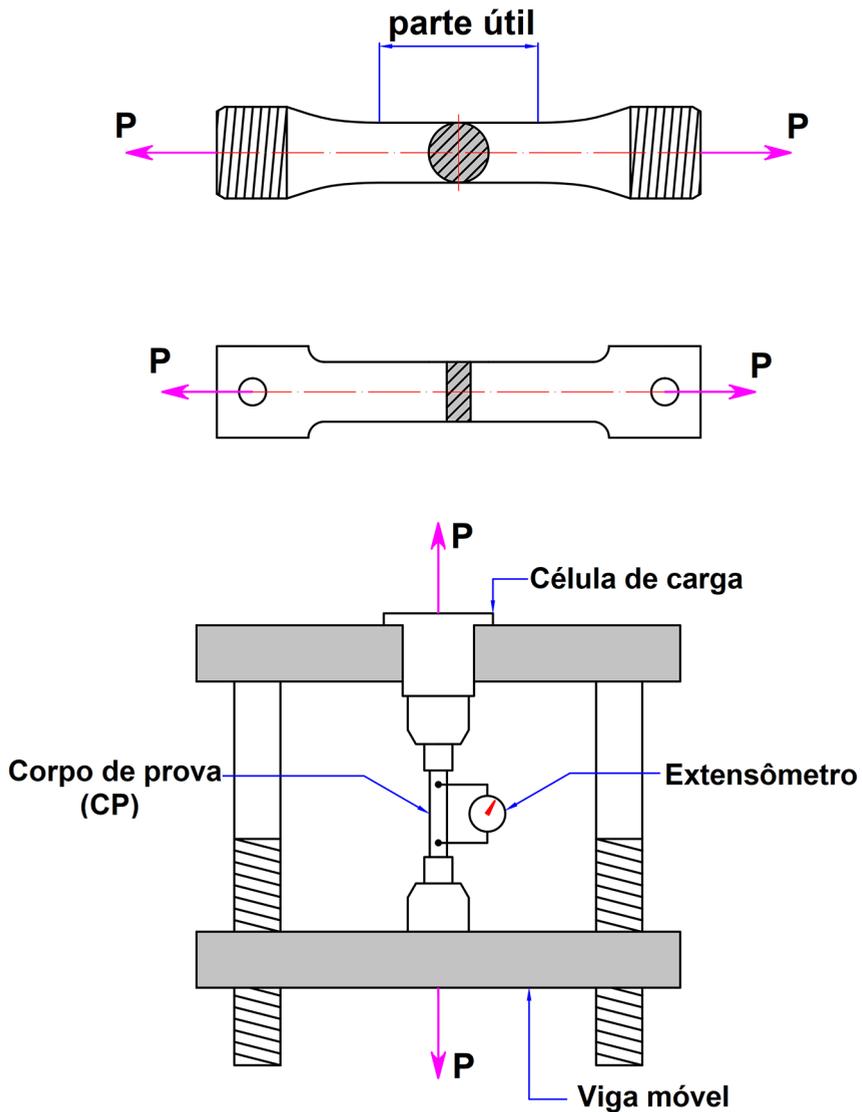


Figura 2.3 – exemplos de corpos de prova padronizados e o esquemático de uma máquina de ensaio de tração.

A partir dos dados de carga e deformação, uma curva de engenharia é construída (Figura 2.4), e a partir dela se torna possível obter uma série de informações acerca de algumas importantes propriedades dos materiais avaliados.

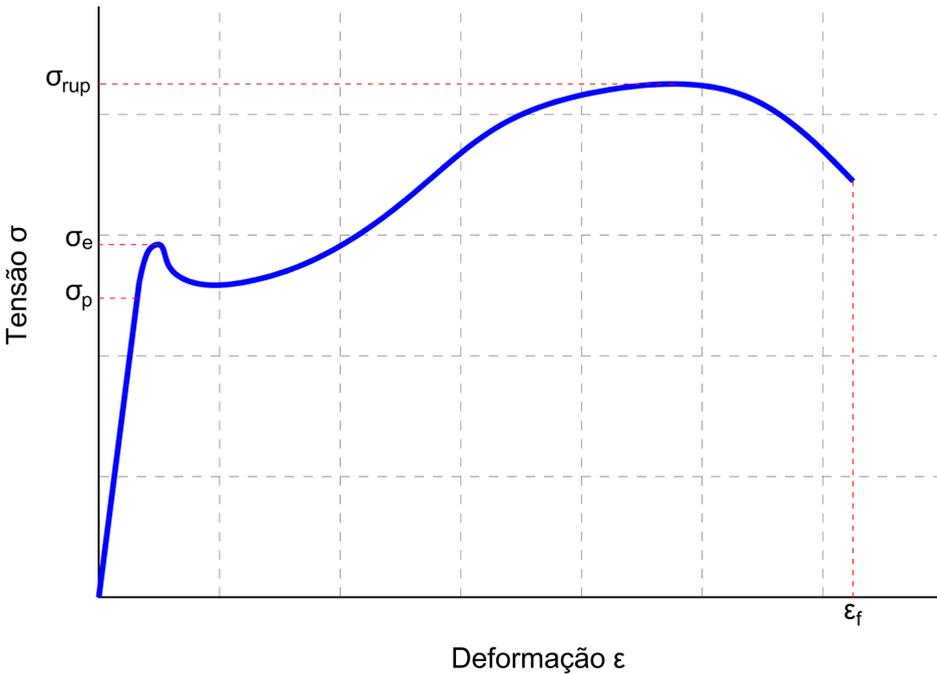


Figura 2.4 – diagrama tensão x deformação de engenharia (típico) de um material dúctil.

Primeiramente, em termos das tensões obtidas, é possível destacar: a) a tensão ou o limite de proporcionalidade (σ_p), acima do qual a linearidade entre a tensão, e a deformação (lei de Hooke) deixa de existir; b) a tensão, ou limite de escoamento (σ_e), a partir da qual se produzem deformações permanentes (irreversíveis) no material; e c) a tensão máxima, ou limite de resistência à tração do material (σ_{rup}), considerada como a relação entre a carga máxima atingida no ensaio e a área da secção transversal original do corpo de prova. Note pela referida Figura que existe um valor de tensão (ponto da extremidade direita) associado à fratura do corpo de prova, cujo valor nominal é, evidentemente, um pouco inferior à tensão máxima obtida no transcórre do ensaio. Essa condição se deve à redução proporcional da secção transversal do corpo de prova, associada ao seu correspondente alongamento (o volume do corpo de prova não se altera com o ensaio), caracterizando o fenômeno designado como *estricção*.

As Equações a seguir permitem definir a tensão máxima ou o limite de resistência do material, o valor do alongamento e a sua correspondente redução de secção transversal.

$$\sigma_{max} = \sigma_{rup} = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\psi = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (2.3)$$

A Figura 2.4 corresponde ao ensaio de um material dúctil, ou, mais especificamente, um material que apresenta “razoável” deformação até o ponto da sua ruptura. A partir dessa mesma Figura, torna-se possível discutir a definição dos conceitos de tenacidade e resiliência do material. A área total compreendida entre a curva gerada e o eixo horizontal do gráfico é equivalente à sua tenacidade, caracterizando a condição de que, quanto mais tenaz for determinado material, maior será a sua capacidade de absorver energia antes da ruptura. Esse conceito torna-se importante quando se deseja projetar componentes que devam sofrer tensões estáticas ou dinâmicas acima do seu limite de escoamento, mas sem o risco de fraturar.

Dentro dessa mesma conceituação, caso a área considerada seja restrita ao trecho linear do gráfico (região da validade da lei de Hooke), obter-se-ia a propriedade designada como resiliência, a qual corresponde à capacidade do material absorver energia na sua região elástica e liberá-la integralmente caso viesse a ser descarregado.

A Figura 2.5 tem por objetivo apresentar, de forma esquemática, a tenacidade e a resiliência de determinado material. Observe, ainda, que o parâmetro tenacidade será mais bem determinado a partir do diagrama tensão x deformação real ou verdadeiro (conforme discutido na seção 2.6 do presente Capítulo).

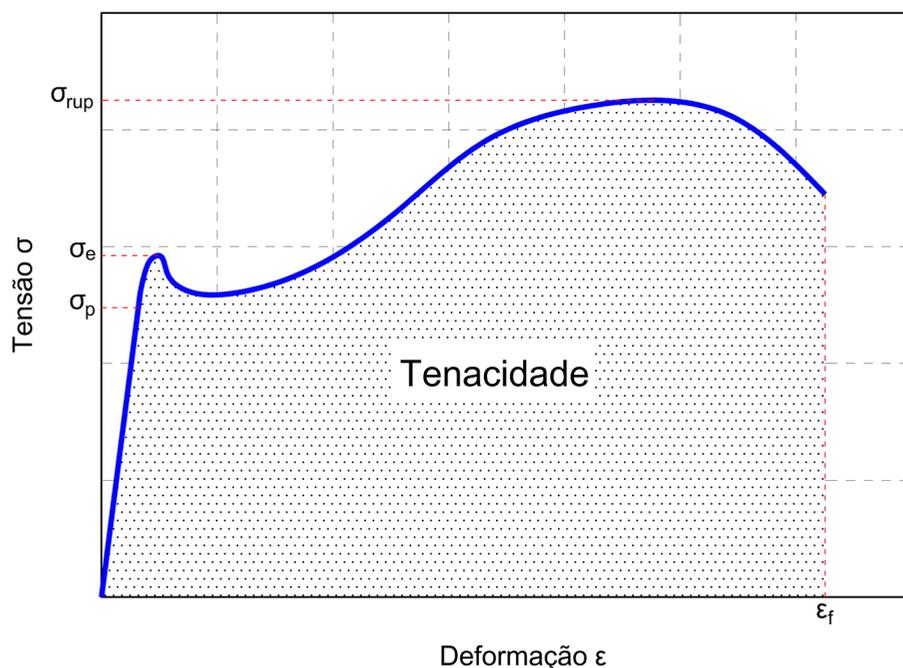


Figura 2.5 – tenacidade e resiliência a partir do diagrama tensão x deformação do material.

Matematicamente, o módulo de resiliência dos materiais é dado pela relação:

$$u_R = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E} \quad (2.4)$$

Enquanto a tenacidade pode ser definida por uma expressão aproximada, proposta por Seely & Newton (1947), na forma:

$$u_T = \left(\frac{\sigma_e + \sigma_{rup}}{2} \right) \varepsilon_f \quad (2.5)$$

Outra propriedade característica do material corresponde ao seu módulo de elasticidade longitudinal “E”, o qual é obtido a partir da inclinação da curva ensaiada, no trecho linear entre tensão e deformação. Matematicamente:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (2.6)$$

O módulo de elasticidade corresponde, desse modo, a uma constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação do material, validando, assim, a conhecida e tradicional lei de Hooke.

Considerando-se, ainda, o fenômeno da estricção, pode-se demonstrar uma relação proporcional e constante entre as deformações longitudinal (ε) e transversal (ε_t) do corpo de prova, o qual é conhecido como coeficiente ou módulo de Poisson. Matematicamente (note que o sinal negativo da Equação é consequência da redução da secção transversal com o correspondente aumento de comprimento do corpo de prova), pode-se considerar:

$$\varepsilon_t = -\nu \varepsilon \quad (2.7)$$

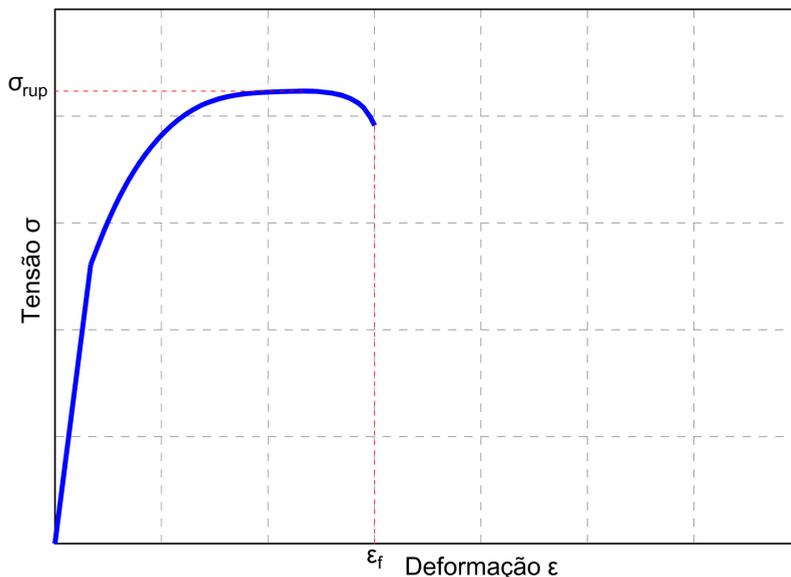
Por fim, observe que o ensaio uniaxial de tração é realizado a partir da relação entre a força aplicada no corpo de prova e a sua correspondente variação de comprimento ($F \times \Delta L$), enquanto, nos gráficos (ou diagramas) finais considerados, faz-se referência a uma relação entre tensão e deformação específica ($\sigma \times \varepsilon$). Essa mudança de variáveis é realizada objetivando-se a simplificação dos resultados finais apresentados, dado que, nessas circunstâncias, eles se tornam independentes das dimensões geométricas do corpo de prova avaliado.

Tabela 2.1 – propriedades de algumas ligas metálicas na condição de temperatura ambiente

Liga	E (MPa)	G (GPa)	ν
Alumínio	71,7	26,9	0,33
Bronze	106	40,1	0,32
Cobre	119	44,7	0,33
Aço-carbono	207	79,3	0,29
Ferro fundido cinzento	100	41,4	0,21
Inconel (ligas de níquel-cromo)	214	75,8	0,29
Magnésio	44,8	16,5	0,35
Molibdênio	331	117	0,31
Aço-níquel	207	79,3	0,29
Aço inoxidável	190	73,1	0,31

2.5.1. DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA MATERIAIS FRÁGEIS

Contrariamente ao que foi descrito para um material dúctil, pode-se afirmar que um material frágil é aquele que apresenta pouca (ou quase nenhuma) deformação antes da sua ruptura. A Figura 2.6 ilustra um exemplo típico dessa situação. Note que nem todas as propriedades anteriormente descritas a partir do ensaio realizado num material dúctil poderão ser obtidas, considerando-se o ensaio uniaxial de um material frágil, como o ferro fundido cinzento.

**Figura 2.6** – diagrama tensão x deformação típico de um material frágil.

2.5.2. DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO ORIUNDO DE TENSÕES CISALHANTES

Conforme descrito inicialmente, outros tipos de ensaios mecânicos podem ser realizados, visando-se a obter resultados complementares ou distintos acerca dos materiais considerados. Um exemplo dessa situação corresponde ao ensaio de torção, o qual se refere à aplicação de um torque gradativo sobre uma secção circular maciça, efetivando-se medições angulares das deformações ocorridas ao longo da própria secção do corpo de prova. O resultado obtido, para materiais dúcteis, é similar ao apresentado pela Figura 2.4, substituindo-se, porém, os parâmetros de referência agora considerados. A Figura 2.7 ilustra essa proposição.

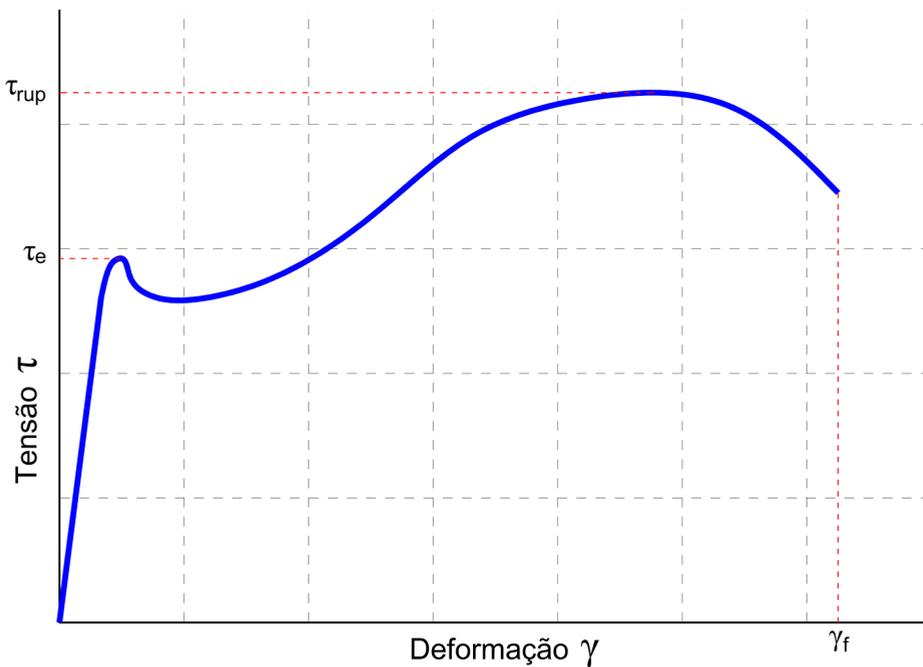


Figura 2.7 – diagrama tensão x deformação de engenharia (típico) para um ensaio de torção.

Nessas circunstâncias, a lei de Hooke permanece válida, sendo, porém, escrita na forma:

$$\tau = G\gamma \quad (2.8)$$

Em que “G” (inclinação da curva tensão x deformação na região linearizada do gráfico) corresponde ao módulo de elasticidade transversal ou módulo de rigidez do material, “τ” é a tensão de cisalhamento e “γ” corresponde à distorção angular (nesse caso, medida em radianos).

Os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, além do coeficiente de Poisson, de determinado material podem ainda ser agrupados numa única relação, ou mais especificamente na forma:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.9)$$

2.6. DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO REAL OU VERDADEIRO

Os diagramas tensão x deformação convencionais, também designados como diagramas tensão x deformação de engenharia, são obtidos a partir das dimensões originais do corpo de prova em análise, traduzindo com isso resultados finais não totalmente exatos, visto que as dimensões do corpo de prova variam de forma mais significativa após o ensaio ultrapassar o regime elástico do material. Para completar, nos materiais dúcteis, o fenômeno da estrição instabiliza completamente a distribuição das deformações localizadas em decorrência do estado triplo de tensões que se estabelece na região da falha, ocasionando, assim, divergências ainda maiores nos resultados finais obtidos.

Visando corrigir tais distorções, torna-se possível a realização dos ensaios uniaxiais de tração designados como reais ou verdadeiros, nos quais as propriedades do material se baseiam nos valores instantâneos da secção transversal do corpo de prova. O resultado, nessas circunstâncias, será traduzido por meio de diagramas tensão x deformação diferenciados, conforme pode ser observado na Figura 2.8.

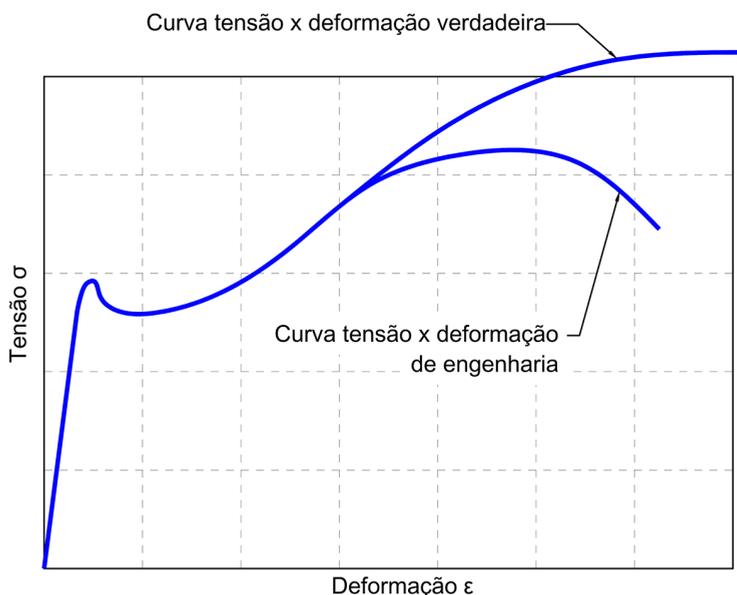


Figura 2.8 – diagramas tensão x deformação – verdadeiro (real) e de engenharia.

Deve-se destacar, porém, que, na prática e nos ensaios industriais de rotina, os ensaios de tração convencionais ou de engenharia permanecem sendo corriqueiramente utilizados, tendo-se em vista a rapidez e a facilidade quanto à obtenção dos resultados esperados. Nessas circunstâncias, os ensaios reais ou verdadeiros acabam, normalmente, restringindo-se a trabalhos de pesquisa e/ou de desenvolvimento de novos materiais.

2.6.1. TENSÃO E DEFORMAÇÃO VERDADEIRAS

As expressões válidas para se definirem a deformação e a tensão verdadeiras são, evidentemente, diferenciadas das anteriormente apresentadas. A tensão de tração real é definida a partir do quociente entre a carga atuante em qualquer instante do ensaio e a área da secção transversal do corpo de prova nesse mesmo instante. Assim:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} \quad (2.10)$$

Para o caso da deformação real, ela é baseada na variação do comprimento do corpo de prova em relação ao comprimento de medida instantânea (em vez do comprimento inicial do corpo de prova). Dessa forma, com a aplicação de uma carga “ P_i ”, o comprimento inicial passa de “ L_o ” para “ L_i ”. Assim, aumentando-se a carga em uma pequena quantidade “ dP_i ”, será aumentado o comprimento “ dL_i ”. Com isso, a deformação real pode ser descrita como:

$$\varepsilon_{real} = \int_{L_o}^L \frac{dL_i}{L_i} = [\ln L_i]_{L_o}^L = \ln \left(\frac{L}{L_o} \right) \quad (2.11)$$

2.6.2. CORRELAÇÃO ENTRE TENSÕES E DEFORMAÇÕES REAIS (VERDADEIRAS) E DE ENGENHARIA (CONVENCIONAIS)

Retomando-se as Equações (2.2) e (2.11), pode-se ainda considerar:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{L}{L_o} - 1 \Rightarrow \frac{L}{L_o} = 1 + \varepsilon$$

e: (2.12)

$$\varepsilon_{real} = \ln \left(\frac{L}{L_o} \right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

Para o caso das tensões, parte-se da premissa de que o volume do corpo de prova permanece constante no transcorrer do ensaio. Com isso, $A_o L_o = AL$, ou, ainda, $A_o/A = L/L_o$, sendo possível escrever:

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) \Rightarrow \frac{A_o}{A_i} = 1 + \varepsilon \Rightarrow A_i = \frac{A_o}{1 + \varepsilon}$$

A substituição dessa relação da **área instantânea** do material na equação (2.10) resultará, enfim, em:

$$\sigma = \frac{P_i}{A_i} = P_i \frac{1 + \varepsilon}{A_o} \Rightarrow \sigma_{real} = \frac{P}{A_o} (\varepsilon + 1) \quad (2.13)$$

2.6.3. CURVAS DE ESCOAMENTO

As curvas tensão x deformação obtidas a partir de ensaios de tração reais ou verdadeiros podem ser designadas como curvas de escoamento (*flow curve*). Isso decorre de a condição dessas curvas representarem as características de plasticidade do material considerado. Assim, problemas de plasticidade são costumeiramente relacionados a partir de curvas tensão x deformação obtidas por carregamento uniaxial, desde que eles sejam avaliados em termos da tensão e deformação verdadeiras. Matematicamente, uma das expressões que representa esses resultados de forma satisfatória corresponde à equação de Hollomon, escrita na forma:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.14)$$

Em que “n” representa o coeficiente de encruamento do material, e “K” é a constante plástica de resistência. O expoente de encruamento fornece a capacidade do material de distribuir a deformação uniformemente, ou, mais especificamente, mede a capacidade de encruamento do material, variando numericamente entre zero (material perfeitamente plástico) e a unidade (material elástico), assumindo, ainda, os valores de 0,10 a 0,60 para a maioria dos materiais metálicos.

A constante plástica de resistência (K) mede a tensão real quando “ ε ” = 1, tendo assim, unidade dimensional de tensão.

Observe, entretanto, que a Equação (2.14) somente tem validade a partir do trecho compreendido entre o escoamento plástico e a carga máxima ou de ruptura do material.

A determinação experimental dos valores de “K” e “n” é mais facilmente obtida a partir do ajuste da Equação (2.14) na forma:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (2.15)$$

Escrevendo-se os resultados finais num papel log-log, conforme esquematizado pela Figura 2.9.

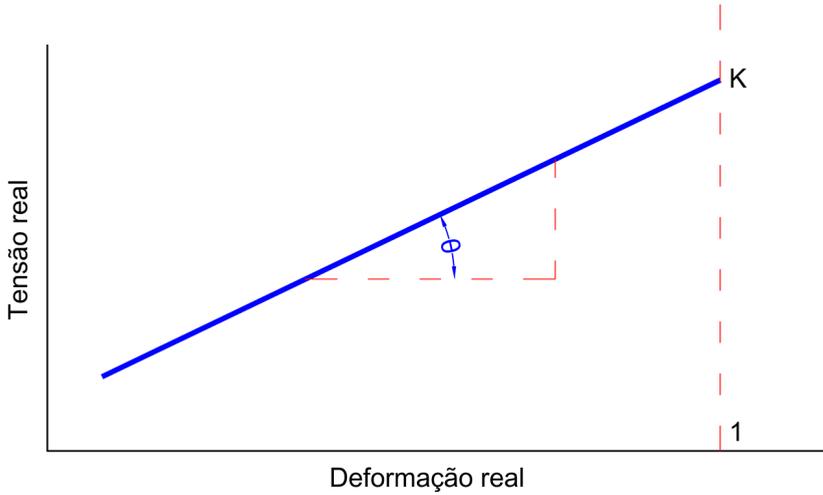


Figura 2.9 – determinação experimental do coeficiente de encruamento ($n = \text{tg } \theta$) e da constante plástica de resistência (K) do material.

2.6.4. CURVAS DE ESCOAMENTO IDEALIZADAS

Visando-se, ainda, a simplificar o equacionamento matemático, utiliza-se na prática o conceito das curvas de escoamento idealizadas, as quais, além de simplificarem o tratamento matemático do problema, apresentam resultados que costumemente não fogem muito da realidade física dele. São comuns as curvas de escoamento idealizadas do tipo: a) material plástico rígido ideal; b) material plástico ideal com regime elástico; e c) material com encruamento linear, conforme pode ser observado esquematicamente por meio das curvas da Figura 2.10.

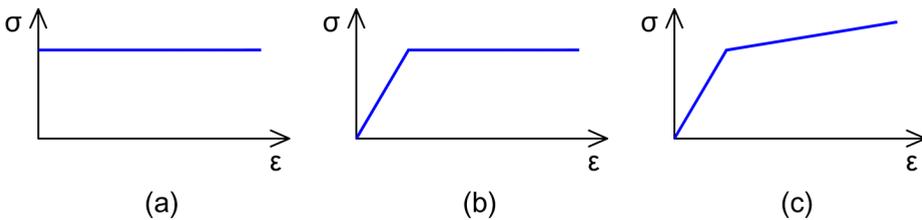


Figura 2.10 – exemplos de curvas de escoamento idealizados, supondo materiais: (a) plástico rígido ideal; (b) plástico ideal com regime elástico; e (c) com encruamento linear.

2.7. O ENCRUAMENTO

A região plástica de um material é caracterizada pelo endurecimento obtido a partir da deformação a frio, ou, mais especificamente, pelo chamado *fenômeno de encruamento*.

O encruamento de um material corresponde ao seu endurecimento por deformação plástica. Considere, por exemplo, o diagrama representativo da Figura 2.11.

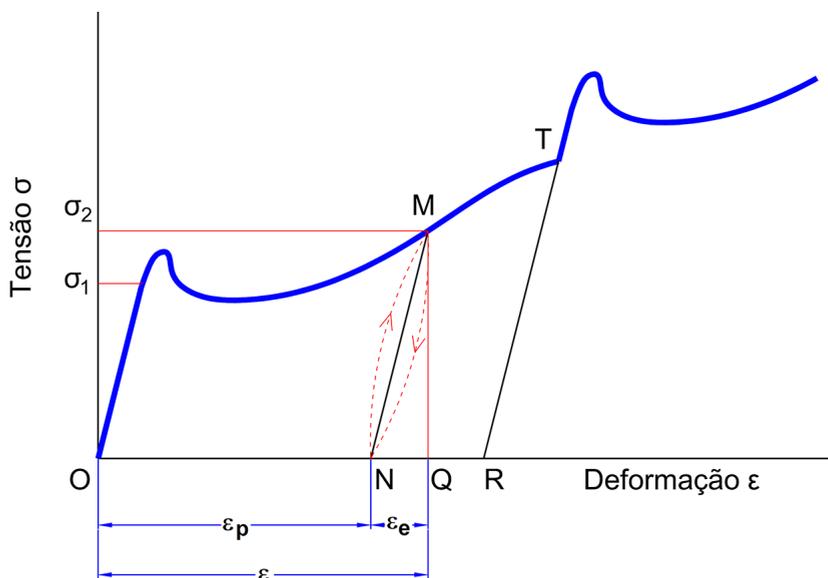


Figura 2.11 – efeito do encruamento num material carregado e descarregado de forma sequencial.

Nesse diagrama, decorrente de um ensaio de tração realizado num aço de baixo carbono, o ponto “M” corresponde ao ponto até o qual o material é carregado dentro da zona plástica, sendo, na sequência, descarregado até o ponto “N”. Esse procedimento faz com que o escoamento ocorrido deixe de existir, em virtude de as discordâncias terem se libertado da região congestionada de átomos no interior da estrutura do material, além de caracterizar a presença de uma deformação plástica permanente (ϵ_p).

Havendo, logo na sequência do processo, um novo carregamento, este terá início a partir do ponto “N”, ocasionando, agora, uma deformação elástica (ϵ_e) equivalente ao segmento NQ. Esse procedimento ocorre como se o ensaio tivesse sido iniciado novamente, mas, agora, a partir do ponto “N”. Tal condição permite verificar que o limite de resistência do material será bem pouco afetado por qualquer descarregamento ocorrido no transcorrer do ensaio.

O fenômeno do encruamento ocorre porque os metais se deformam plasticamente em decorrência do movimento de discordâncias, as quais interagem diretamente entre si, ou indiretamente com outros obstáculos e imperfeições. Tais interações levam a uma redução de mobilidade dessas discordâncias, acarretando um maior nível de tensão para provocar maiores deformações plásticas. Como exemplo, um metal deformado plasticamente contém cerca de 10^{12} discordâncias por metro quadrado, contra um patamar de 10^6 a 10^8 discordâncias pela mesma unidade de área, presente em materiais que não tenham sofrido qualquer tipo de deformação plástica.

Este livro foi concebido como uma proposta alternativa e complementar para as disciplinas de Mecânica da Fratura, Fadiga e Projetos Mecânicos, em cursos de graduação em Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais, Engenharia de Produção e Engenharia Mecatrônica, entre outras.

O livro aborda conteúdos tradicionais da Análise de Falhas, Fadiga, Mecânica da Fratura e da grande área de Projetos Mecânicos, enfocando aspectos conceituais, parâmetros de cálculo, formulações matemáticas e exemplos de cálculos das mais diversas situações e casos presentes na maioria dos sistemas e dispositivos mecânicos.

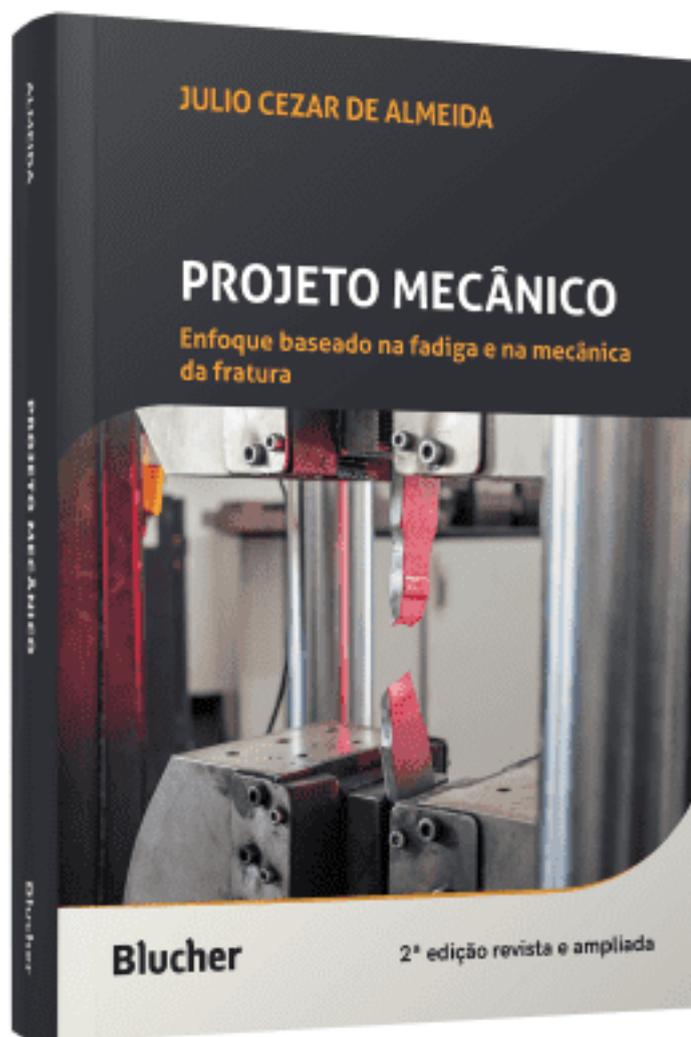
Nesse contexto, a independência quase que total dos capítulos é uma das principais características do livro, possibilitando ao leitor o estudo dos princípios fundamentais envolvidos a partir da compilação da experiência do autor e de uma grande variedade de fontes e referências sobre os assuntos.

Além de fornecer a base teórica necessária, o trabalho traz, por capítulo, exemplos de problemas resolvidos, figuras ilustrativas, além de um conjunto de problemas propostos para a consolidação dos aspectos avaliados. Como pré-requisito desejável, para uma melhor utilização do livro, sugere-se ao leitor familiaridade com os conceitos de Resistência dos Materiais e Mecânica dos Sólidos, disciplinas essas normalmente presentes nas grades iniciais dos cursos tradicionais de Engenharia.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

Projeto mecânico

Enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura

Julio César de Almeida

ISBN: 9788521220824

Páginas: 298

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2024
