Introdução ao comportamento mecânico dos materiais

Cláudio Geraldo Schön

15 de outubro de 2002

1 Introdução

O presente texto complementa os tópicos descritos na apostila "Introdução ao comportamento mecânicos dos materiais" [1] e é dedicada ao curso PMT2100 - Introdução à ciência dos materiais para a engenharia" , de responsabilidade do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A reprodução deste documento na íntegra ou em partes é permitida para objetivos didáticos sem fins comerciais e desde que a fonte seja citada.

Na primeira parte desta apostila foram tratados os aspectos gerais da resposta de um sólido deformável a um esforço mecânico externo. Discutiram-se as respostas no regime elástico e no regime plástico, bem como algumas características especiais de certas classes de materiais.

O presente texto lida fundamentalmente com o efeito da temperatura e da taxa de deformação $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ sobre o comportamento mecânico dos materiais. Em adição se fará uma breve discussão sobre o fenômeno da fadiga mecânica, em seus aspectos mais gerais.

1.1 Temperatura $\times$ taxa de deformação

O aumento da temperatura de um sistema corresponde a um aumento da energia cinética dos átomos e/ou moléculas que compõem este sistema. Isto pode ser demonstrado em uma área da física conhecida como "Mecânica Estatística". Por meio das ferramentas desta disciplina pode-ser demonstrar que a média da energia cinética dos átomos e/ou moléculas do sistema é RT, onde R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta. Em um sólido em repouso a energia cinética dos átomos está contida no movimento vibratório, no movimento de rotacão das moléculas e no movimento de translação, quando ocorre difusão. Desta forma o incremeto da temperatura facilita a ocorrência dos processos de deformação plástica no material.

Podemos definir agora a taxa de deformação como:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \tag{1.1}$$

Onde ϵ é a deformação específica normal. Como ϵ é um número adimensional, a únidade da taxa de deformação será $[s^{-1}]$. Intuitivamente sabemos que os processos de deformação plástica não ocorrem instantaneamente, necessitando de um intervalo de tempo para

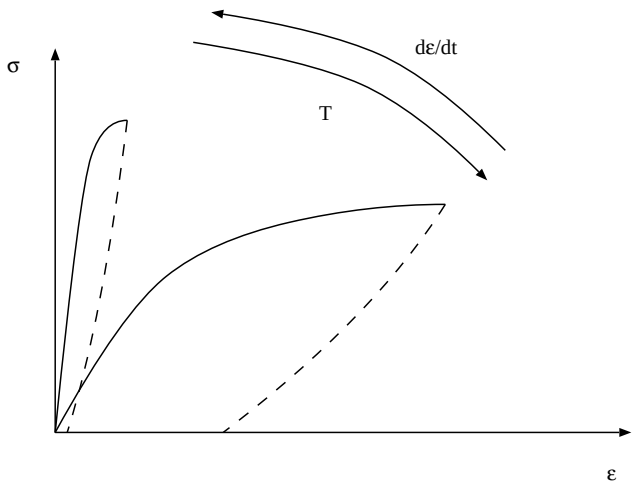


Figura 1.1: Exemplo dos efeitos da temperatura e da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico de um termoplástico amorfo.

se completar. Desta forma podemos concluir que um aumento da taxa de deformação deve dificultar a sua ocorrência. Em suma, pode-se concluir que temperatura e taxa de deformação tem *efeitos opostos* sobre o comportamento mecânicos dos materiais. Este efeito é particularmente crítico no caso dos polímeros termoplásticos, que se deformam pelo deslizamento relativo das macromoléculas. A Figura 1.1 ilustra este fenômeno. O aumento de temperatura pode tornar um plástico inicialmente frágil em um plástico dúctil, enquanto que o aumento da taxa de deformação pode ter o efeito inverso.

Na seqüência iremos estudar em maior detalhe a interação entre temperatura e taxa de deformação na deformação plástica dos materiais.

2 Efeito da temperatura sobre o comportamento mecânico

2.1 Elasticidade, fluxo viscoso e visco-elasticidade

Como visto na primeira parter desta apostila [1] grande parte dos sólidos apresentam um comportamento elástico para baixos valores de tensão aplicada. Para compreender melhor o comportamento elástico vamos considerar o experimento imaginário ilustrado na Figura2.1. Inicialmente o sólido está em repouso e nenhuma força atua sobre ele. No instante t_0 aplicamos uma força que resulta em uma tensão σ_1. Como resultado o sólido se deforma em $\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$, onde E é o módulo de rigidez do sólido. Enquanto este valor de tensão permanecer constante, a deformação também permanecerá constante. No instante t_f diminuímos a força, reduzindo a tensão aplicada a zero. O sólido retorna à sua forma original. Como discutido anteriormente, a deformação elástica é reversível e portanto não dissipa energia durante o experimento.

O caso inverso ocorre tipicamente quando aplicamos um esforço a um fluido. Intuitivamente sabemos que o fluido imediatamente começa a escoar. O experimento imaginário descrito no parágrafo anterior pode ser repetido neste caso e o resultado encontra-se na Figura 2.2. Durante o intervalo de tempo $t_0 - t_f$ o fluido escoa a uma taxa de deformação constante e após o término do carregamento o fluido não retorna à forma original. Desta forma a deformação não é reversível e portanto a energia é dissipada durante o processo de deformação. O comportamento esquematizado na figura 2.2 é denominado "fluxo viscoso".

O fluxo viscoso pode ser definido matematicamente por uma relação entre a tensão de cizalhamento τ e a taxa de deformação angular $\dot{\gamma}$, devida a Newton:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \tag{2.1}$$

Na expressão acima a constante η é denominada "viscosidade" do fluido, e possui a unidade de $[Pa.s]$. Apesar do experimento ter sido definido para "fluidos" (ou seja, líquidos), este comportamento pode ser observado em sólidos amorfos (ou seja, vidros, polímeros e metais amorfos).

No caso mais geral um comportamento intermediário entre o comportamento elástico e o fluxo viscoso pode ser observado para uma temperatura suficientemente alta. Ou seja,

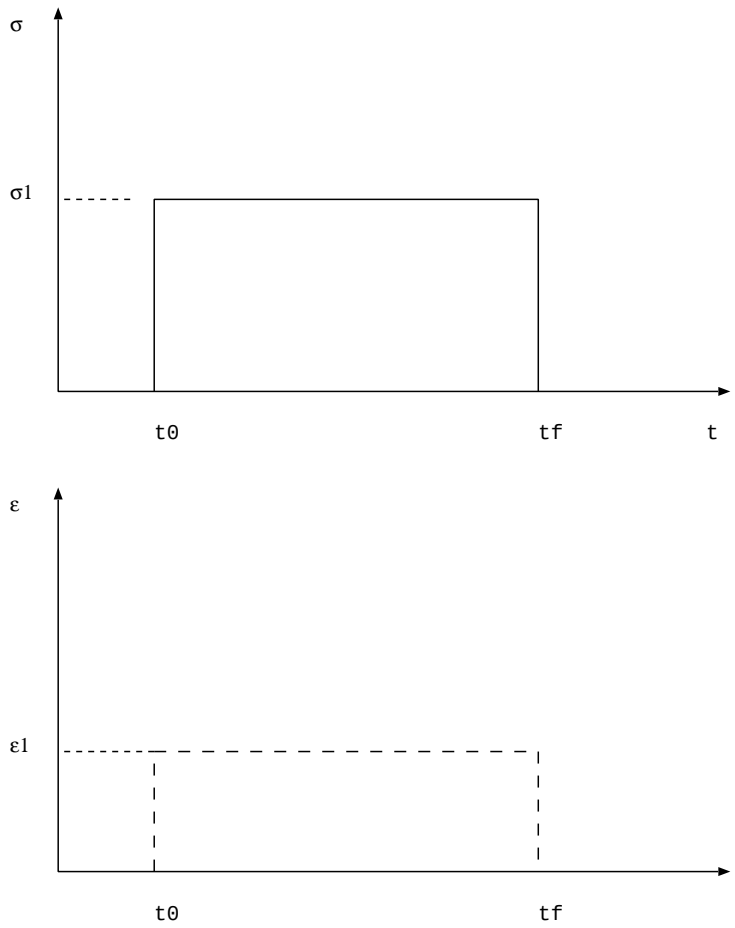


Figura 2.1: Experimento imaginário em um material que apresenta comportamento elástico

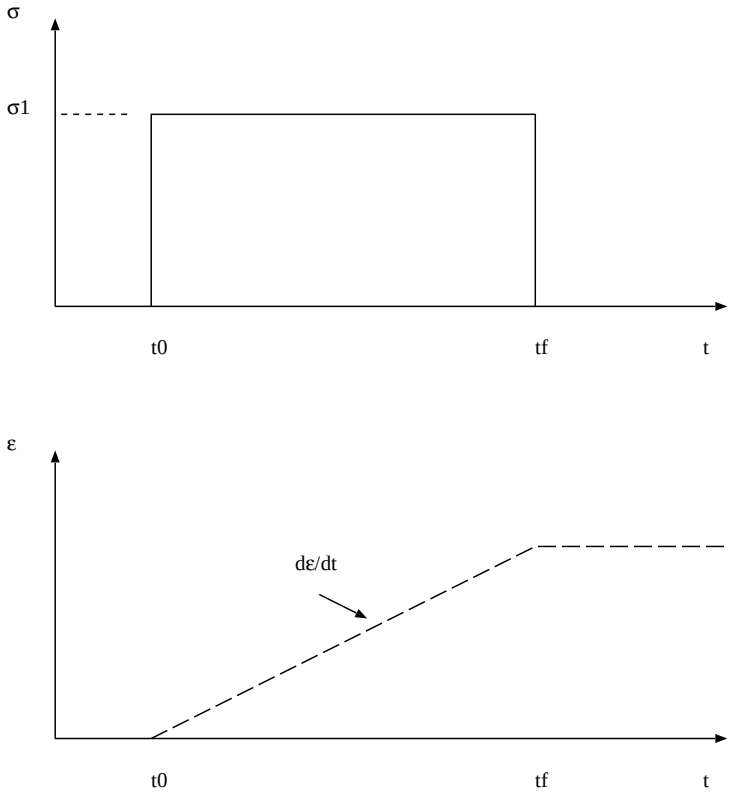


Figura 2.2: Experimento imaginário em um líquido

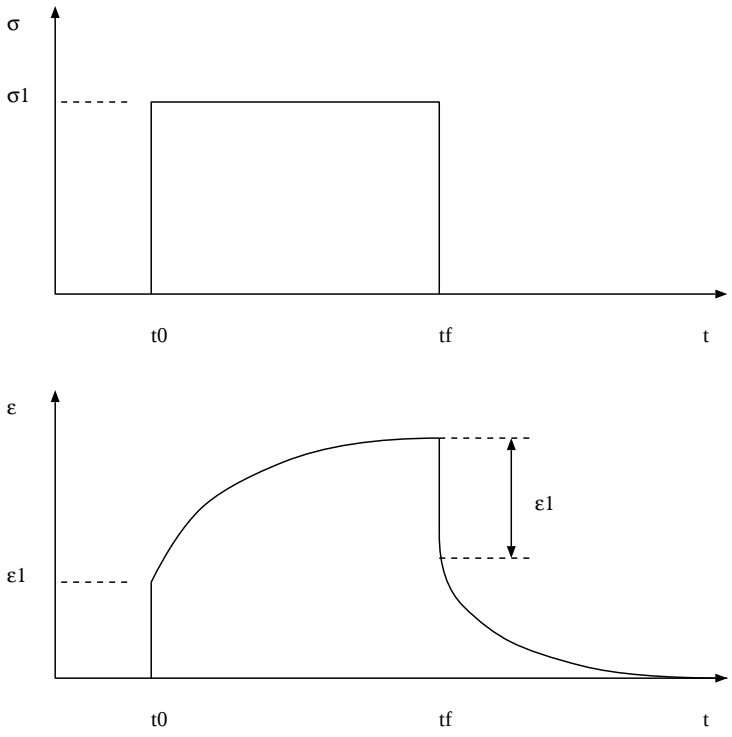


Figura 2.3: Experimento imaginário em um material que apresenta comportamento elástico

parte da deformação se dá de acordo com o regime elástico e parte ocorre de acordo com um comportamento viscoso. Certos polímeros apresentam ainda um comportamento particular, denominado comportamento visco-elástico. A Figura 2.3 representa o resultado do experimento imaginário usado anteriormente em um sólido visco-elástico. Nota-se que a deformação é reversível, como no caso da deformação elástica, mas neste caso parte da energia é dissipada durante a deformação.

2.2 Efeito da temperatura sobre os parâmetros de deformação plástica

Como mencionado anteriormente, a elevação da temperatura promove o aumento da movimetação relativa dos átomos e moléculas em um sólido. Em outras palavras, o aumento da temperatura implica num aumento da mobilidade das discordâncias, num deslizamento mais fácil das macro-moléculas ou ainda na ativação de mecanismos de deformação que dependem de difusão (como por exemplo, ascensão de discordâncias). Todos estes mecanismos contribuem para uma diminuição do limite de escoamento do material. Da mesma forma, a maior facilidade de ativação dos mecanismos de deformação plástica irá contribuir para uma maior ductilidade do material. Desta forma pode-se

concluir que *em geral* um aumento de temperatura promove uma diminuição do limite de escoamento e um aumento do alongamento para fratura do material. Este efeito é empregado em quase todos os processos de conformação mecânica de materiais metálicos, de materiais poliméricos ou mesmo de vidros cerâmicos (como no caso de vidros de sílica).

Como um exemplo, a Figura 2.4 mostra a variação do limite de escoamento e do alongamento para fratura de um alumínio comercialmente puro em função da temperatura em ensaios de tração realizados a diferentes temperaturas. Nota-se por exemplo uma redução de σ_e de 30 MPa (à temperatura ambiente) para cerca de 15 MPa a 300 ^oC, o alongamento a fratura cresce respectivamente de 40% a 80% nas mesmas temperaturas.

2.3 Fluência

2.3.1 Temperatura homóloga

A noção de "alta temperatura", usada muito livremente até o momento depende naturalmente do material que está sendo discutido. Por exemplo, 500 ^oC pode ser ao mesmo tempo uma temperatura relativamente baixa para o nióbio, que se funde a 2477 ^oC, e uma temperatura relativamente alta para o alumínio, que se funde a 660 ^oC. Define-se a temperatura homóloga (τ_H) de um material como sendo a razão entre a temperatura (T) do mesmo e a sua temperatura de fusão (T_F), ambas em Kelvin:

$$\tau_H = \frac{T}{T_F} \tag{2.2}$$

Esta quantidade permite apresentar a temperatura em uma escala única para todos os materiais. Experimentalmente observa-se que fenômenos ligados à difusão (como por exemplo a ascensão de discordâncias) começam a ter efeitos macroscópicos nos materiais para temperaturas homólogas acima de $\tau_H = 0,4$. Nos exemplos citados anteriormente teríamos portanto para o nióbio $\tau_H = \frac{873}{2750} = 0,31$ e para o alumínio $\tau_H = \frac{873}{933} = 0,94$, justificando portanto a afirmação feita acima sobre os dois materiais.

2.3.2 Fenomenologia da Fluência

A fluência é um fenômeno que afeta todas as classes de materais quando processos ligados à difusão começam a ter efeitos macroscópicos (portanto, acima de $\tau_H = 0,4$). A fluência é observada como uma deformação dependente do tempo em materiais submetidos a uma tensão constante (compare com o caso do fluxo viscoso descrito anteriormente). O aparato experimental usado para estudar a fluência em materiais encontra-se esquematizado na Figura 2.5. Ele consiste essencialmente em uma máquina de tração simplificada que aplica uma tensão (de engenharia ou real) constante e um forno que mantem a temperatura da amostra em um valor elevado e constante.

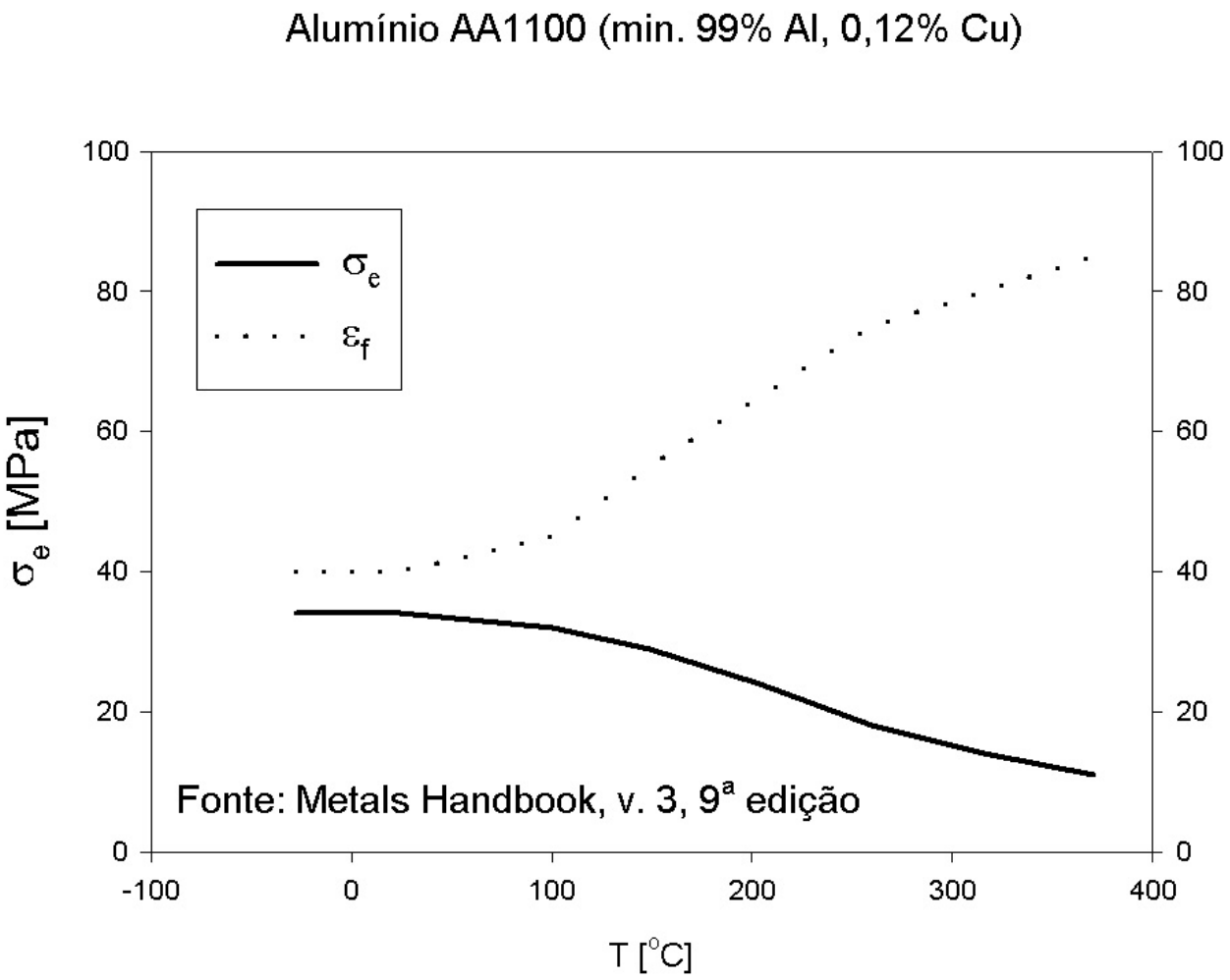


Figura 2.4: Exemplo do efeito da temperatura sobre o limite de escoamento e alongamento para fratura de um alumínio comercialmente puro

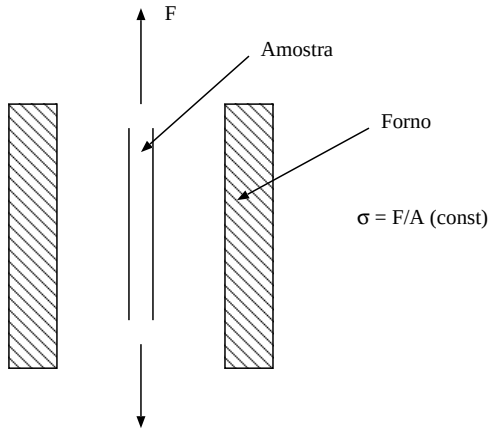


Figura 2.5: Aparato experimental típico para o estudo da fluência

O resultado típico obtido em um ensaio de fluência encontra-se esquematizado na Figura 2.6, que mostra a deformação do corpo de prova em função do tempo de ensaio. Inicialmente o corpo de prova sofre uma deformação instantânea (ϵ_1), correspondente à parcela elástica do processo. Imediatamente após a aplicação da carga, a deformação viscosa inicia-se com uma taxa de deformação elevada, mas que decresce continuamente. Este estágio, conhecido como estágio I da fluência ou ainda *regime transiente*, é caracterizado por um encruamento crescente que se opõe aos processos difusivos que promovem a deformação viscosa. Após um certo tempo forma-se um balanço entre o encruamento devido à deformação e a taxa dos processos difusivos, assim a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}_{min}$) medida reduz-se para a taxa mínima de todo o ensaio e permanece constante por um longo período de tempo. O estágio II definido como a região da curva para a qual a taxa de deformação é mínima também recebe o nome de *regime estacionário* e corresponde à maior parcela da vida útil de um componente sujeito à fluência. Ao final do estágio II outros processos passam a ser ativados (como por exemplo a formação de cavidades no interior do material, também chamada de *cavitação*) resultando em um incremento da taxa de deformação. Este estágio, conhecido como estágio III ou ainda *estágio terciário* precede a ruptura do corpo de prova, que ocorre no tempo t_f, também chamado tempo para fratura (em fluência). Os parâmetros $\dot{\epsilon}_{min}$ e t_f caracterizam a resistência à fluência de um material. Quanto menor o valor de $\dot{\epsilon}_{min}$ (alternativamente, quanto maior o valor de t_f) mais resistente é o material à fluência.

A fluência de um material é fundamentalmente influenciada pela temperatura (T) do processo e pela tensão aplicada (σ). A Figura 2.7 representa esquematicamente três amostras de um mesmo material submetidas a temperaturas (ou alternativamente a tensões) diferentes.

Analisemos primeiramente o efeito da temperatura sobre a fluência a uma tensão constante σ. Na representação esquemática da figura 2.7 teríamos $T_1 < T_2 < T_3$ (onde T_i é a temperatura correspondente à curva i). Vemos pela análise das curvas que teremos $(\dot{\epsilon}_{min})_1 < (\dot{\epsilon}_{min})_2 < (\dot{\epsilon}_{min})_3$ e $(t_f)_1 > (t_f)_2 > (t_f)_3$. Em outras palavras um aumento da

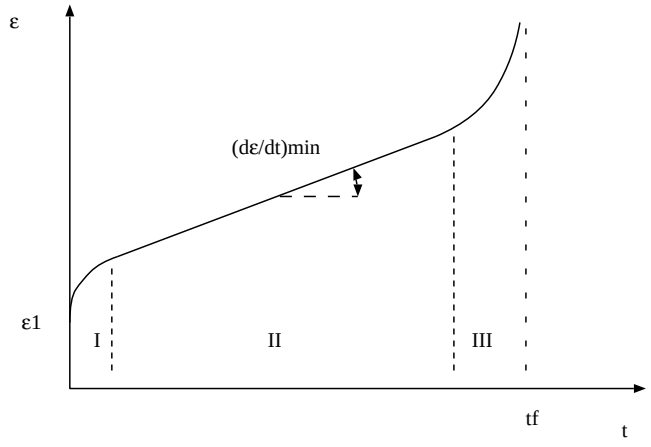


Figura 2.6: Resultado típico de um ensaio de fluência

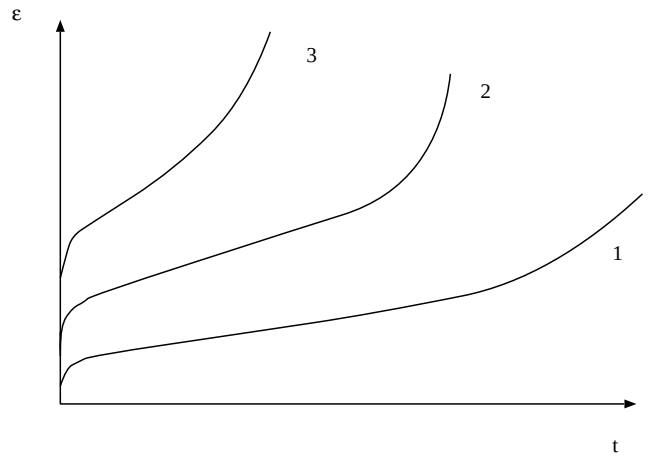


Figura 2.7: Representação esquemática do efeito da temperatura (ou da tensão) sobre a fluência de um material

temperatura diminui a resistência à fluência de um material.

De maneira similar, assumindo temperatura constante e tensões variáveis teríamos, na representação da figura 2.7: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. Similarmente ao aumento da temperatura, um aumento da tensão aplicada a temperatura constante implica em $(\dot{\epsilon}_{min})_1 < (\dot{\epsilon}_{min})_2 < (\dot{\epsilon}_{min})_3$ e $(t_f)_1 > (t_f)_2 > (t_f)_3$ e portanto em uma redução da resistência à fluência do material.

Outros fatores podem influenciar a resistência à fluência de materiais, alguns dos mais importantes são:

1. Complexidade da estrutura cristalina
2. Presença de partículas na microestrutura
3. Contornos de grão

A complexidade da estrutura cristalina atua dificultando a movimentação das discordâncias e/ou dificultando a difusão. Desta forma, em geral, cerâmicas de alto ponto de fusão (como Al_2O_3, SiC ou Si_3N_4) apresentam maiores resistências à fluência que materiais metálicos.

Particulas não deformáveis (por exemplo, carbonetos em aços inoxidáveis) também contribuem para uma melhoria da resistência à fluência de um material. O mecanismo aqui envolvido é relativamente complexo, necessitando de um tratamento mais aprofundado da fluência. Desta forma ele não será discutido neste texto introdutório.

Os contornos de grão atuam basicamente como fontes ou sorvedouros de lacunas. Desta forma, o aumento do tamanho de grão implica em uma **melhora** da resistência à fluência do material (note que o efeito é inverso para o limite de escoamento do material!). É interessante notar que nem todos o contornos de grão do material contribuem igualmente para a fluência do material. Experimentalmente observa-se que os contornos de grão paralelos à direção de aplicação da tensão contribuem menos que os demais. Desta forma se conseguirmos eliminar todos os contornos de grão que não sejam paralelos á direçaõ da tensão de um material, iremos aumentar sua resistência à fluência. A Figura 2.8 representa uma aplicação deste princípio[2]. Ela mostra uma palheta de turbina de avião a jato que foi produzida por solidificação direcional (i.e. a solidificação é feita de tal forma que os grão crescem apenas em uma direção, no presente caso a direção radial que sofrerá a ação da força centrífuga quando a turbina estiver em operação). Os grãos alinhados podem inclusive ser divisados na própria foto (pelo contraste claro-escuro).

O mecanismo pode inclusive ser extendido ainda mais, eliminando-se totalmente os contornos de grão do material (i.e. produzindo-se um monocristal). A Figura 2.9 mostra uma palheta de turbina solidificada de tal forma a se tornar monocristalina. Isto é obtido pelo canal de solidificação em forma de espiral que permite apenas a um grão crescer na amostra solidificada.

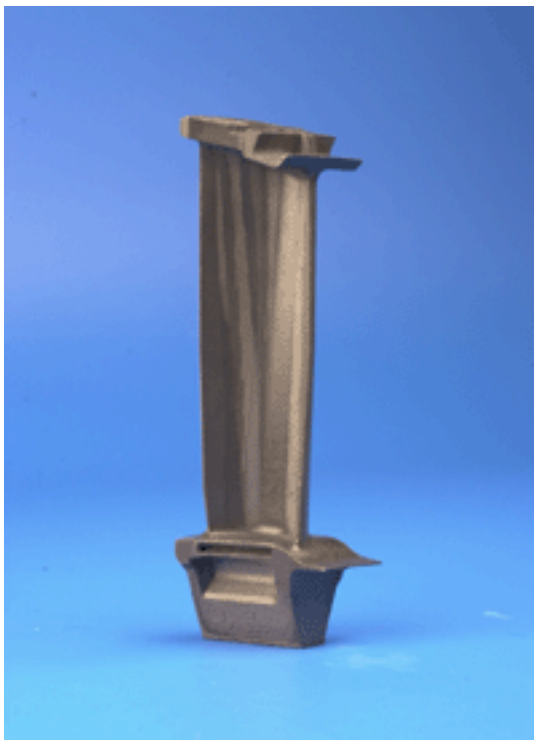


Figura 2.8: Palheta de turbina de avião solidificada direcionalmente com o objetivo de se eliminar os contornos de grão que não são paralelos à direção da aplicação da tensão (que neste tipo de aplicação é gerada pela força centrífiga).

Figura 2.9: Palheta de turbina de avião solidificada de forma a produzir um monocristal. O canal de solidificação em espiral (parte inferior da figura) permite que apenas um grão cresça na amostra solidificada.

3 Efeito da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico

3.1 Velocidade dos processos de deformação plástica

A deformação plástica ocorre por processos individuais (como deslizamento de discordâncias, maclação, deslizamento de macro-moléculas etc...). Estes processos não ocorrem instantaneamente (i.e. com velocidade infinita), mas sim precisam de um certo intervalo de tempo para se completar. Podemos obter uma estimativa grosseira da velocidade dos processos de deformação plástica considerando o caso de deslizamento de discordâncias. Partimos do princípio (baseado em evidências experimentais) de que a máxima velocidade de deslizamento de uma discordância é da ordem da velocidade do som no material. Para o aço temos uma velocidade do som da ordem de 5000 m/s. A distância que a discordância deve percorrer durante o deslizamento é o módulo do vetor de Burgers, ou algo por volta de 0,5 $nm = 5 \times 10^{-10}$ m. Desta forma o intervalo de tempo envolvido no deslizamento de uma discordância é da ordem de, no mínimo, $10^{-7}s$, ou ainda $0,1\mu s$. A taxa (ou seja, a velocidade) de deformação plástica terá portanto um efeito sensível sobre o comportamento mecânico de um material e este efeito será tão mais notável quanto maior for este intervalo de tempo envolvido no processo individual de deformação plástica.

Para um material metálico dúctil típico, a resposta do material a um aumento de taxa de deformação é a esquematizada na Figura 3.1. O aumento da taxa de deformação é acompanhado de um aumento da resistência mecânica do componente. Matematicamente este incremento de resistência mecânica ($\Delta\sigma$) pode ser descrito em função do incremento de taxa de deformação ($\Delta\dot{\epsilon}$) por:

$$\Delta\sigma \propto (\Delta\dot{\epsilon})^m \tag{3.1}$$

Na expressão acima o expoente m é denominado "expoente de sensibilidade à taxa de deformação" (strain rate sensitivity exponent).

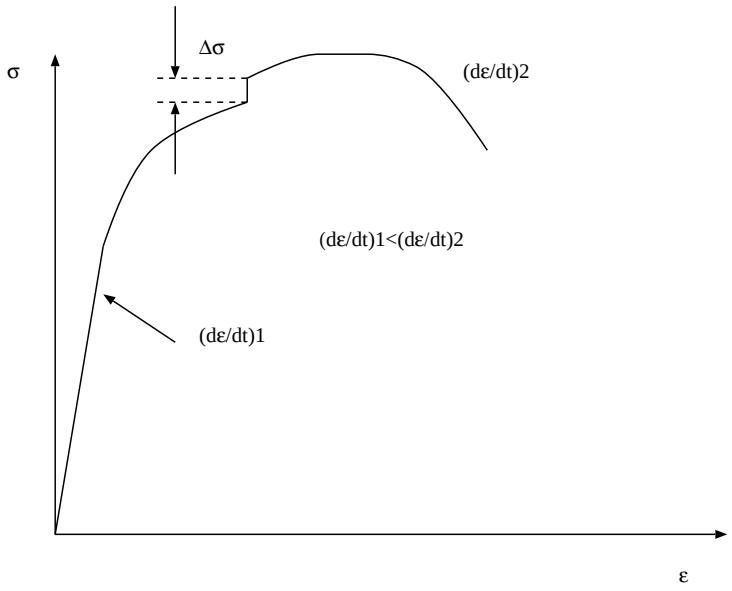


Figura 3.1: Efeito esquemático do aumento da taxa de deformação durante um ensaio de tração. O aumento da taxa de deformação é acompanhado de um aumento da resistência mecânica.

3.2 Esforços de impacto

Até o momento assumimos implicitamente que o componente em estudo está sendo submetido a uma tensão constante (solicitação estática) ou que a tensão cresce lentamente (solicitação quase-estática, como em um ensaio de tração). Na engenharia encontramos, entretanto, casos em que o esforço mecânico é aplicado na forma de altas cargas em um intervalo de tempo muito curto. Estes esforços são ditos de impacto. Exemplos de solicitações de impacto encontradas na engenharia são quedas, colisões, acelerações bruscas entre outras. Disto já fica claro que esforços de impacto freqüentemente estão associados a acidentes de percurso.

As taxas de deformação observadas em ensaios quase-estáticos são tipicamente da ordem de 10^{-5} a 10^{-1} $[s^{-1}]$. O último valor, tipico do limite máximo que pode ser imposto por uma máquina de tração típica já é relativamente elevado: 10% por segundo. Taxas de deformação em esforços de impacto são ainda mais altas, da ordem de 10^2 a 10^3 $[s^{-1}]$.

A resposta do material a esforços de impacto geralmente é muito diferente da resposta obtida em ensaios quase-estáticos como o ensaio de tração. Desta forma necessitamos de uma metodologia padronizada para avaliar estas respostas. Isto é feito com o auxílio dos ensaios de impacto.

3.2.1 Ensaio de Pêndulo de Impacto

O primeiro ensaio de impacto que será visto aqui é o ensaio de pêndulo de impacto. Existem duas modalidades deste ensaio, denominadas ensaio Charpy e ensaio Izod. Elas diferem fundamentalmente pela geometria do corpo de prova (o corpo de prova Charpy tem um entalhe simétrico central, o corpo de prova Izod tem um entalhe assimétrico), pela forma como o corpo de prova é fixado na máquina (o corpo de prova Izod é fixo em um mandril, o corpo de prova Charpy é livre para se movimentar), pelo ponto de aplicação da carga (no ensaio Charpy a carga é aplicada na face oposta à do entalhe, no ensaio Izod a carga é aplicada na mesma face do entalhe) e pela aplicabilidade (o ensaio Charpy é fundamentalmente utilizado no caso de materiais metálicos, enquanto que o ensaio Izod é empregado no caso de materiais poliméricos). Apesar destas diferenças, os dois ensaios podem ser executados numa mesma máquina, chamada pêndulo de impacto. A Figura 3.2 mostra dois exemplos, um pêndulo de menor capacidade, usado para ensaiar polímeros e um pêndulo de maior capacidade para ensaioi de materiais metálicos. A Figura 3.3 mostra um detalhe do corpo de prova Izod, fixo na máquina de ensaio. O pêndulo (à direita na figura) irá atingir o corpo de prova em sua parte superior, alguns centímetros acima do entalhe (que fica no nível da máquina).

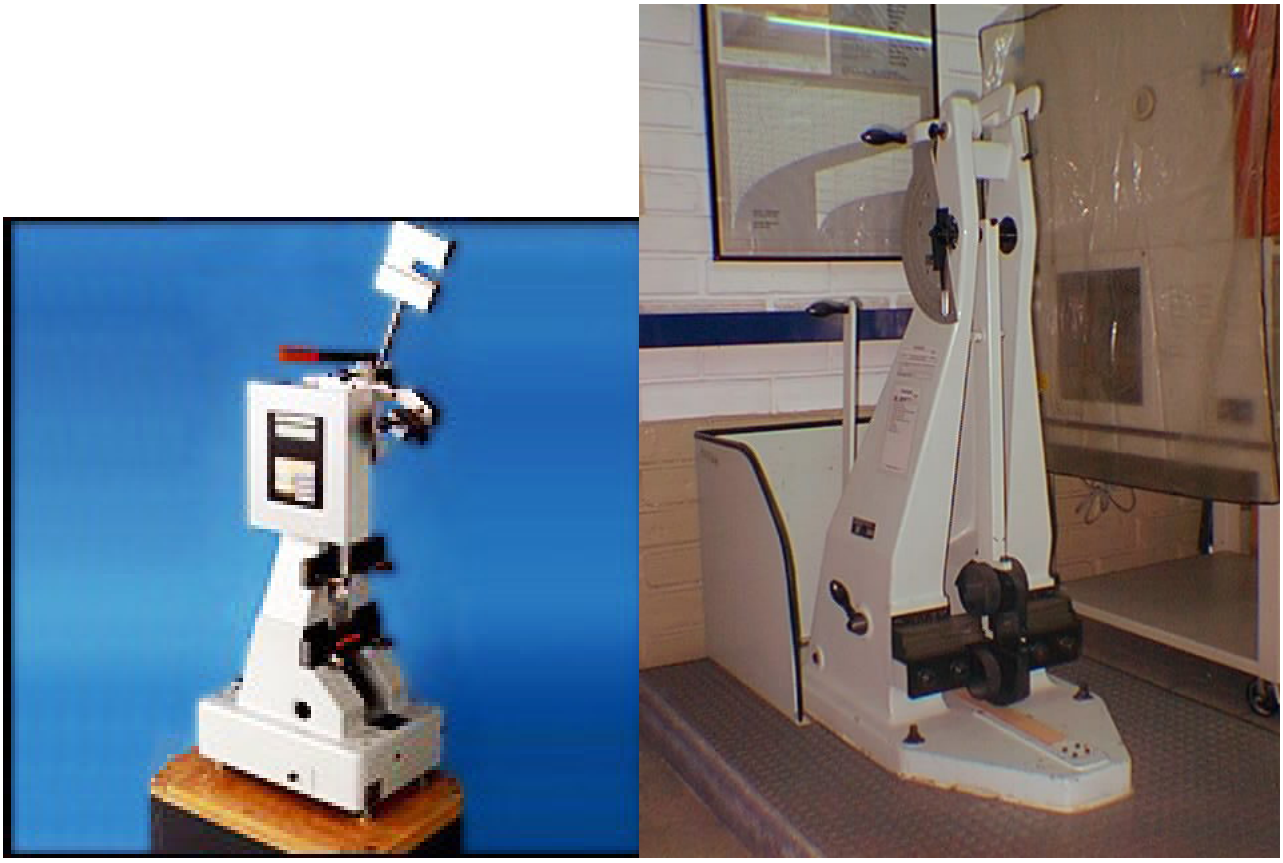
O princípio do ensaio de pêndulo é razoavelmente simples (Figura 3.4). O pêndulo, que possui uma massa m_p é elevado até uma altura h_1 adquirindo energia potencial $E_1 = m_p g h_1$ (onde g é a aceleração da gravidade). O pêndulo então é liberado e colide com o corpo de prova no ponto mais baixo de sua tragetória (onde toda a energia potencial se transformou em energia cinética). Como resultado do impacto resultante o corpo de prova se fratura. Parte da energia do pêndulo é consumida neste processo na forma de um trabalho necessário para fraturar o corpo de prova, desta forma o pêndulo não retorna mais à altura original, mas sim a uma altura mais baixa, h_2. O trabalho realizado sobre o sistema (corpo de prova) para fratura W_f pode então ser calculado como:

$$W_f = m_p g(h_1 - h_2) \tag{3.2}$$

O trabalho de fratura corresponde fundamentalmente ao trabalho gasto na deformação plástica da amostra, análogo portanto ao conceito de tenacidade discutido durante a análise da curva tensão-deformação. A identificação das duas quantidades, entretanto, não é conveniente por dois motivos principais:

1. O ensaio de impacto envolve taxas de deformação muito maiores (pelo menos quatro ordens de grandeza maiores) que no caso dos ensaios quase-estáticos. A resposta mecânica do componente é, portanto, muito diferente.

2. Existe uma outra propriedade mecânica usada na engenharia e que recebe o nome de tenacidade à fratura e é medida por um procedimento totalmente diferente (e não será vista nesta disciplina). Usualmente denominar o trabalho de fratura "tenacidade" gera confusão.



(a) (b)

Figura 3.2: Exemplos de pêndulos de impacto - (a) Pêndulo de menor capacidade para ensaio de polímeros com leitura digital, (b) Pêndulo de maior capacidade para ensaio de materiais metálicos com leitura analógica.

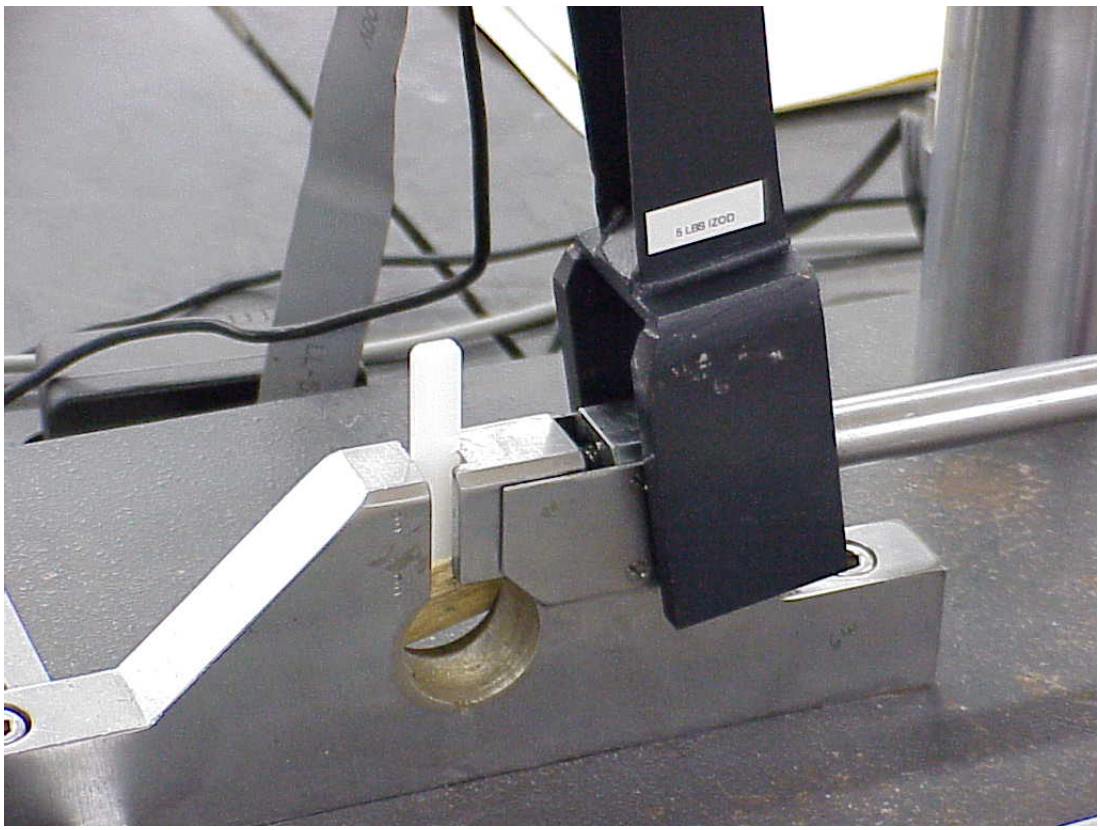


Figura 3.3: Detalhe de um ensaio Izod. O corpo de prova polimérico é fixo em um mandril. O pêndulo (à direita na figura) irá atingir o corpo de prova pouco acima do entalhe.

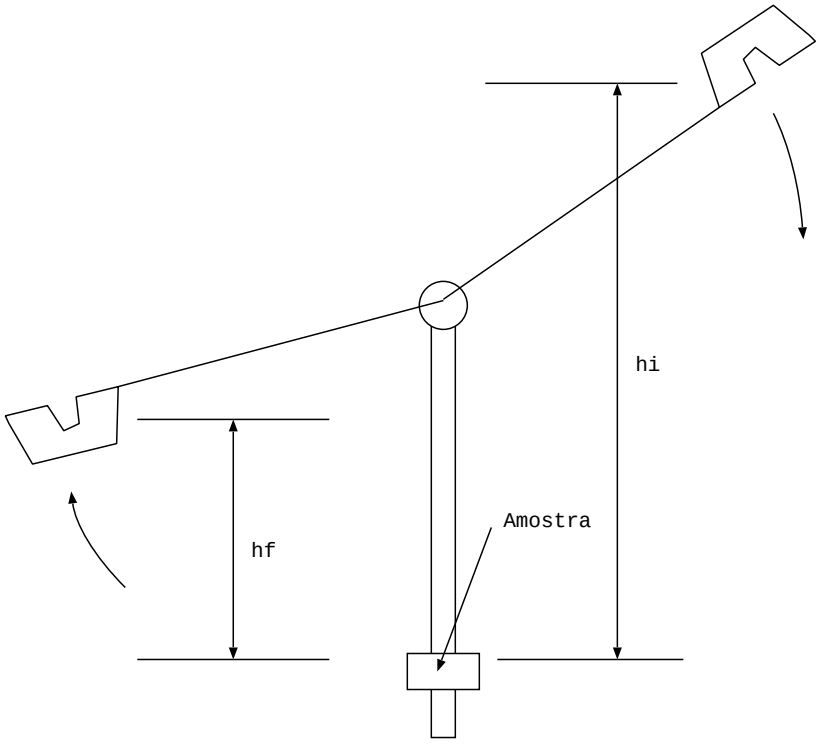


Figura 3.4: Representação esquemática do princípio do ensaio do pêndulo de impacto

Desta forma adota-se nesta disciplina o termo trabalho de fratura para a quantidade W_f. Além de "tenacidade" a literatura também se refere a esta quantidade como "energia de fratura". Este último termo é aceitável (no sentido de que todo o trabalho realizado sobre o sistema corresponde a uma energia consumida), porém deve ser evitado.

3.2.1.1 Transição dúctil-frágil

Para uma ampla gama de materias metálicos, cerâmicos e poliméricos pode-se observar uma transição entre um comportamento frágil de baixas temperaturas, associado a baixos valores do trabalho de fratura, e um comportamento dúctil de altas temperaturas, associado a altos valores de trabalho de fratura. Este comportamente recebe o nome de *transição dúctil-frágil*. A temperatura onde ocorre a transição é chamada de temperatura da transição dúctil-frágil (brittle-ductile transition temperature, BDTT), sendo denotada por T_C neste trabalho. Ela pode ser medida por uma série de ensaios de pêndulo de impacto variando-se a temperatura do corpo de prova. No caso de materiais metálicos e poliméricos T_C é alguma temperatura por volta da temperatura ambiente, no caso de materiais cerâmicos a temperatura é alta e ocorre devido à ativação de processos de deformação plástica vinculados, entre outras coisas, à fluência.

Livros-texto costumam representar a transição dúctil-frágil na forma da Figura 3.5. É preciso mencionar, entretanto, que em alguns casos a transição não é tão nítida quanto representado. Outros problemas se refere à dependência da curva de trabalho de fratura nas características geométricas do corpo de prova utilizado (por exemplo, na geometria do entalhe) e o critério utilizado para a própria definição de T_C[1]. Tendo em vista que as condições às quais o material é submetido durante o ensaio de pêndulo e no seu uso como componente de engenharia diferem, a temperatura de transição não corresponderá a um critério conveniente para o desenvolvimento de projetos de engenharia em situações onde o comportamento frágil possa ser observado. Veremos mais adiante que um critério de projeto mais conveniente e reprodutível pode ser definido a partir de um ensaio de impacto alternativo ao do pêndulo.

Apesar destes problemas relacionados à definição de T_C, o ensaio de pêndulo de impacto e a caracterização da transição dúctil-frágil atravéz do mesmo é muito útil na engenharia, pois permite a comparação da ductilidade relativa de dois materiais por meio de um ensaio padronizado permitindo, por exemplo, estudar o efeito de variáveis de processamento sobre a transição.

No caso de materiais metálicos a transição dúctil-frágil é observada em materiais com estruturas CCC e HC. Materiais com estrutura CFC apresentam geralmente elevada ductilidade mesmo a baixas temperaturas e não se observa uma tansição dúctil-frágil nestes casos.

[1] Existem varios critérios adotados na engenharia para definição de T_C. Um deles a associa ao ponto de inflexão da curva, outro à temperatura correspondente ao valor médio do trabalho de fratura medido no patamar dúctil e o medido no patamar frágil, um terceiro ainda estabelece um valor minimo de trabalho de fratura (por exemplo, $W_f = 15[J]$). Cada um destes critérios irá resultar em uma temperatura de transição diferente.

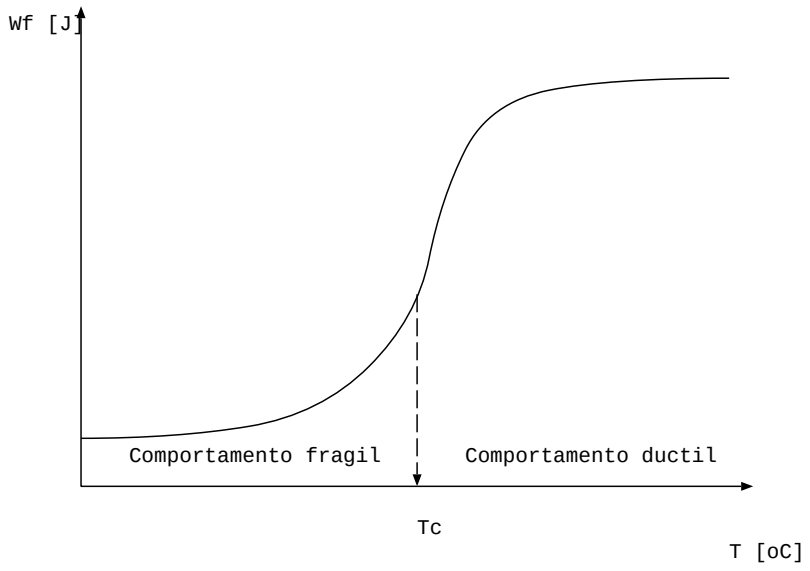


Figura 3.5: Representação esquemática da transição dúctil-frágil em um material metálico.

3.2.2 Ensaio de queda de peso (drop-weigth test)

A Figura 3.6, retirada do catálogo eletrônico de um fabricante de máquinas de ensaio mecânico [3], mostra um aparato típico para a realização do ensaio de impacto por queda de peso (drop-weight test). Como o próprio nome diz, neste ensaio uma massa é lançada em queda livre sobre o corpo de prova de uma altura pré-determinada. Os resultados do ensaio são qualitativos (quebra - não quebra, ou alternativamente deforma - não deforma, trinca - não trinca). Por meio da realização deste teste a várias temperaturas (geralmente em intervalos de $5K$) é possível definir-se a temperatura de transição para ductilidade nula (NDT, nil ductility transition temperature), acima da qual a fratura do corpo de prova não ocorre. Este parâmetro é muito menos sensível às características do corpo de prova e também pode ser definido por um critério preciso. Desta forma a NDT pode ser utilizada como parâmetro de projeto de engenharia para decidir se o material irá apresentar comportamento frágil na temperatura de uso do componente.

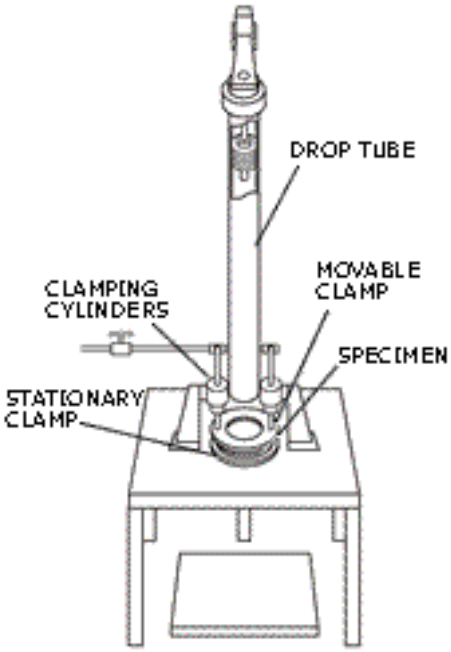


Figura 3.6: Aparato experimental para realização do ensaio de queda de peso[3].

4 Fadiga

Até o momento discutimos a resposta dos materiais a esforços estáticos ou quase-estáticos aplicados em um material. Em ambos os casos a aplicação do esforço ocorre no sentido de aumentar ou diminuir a tensão continuamente. Este tipo de carregamento é chamado de *carregamento monotônico*. Em engenharia, entretatno, freqëntemente encontramos outro tipo de carregamento, onde a tensão aplicada oscila ao redor de um valor médio com uma dada freqüência. Este tipo de carregamento é chamado de *carregamento cíclico* e ocorre por exemplo em eixos, engrenagens, molas, asas de avião entre outros. Nestes casos observa-se uma forma alternativa de degradação da vida útil do material (ou seja, o componente sofre fratura após um determinado tempo de operação) por um fenômeno denominado *fadiga*.

A fadiga é responsável por uma grande parcela dos casos de falha de componentes em serviço. A fadiga freqüentemente está por trás de acidentes graves envolvendo grande número de vítimas fatais (acidentes de trem, quedas de avião). Seu controle representa um problema social relativamente grave. Um dos aspectos mais importantes da fadiga é que ela pode ocorrer mesmo para tensões abaixo do limite de escoamento do material e a possibilidade do ocorrência de fadiga deve ser considerada no projeto de engenharia. A fadiga é observada em todas as classes de materiais, metálicos, cerâmicos, poliméricos e nos mais variados tipos de compósitos.

4.1 Parâmetros da solicitação cíclica

A Figura 4.1 representa esquematicamente um esforço cíclico típico. Na prática, tanto a forma de onda (que neste caso é senoidal), quanto a freqüência, quanto a amplitude da variação de tensão podem variar ao longo do tempo. A forma de onda representada na figura, entretanto, é útil para definir uma série de parâmetros que são usados nas discussões sobre fadiga. Estes parâmetros são:

1. Amplitude de tensão $\sigma_A = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
2. Faixa de tensão $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
3. Tensão máxima σ_{max}

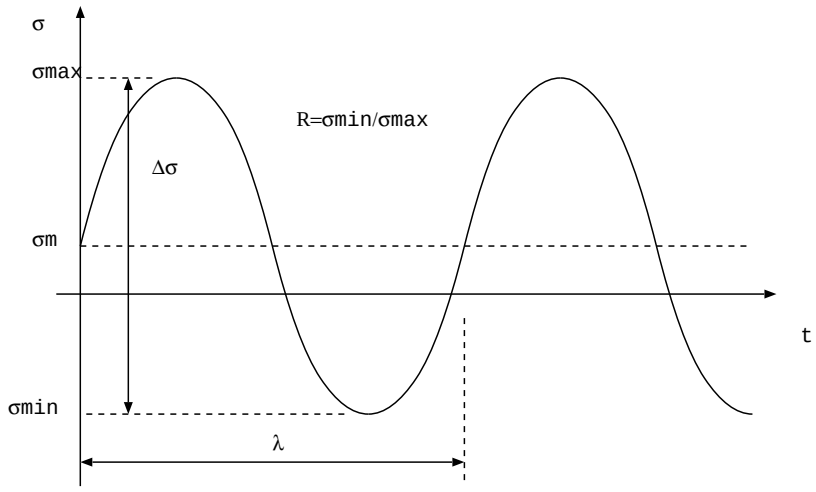


Figura 4.1: Um esforço cíclico típico

4. Tensão mínima σ_{min}
5. Tensão média $\sigma_m = \frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}$
6. Razão de tensões $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Nota-se que quaisquer dois destes parâmetros definem completamente os níveis de tensão no esforço cíclico. Na prática usualmente utiliza-se $\Delta\sigma$ ou σ_A e R. Outro parâmetro definido na figura é o comprimento de onda do esforço cíclico, λ, medido em Hertz ($[Hz] \equiv [s^{-1}]$. Observa-se que o intervalo de tempo decorrido após N ciclos será dado por $\Delta t = N\lambda$.

4.2 Ensaios de Fadiga

A Fadiga é um fenômeno muito complexo, afetado por diversos fatores externos, e atinge componentes de engenharia vitais. Desta forma os ensaios de fadiga devem ser desenhados idealmente de forma a reproduzir as condições de uso destes componentes. No passado (isto é antes da invenção dos aviões) os principais componentes sujeitos à fadiga eram eixos e o principal ensaio utilizado reproduzia este tipo de solicitação. A Figura 4.2 representa esquematicamente um ensaio convencional de fadiga que reproduz as solicitações mecânicas atuantes na ponta de um eixo. Neste ensaio o corpo de prova cilindrico gira em torno de seu eixo e uma força F é aplicada na porta do mesmo. Como resultado cada ponto da superfície do corpo de prova é submetido alternadamente a uma tensão que varia de um máximo em tração para um mínimo em compressão. Este tipo de ensaio, apesar de muito simples, permite apenas ensaiar corpos de prova em ciclos de reversão total (ou seja para $R = -1$). As aplicações de engenharia modernas, por sua

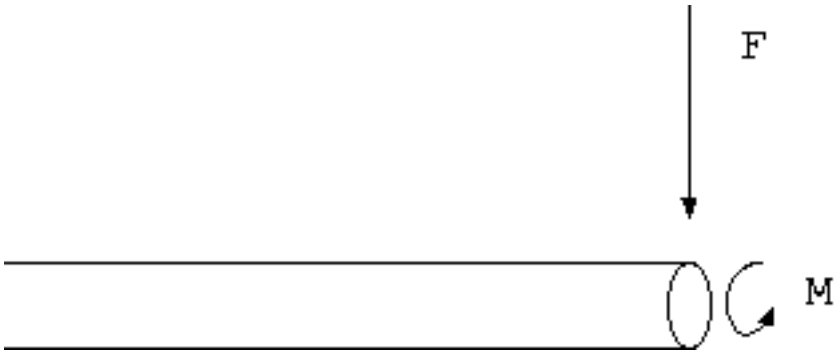


Figura 4.2: Ensaio de fadiga convencional

vez, requerem uma flexibilidade maior. Atualmente os fornecedores de máquinas de ensaio de fadiga trabalham exclusivamente com máquinas servo-hidráulicas (semelhantes às usadas para ensaios convencionais de tração), que permitem obter todo tipo de forma de onda, razão de tensões e até mesmo variar a amplitude de tensão durante o ensaio.

4.3 Curvas S-N

O comportamento a fadiga de um material é descrito na forma de uma curva relacionando o número de ciclos para fratura em função da amplitude de tensão aplicada (para R constante). Esta curva recebe o nome de curva S-N ou curva de Wöhler (segundo o nome do engenheiro alemão que as concebeu).

A Figura 4.3 representa a curva S-N típica de um material convencional. Observamos que o número de ciclos para a fratura decresce continuamente conforme a amplitude de tensão é aumentada. Por razões práticas definimos o valor de amplitude de tensão correspondente a 10^7 ciclos para falha como sendo o limite de fadiga do material (σ_L, endurance limit). Nos casos gerais este número de ciclos corresponde a um tempo suficientemente longo para que os efeitos da fadiga possam ser desprezados no projeto.

Aços carbono, entretanto, apresentam um comportamento anômalo com relação à fadiga: eles apresentam um limite de fadiga natural, ou seja, uma amplitude de tensão abaixo da qual não se observa a ruptura em fadiga em um tempo rezoável. Este tipo de comportamento está esquematizado na Figura 4.4.

Como já mencionado anteriormente a fadiga é um fenômeno extremamente complexo e está longe de ser inteiramente compreendido pela ciência dos materiais. Em um texto introdutório como este é impossível cobrir as causas do fenômeno. Mesmo assim a engenharia possui deiversas ferramentas para tratar do problema da fadiga e para considerar este efeito na elaboração de projetos. A principal prova disto é que quedas de avião provocadas por fadiga são eventos extremamente raros. Esta confiabilidade de projeto, entretanto, é obtida por uma combinação de seleção de material, de técnicas de inspeção e de manutenção.

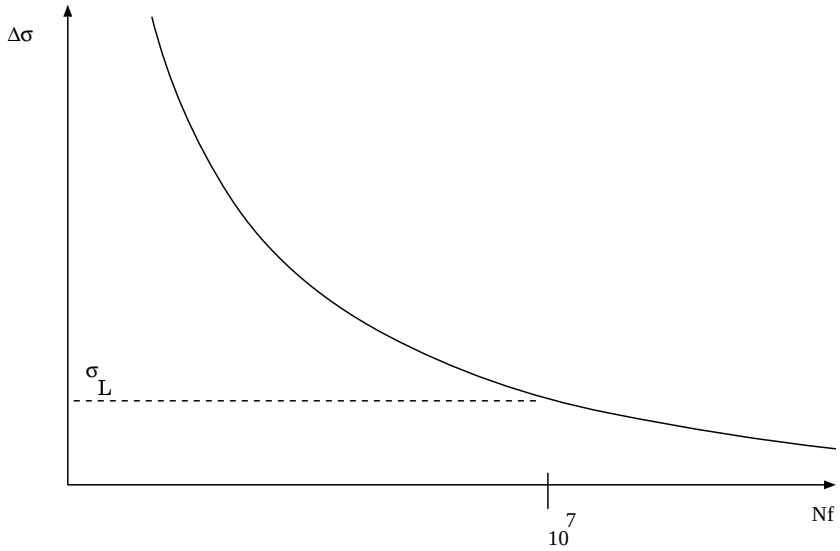


Figura 4.3: Curva S-N típica de um material convencional

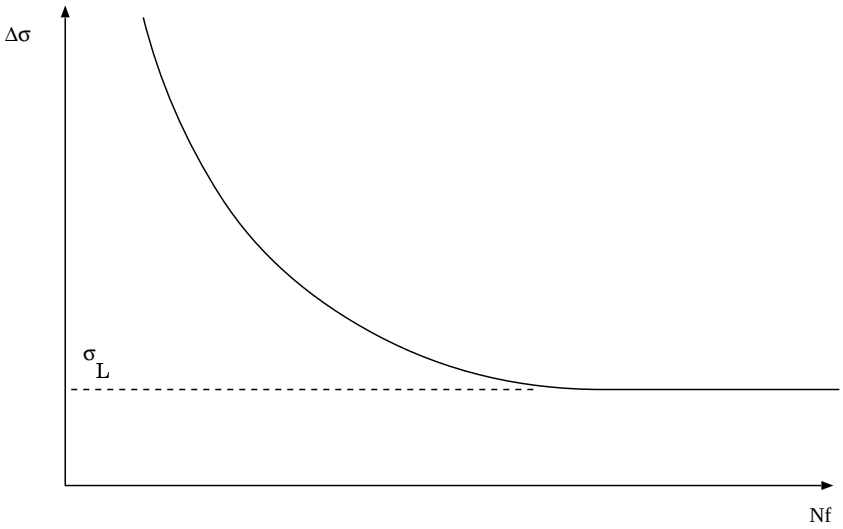


Figura 4.4: Curva S-N típica de um aço carbono

Referências Bibliográficas

[1] C. G. Schon, Introdução ao comportamento mecânico dos materiais, apostila, Depto. Enga. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2001).

[2] H. K. D. H. Badeshia, Metals and alloys: Slides, $< url = http : //www.msm.cam.ac.uk/phase - trans/2001/slides.IB/photo.html >$ acessado em 11/10 (2002).

[3] I. C. Headquarters, Types of impact test, $< url = http : //www.instron.com/impact/impact_type_tests.asp >$ acessado em 15/10 (2002).