

CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Um dos primeiros aspectos a serem considerados em qualquer projeto estrutural é a tensão que leva o material à falha, ou ao colapso. Como primeira aproximação a tensão limite de escoamento, no caso de materiais dúteis, ou a tensão limite de resistência, para os materiais frágeis, é usada como referência para comparação com as tensões que solicitam o material, devido às cargas externas. Por outro lado, a partir do ensaio estático de tração, por meio de uma análise mais detalhada, é possível obtermos informações de grande valia para uso com modelos que permitem prever tanto a falha estática como a falha devida a cargas dinâmicas, como é o caso de uma falha por fadiga. Este Capítulo preocupa-se em analisar em detalhes, embora não exaustivamente, alguns ensaios que são comumente realizados com materiais metálicos. Inicialmente é discutido o ensaio de tração, ao qual é dada uma atenção particular, com um detalhamento da curva tensão-deformação, tanto a convencional, como a curva real. Além do ensaio de tração, é visto ainda o ensaio de impacto, com corpos de prova do tipo Charpy. Estes ensaios fornecem informações bastante valiosas, indicativas quanto ao comportamento mecânico do material, que são utilizadas mais à frente no texto.

3.1 - GENERALIDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio mais simples que é normalmente feito é o de tração, sobre um corpo de prova de seção, em geral, circular ou retangular, dependendo do produto metalúrgico de onde o corpo de prova foi retirado. O ensaio de tração fornece uma repetibilidade de resultados bastante boa, sendo desta forma um ensaio usado para testar a uniformidade de produção de um material. Outra possibilidade é o uso do ensaio de tração para levantar dados característicos do material, fundamentais para a análise do seu comportamento mecânico. Esta aplicação é que será desenvolvida nesta e nas seções seguintes.

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força, logicamente de tração, coincidente com o eixo do corpo de prova, medindo-se simultaneamente, durante o ensaio, a força aplicada e a deformação que o material sofre, devida à ação da carga. Um cuidado importante que devemos ter é no que diz respeito à colinearidade do eixo do corpo de prova com a linha de ação da força, pois qualquer excentricidade provoca um efeito de flexão que se sobrepõe à tração, mascarando os resultados finais, indicando, por exemplo, um baixo módulo de elasticidade e uma baixa tensão limite de escoamento. No caso de um corpo de prova circular, uma excentricidade de 1% leva a um aumento de tensão no material de 6%.

A força aplicada é medida por um dinamômetro calibrado que, dependendo do tipo da máquina de ensaio, pode ser baseado nos mais diferentes princípios. Como o objetivo aqui não é o de descrever o equipamento e mais o de analisar os resultados, não vamos nos deter nestes aspectos. Quanto à deformação que o material sofre, esta é medida normalmente pelo deslocamento relativo entre dois pontos de referência, previamente marcados, na seção útil do corpo de prova. A medida deste deslocamento pode ser feita por um processo mecânico, com a necessidade de fazermos a leitura do deslocamento a cada incremento de carga, ou então de uma forma eletroeletrônica, permitindo o traçado da curva força-deslocamento simultaneamente com o ensaio, em um plotter acoplado à máquina de ensaio. O comprimento padrão, que é a distância que separa os dois pontos de referência, é uma característica do extensômetro usado. Este tipo de extensômetro é denominado de extensômetro axial, pois mede a deformação que o material sofre ao longo do seu eixo longitudinal.

Com a aplicação de carga o material alonga-se, na direção da força, e pelo efeito de Poisson, sofre também uma redução na seção transversal, diminuindo o diâmetro, no caso de uma seção transversal circular. Deste modo, uma outra forma de medirmos a deformação pode ser feita através da medida da variação de diâmetro. Este processo é necessário quando o corpo de prova é de diâmetro variável, ou quando o comprimento da parte útil é muito pequeno, não permitindo a instalação de um extensômetro axial convencional. O extensômetro que trabalha desta forma é denominado de extensômetro diametral, já que mede a variação de diâmetro.

A figura 3.1 mostra um esquema de um corpo de prova cilíndrico sendo monitorado por um extensômetro axial e um extensômetro

diametral, quando submetido a uma força trativa, bem como um gráfico mostrando resultados típicos de um ensaio de um material metálico.

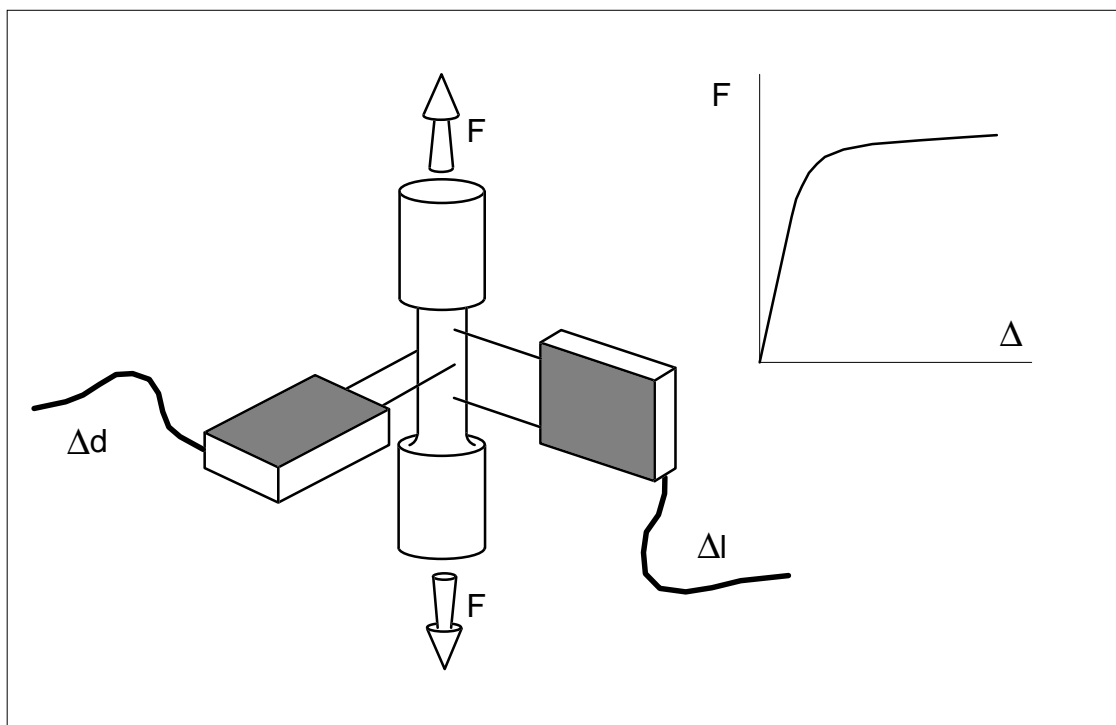


Figura 3.1 - Corpo de prova com extensômetros instalados.

A figura 3.2 ilustra uma curva típica de um ensaio de tração de um material metálico, onde estão registrados os valores da força aplicada, F , e do deslocamento relativo Δl , entre os pontos de referência, medidos pelo extensômetro axial, que inicialmente estavam afastados do comprimento padrão l_0 , indicando como que o material se deforma, na região central do corpo de prova, monitorada.

A curva apresenta algumas peculiaridades que são típicas de materiais metálicos. Enquanto a força é pequena verifica-se uma relação linear entre a força e o alongamento, o que caracteriza um comportamento elástico do material. Este comportamento ocorre para as cargas inferiores a F_p , que define o limite de proporcionalidade entre força e alongamento. Acima da carga F_p o gráfico apresenta uma curvatura, que pode ser bastante acentuada nos materiais dúteis. Com o aumento da carga, o alongamento segue crescendo, até o ponto de máximo da carga, que, dependendo do tipo da máquina de ensaio, pode representar uma condição de instabilidade, ou não, para o corpo de prova. Exemplificando, se a máquina trabalha com controle sobre a carga que está atuando, que vai crescendo ao longo do ensaio com uma dada velocidade, denominada de máquina mole, o ponto de carga máxima indica o início da instabilidade, pois o material não suporta mais qualquer aumento de carga. Se, no entanto, a máquina trabalha

com controle de deslocamento, sendo então denominada de máquina dura, o deslocamento que é imposto ao corpo de prova é a variável controlada, e neste caso o ponto de carga máxima não representa o ponto de instabilidade para o conjunto máquina de ensaio-corpo de prova. O corpo de prova admite um aumento de deslocamento além do ponto de carga máxima, dando continuidade à deformação, sem que venha a romper, agora com carga decrescente.

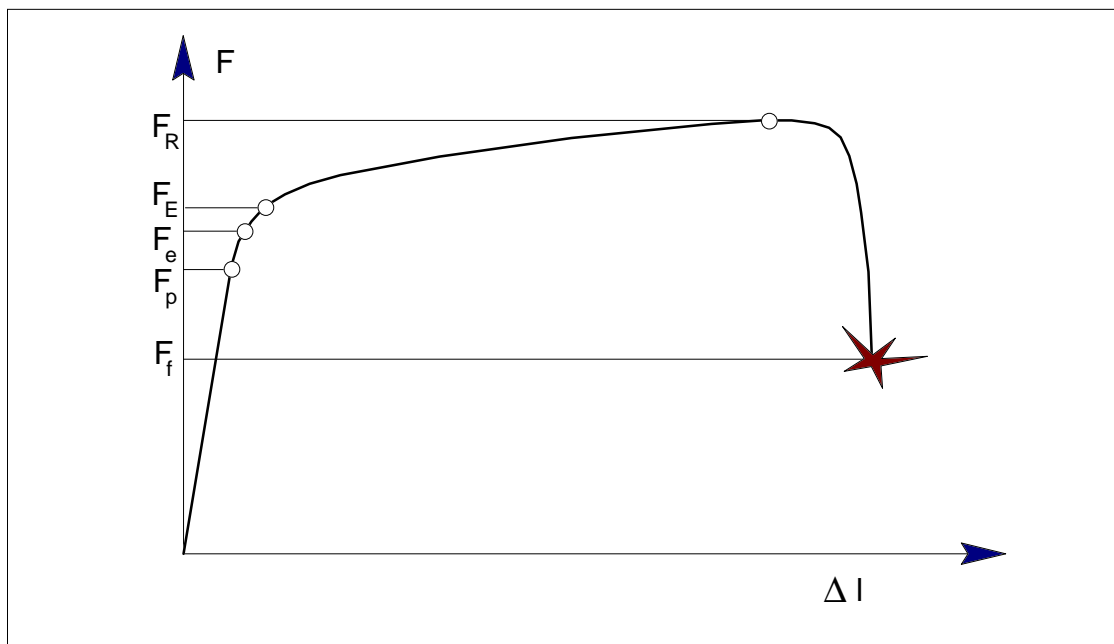


Figura 3.2 - Curva força-alongamento de um material metálico típico.

Ao tratar as informações de um ensaio de tração é pouco usual falar em cargas ou em alongamentos, sendo bem mais comum recorrermos ao conceito de tensão média de tração e de deformação específica, ou simplesmente tensão e deformação. A tensão, que é considerada como uniformemente distribuída ao longo de toda a seção do corpo de prova, é obtida por

$$\sigma_0 = F / A_0 \quad (3.1)$$

sendo σ_0 a tensão nominal que age e A_0 a área original da seção do corpo de prova. A deformação de engenharia é normalmente definida como a relação entre o alongamento e o comprimento l_0 de referência, ou o que é equivalente, pela integração do alongamento infinitesimal $d\ell$, referido ao comprimento l_0 , que define a deformação infinitesimal, entre os limites especificados pelo comprimento inicial e pelo comprimento final. Sendo "de" a deformação infinitesimal,

$$e = \int de$$

onde

$$de = dl / l_0$$

e, portanto, integrando entre o comprimento inicial e o final,

$$e = \Delta l / l_0 \quad (3.2)$$

Desta maneira, a partir da figura 3.1 é possível construir o diagrama tensão-deformação para o material, usando as definições (3.1) e (3.2). A curva obtida é a curva tensão-deformação nominal, ou de engenharia, mostrada na figura 3.3, que é similar à curva de carga-deslocamento, a menos das escalas dos eixos coordenados.

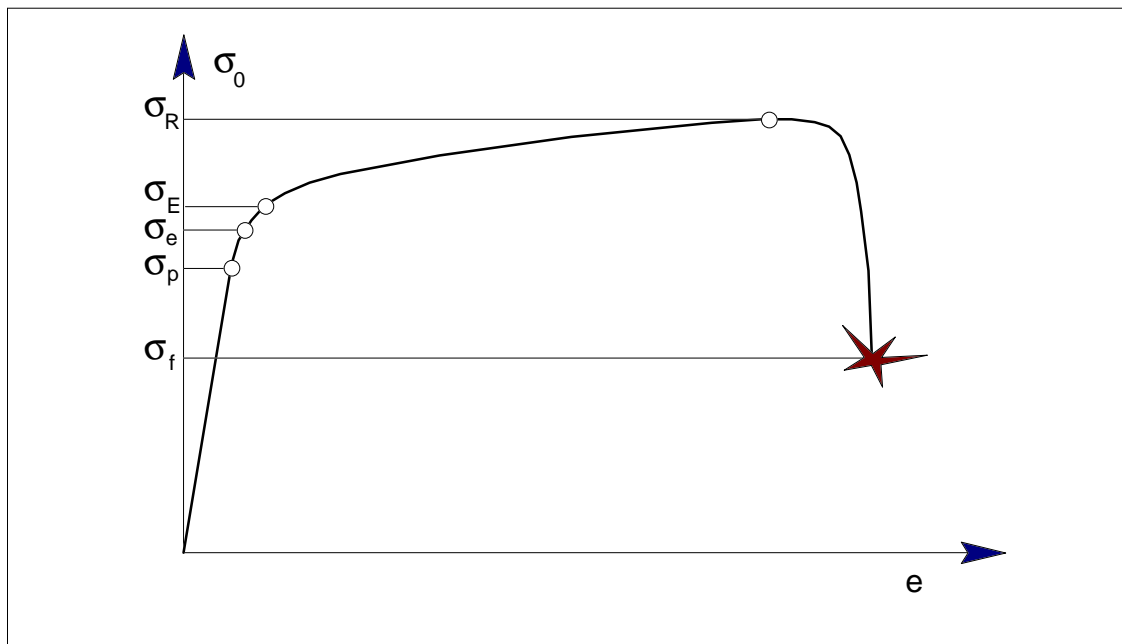


Figura 3.3 - Curva tensão-deformação nominal, para o material ensaiado com resultados da figura 3.2.

Alguns fatos interessantes são observados em um ensaio de tração, se, ao invés de mantermos a carga, ou o deslocamento, continuamente crescendo, o ensaio for parado em um ponto antes da ruptura e o corpo de prova descarregado. Em primeiro lugar, se a tensão aplicada for inferior à tensão σ_p , chamada tensão limite de proporcionalidade, que limita a porção linear da curva, a descarga ocorre exatamente sobre a linha de carregamento, ficando o material, após a descarga completa, exatamente nas mesmas condições de antes do ensaio. É

lógico que a tensão σ_p é calculada para a força F_p . Aumentando a tensão além do limite de proporcionalidade, σ_p , começamos a penetrar na região do comportamento não linear do material. Se não aumentarmos muito a tensão, verificamos que a descarga coincide ainda com a linha de carregamento, ou seja, o material retorna às condições iniciais, originais, quando totalmente descarregado. A máxima tensão a que o material pode ser solicitado, sem apresentar qualquer deformação residual, é denominada de tensão limite de elasticidade, σ_e , sendo necessário observar que a sua determinação exige a aplicação de sucessivos ciclos de carregamento, aumentando, levemente, o nível de sollicitação entre ciclos consecutivos, de modo a medir o início do aparecimento de deformações residuais.

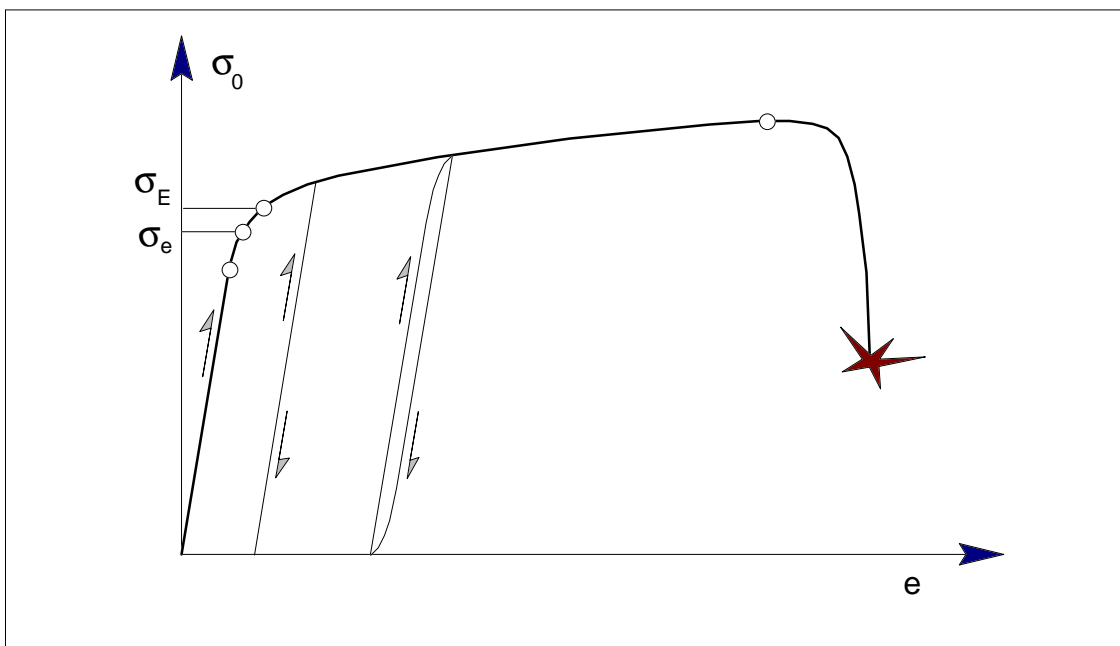


Figura 3.4 - Curvas de descarga para um material sollicitado acima de σ_e .

Para uma sollicitação acima de σ_e , ao sofrer descarga, o material não mais segue a linha de carregamento, ou seja, o corpo de prova não retorna mais à sua forma original, quando removida a carga. Isto ocorre pela presença, dentro do material, de deformações plásticas, resultando um gráfico como o mostrado na figura 3.4. Com o aumento da carga, ao ultrapassar a tensão limite de elasticidade, começam a ocorrer deformações plásticas a nível macroscópico. Enquanto o material está na região linear da curva tensão-deformação, toda a deformação é elástica, e verificamos então a validade da lei de Hooke, a qual pode ser escrita, para um estado uniaxial de tensões, como

$$\sigma = E e \quad (3.3)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, ou módulo de Young, e " e " é a deformação que o material sofre, no caso totalmente elástica.

Quando a tensão limite de elasticidade é atingida e ultrapassada, iniciam a atuar, de forma sensível, dentro do material, os mecanismos de movimento de discordâncias, fazendo com que surjam, portanto, deformações plásticas. Macroscopicamente, a deformação plástica é definida como sendo a deformação que, somada à parcela elástica, fornece a deformação total, que é a deformação que temos condições de medir experimentalmente. Assim, sendo " e " a deformação total, dada por $e = \Delta l / l_0$, a deformação plástica será

$$e_p = e - e_e \quad (3.4)$$

onde $e_e = \sigma / E$ é a deformação que o material sofreria sob a ação da tensão σ , se fosse perfeitamente elástico, ou seja, a deformação plástica é definida como o desvio da linha elástica, a figura 3.5.

Esta definição pode parecer equivalente a dizer que a deformação plástica é a deformação que permanece após a descarga do material, porém esta última definição apresenta inconvenientes. Um destes é que para medir a parcela de deformação plástica torna-se necessário realizar a descarga do material, até o nível de tensão zero, enquanto que com a definição anterior apenas o conhecimento do módulo de elasticidade é suficiente. Esta descarga da tensão até zero é fácil de ser realizada em um ensaio de tração, pela descarga da força aplicada até zero também. Esta situação é, no entanto, muito particular, pois é a única em que é possível conseguir uma descarga das tensões de toda uma seção transversal até zero, com a retirada do carregamento, porque a distribuição de tensões e de deformações é constante ao longo da seção transversal. Em qualquer outra situação em que a distribuição de tensões não é uniforme, é impossível descarregar até zero as tensões em todos os pontos de uma seção transversal, quando a carga externa for retirada, se ocorreram deformações plásticas na seção. Outro aspecto que compromete a última definição de deformação plástica é que, com deformações plásticas crescentes, verifica-se que a linha de descarga apresenta um módulo de elasticidade menor do que o original, do material indeformado. Deste modo, as duas definições não são equivalentes. A figura 3.5 ilustra a definição de deformação plástica como indicada pela equação (3.4), ou seja, como o desvio da linha elástica.

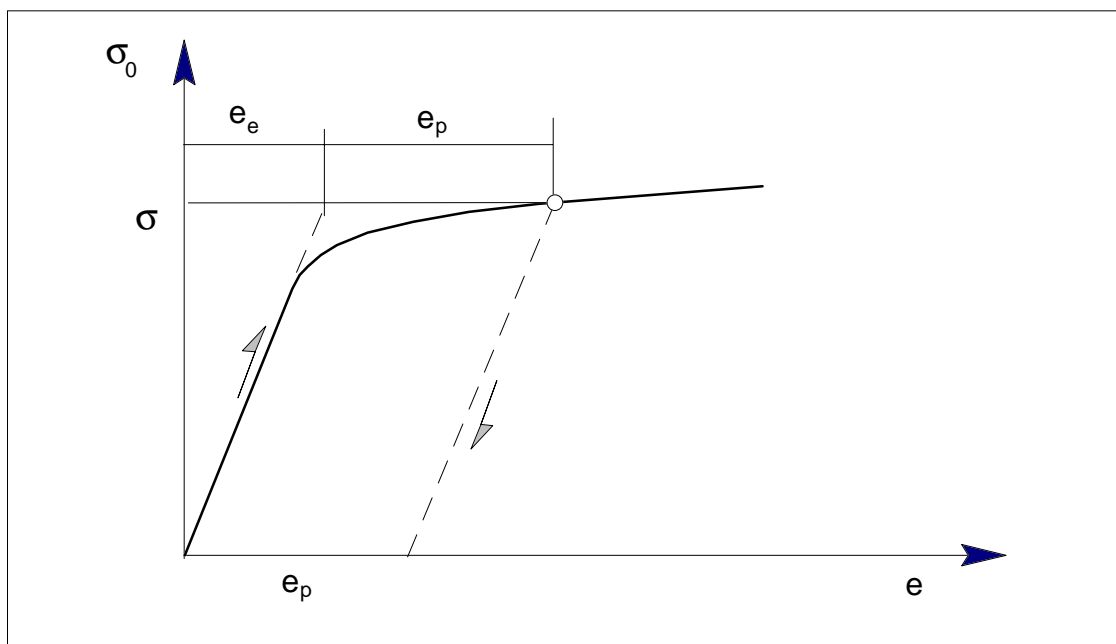


Figura 3.5 - Definição de deformação plástica, como desvio da linha elástica.

Conforme já mencionado, a presença de uma deformação plástica fica evidenciada por uma não linearidade da relação entre tensão e deformação. Como as deformações plásticas são permanentes, esta não linearidade significa que o material permanece deformado mesmo após a descarga, ficando assim um efeito residual. Outro efeito que caracteriza uma deformação plástica é que ela é dependente do tempo, podendo este comportamento ser observado de dois modos:

- Se a velocidade de deformação é aumentada, como no exemplo da figura 3.6, ocorre um deslocamento vertical na curva tensão-deformação, o que corresponde a um encruamento do material. A figura mostra um resultado típico obtido com um corpo de prova de aço de baixo carbono.
- Quando a carga é mantida constante por algum período de tempo, é observado um aumento da deformação com o tempo, que é o fenômeno da fluência. Esta deformação plástica ocorre com velocidade decrescente, mas não cessa, mesmo para longos períodos de tempo.

Estes efeitos são menos acentuados a baixa temperatura, embora estejam sempre presentes, mesmo a baixíssimas temperaturas. Em altas temperaturas estes efeitos passam a ser importantes, pois ocorrem de um modo bastante sensível e significativo.

Uma das propriedades mecânicas mais úteis e importantes é a que define o campo de validade do comportamento elástico do material. Conforme visto, a tensão limite de proporcionalidade, ou o limite de elasticidade, representa a extensão do comportamento linear ou do regime elástico. No entanto, alguns aspectos fazem com que estas tensões não sejam quase utilizadas na prática. Em primeiro lugar, a

determinação de σ_e é trabalhosa, em vista dos sucessivos ciclos de carga e descarga necessários. Por outro lado, existem indicações de que os materiais reais não possuem um limite elástico verdadeiro, desde que existam instrumentos suficientemente sensíveis para medir ínfimos desvios da linha elástica. Desta forma, a extensão da faixa elástica do material é mais comumente definida pela tensão limite de escoamento, que pode ser facilmente obtida a partir da curva tensão-deformação determinada no ensaio.

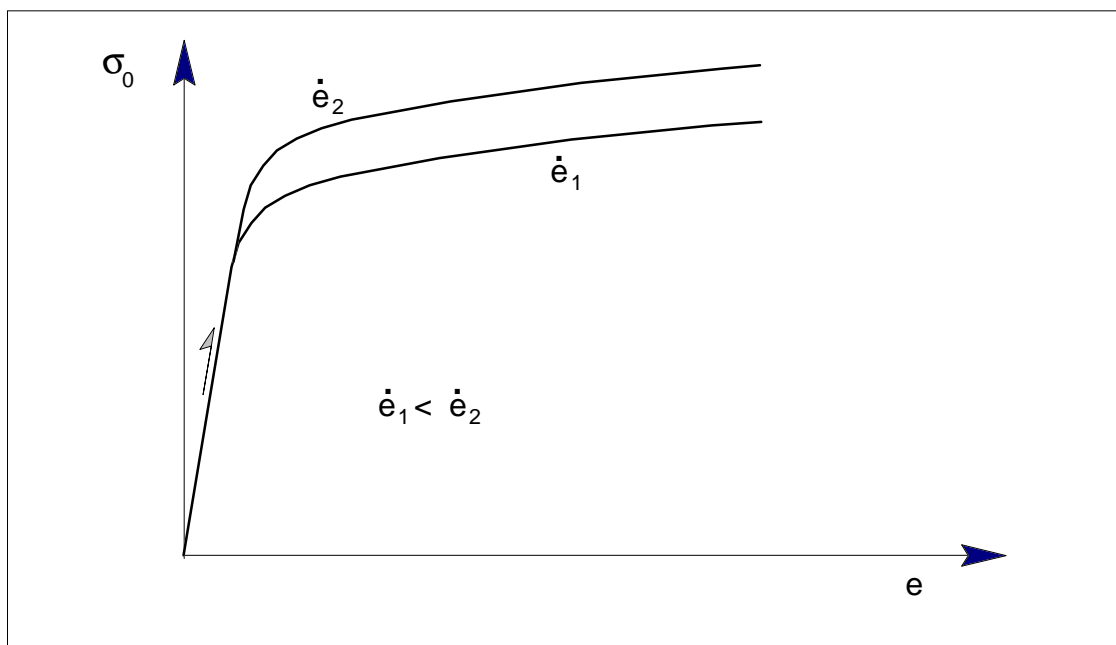


Figura 3.6 - Efeito da mudança na velocidade de deformação.

Dependendo do material, e do tratamento termo-mecânico a que foi submetido, a curva tensão-deformação pode assumir formas bastante distintas. Algumas formas típicas estão mostradas na figura 3.7. A curva da figura 3.7 a) é típica de aços com baixo teor de carbono, no estado recozido. A curva apresenta uma descontinuidade, sendo caracterizada por um patamar de escoamento, onde o material sofre uma acentuada deformação plástica, sob a ação de uma tensão constante. Este comportamento é caracterizado pelo limite superior de escoamento, que é a tensão máxima que ocorre antes de iniciar o escoamento, bem como pelo limite inferior de escoamento, que é a tensão correspondente ao patamar de escoamento. A tensão limite superior de escoamento é extremamente sensível a detalhes como o acabamento superficial do corpo de prova, pequenas excentricidades na aplicação da carga, bem como ao tipo de máquina de ensaio, se mole ou dura. Exemplificando, para um corpo de prova com superfície perfeitamente polida e com uma transição bastante suave para os pontos de contato com as garras, o limite superior de escoamento pode atingir valores próximos ao da tensão de ruptura do material. Já

para um corpo de prova com acabamento rugoso, o limite superior pouco se distingue do limite inferior. Por estas razões é que o ponto de referência para definir a extensão da zona de comportamento elástico é dado pela tensão limite inferior de escoamento, ou simplesmente tensão limite de escoamento, σ_E .

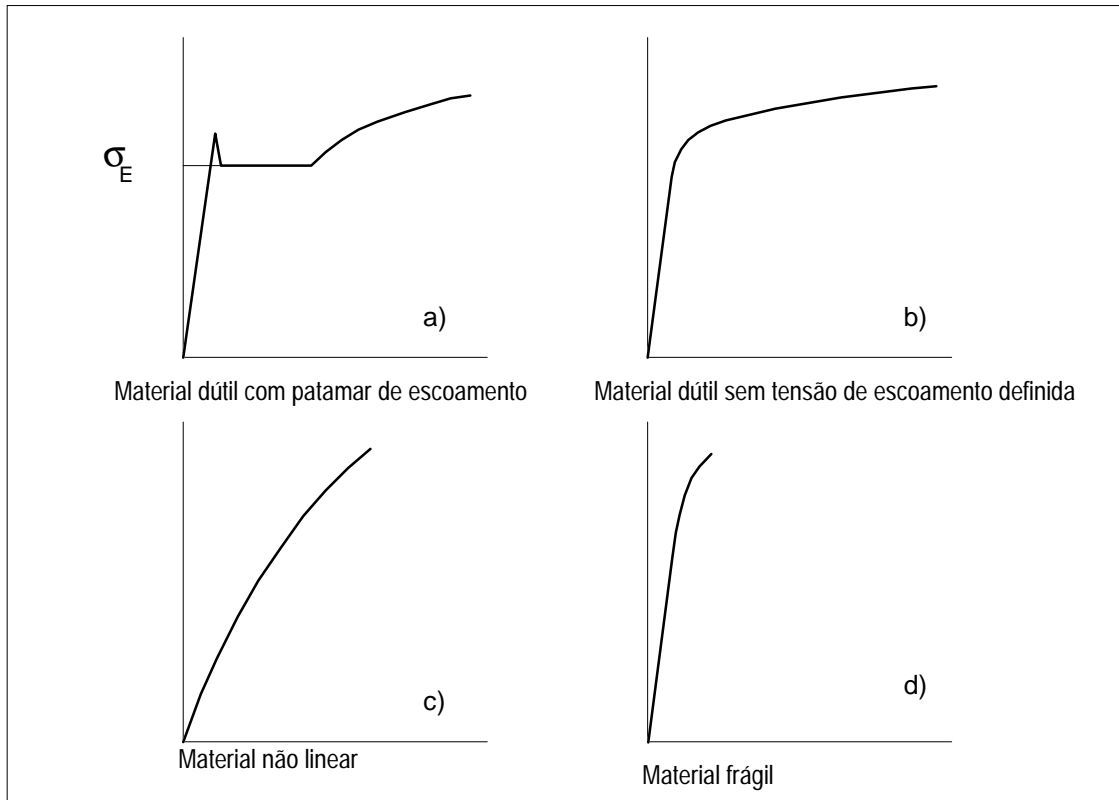


Figura 3.7 - Diferentes formas que a curva tensão-deformação pode apresentar.

Na curva da figura 3.7 b) temos um material dútil, mas sem um limite de escoamento perfeitamente definido como no caso anterior. A definição da tensão limite de escoamento é baseada em algum critério de natureza empírica. O critério mais usado é definir o limite de escoamento como a tensão em que a deformação plástica atinge um valor arbitrário, da ordem de 0,2% a 0,5%. Outra possibilidade é considerar não a deformação plástica, mas a deformação total, para definir a tensão de escoamento. A figura 3.8 mostra os processos de determinação da tensão limite de escoamento citados, bem como o processo que usa uma redução no módulo de elasticidade, tomando o ponto da curva cujo módulo definido pela linha tangente à curva tensão-deformação é um valor menor que o módulo de elasticidade do material. É usual usar para o módulo tangente, H , um valor 50% menor do que o módulo no regime elástico do material, ou seja, $H = 0,5 E$.

As duas curvas restantes da figura 3.7 representam dois materiais frágeis, um dos quais apresenta um comportamento não linear iniciando em níveis bastantes baixos de tensão, figura 3.7 c), como é, por exemplo, o caso do ferro fundido. A figura 3.7 d) ilustra um material frágil com um comportamento essencialmente elástico até próximo do ponto de ruptura. Esta forma de curva é típica de materiais cerâmicos e ligas fundidas de elevada dureza.

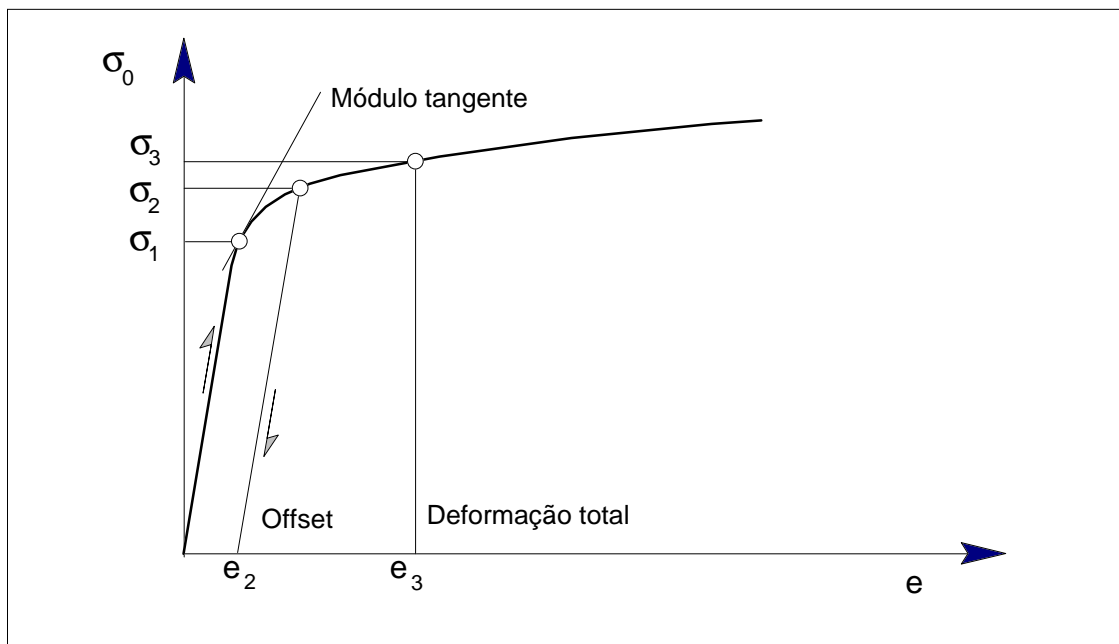


Figura 3.8 - Possíveis critérios de definição para a tensão limite de escoamento. A tensão σ_1 fica definida pelo critério do módulo tangente, a tensão σ_2 pela deformação plástica e_2 e σ_3 pela deformação total do valor e_3 .

Para um material com características frágeis a tensão limite de escoamento tem pequeno significado, podendo inclusive não satisfazer o critério usado para definir σ_E . Nestes materiais é usada a tensão limite de resistência do material, σ_R , definida como o ponto de máximo da curva tensão-deformação, para caracterizar as propriedades de resistência mecânica. Similarmente, para um material dútil, a tensão limite de resistência é dada pelo ponto de máximo da curva, porém nestes materiais σ_R não coincide com o ponto de fratura do corpo de prova, pois este segue se deformando plasticamente, embora com carga decrescente. Este aspecto leva muitas vezes a conceitos equivocados, em especial quando é usada a designação de σ_R como tensão de ruptura. Isto é correto para os materiais frágeis, mas totalmente errado no caso dos dúteis.

Deste modo, em termos práticos, o diagrama tensão-deformação fornece duas tensões características do material, a tensão limite de escoamento, σ_E , normalmente definida para uma deformação plástica de 0,2%, e a tensão limite de resistência, σ_R , ponto de máximo da curva. Conforme o corpo de prova se deforma a carga tende a aumentar devido ao encruamento. Por outro lado, há uma redução da seção transversal, o que tende a fazer com que a carga diminua. Nos primeiros estágios do ensaio o efeito de encruamento predomina, aumentando a carga. No entanto, o efeito relativo do encruamento diminui com o prosseguimento do ensaio e eventualmente a redução da área da seção transversal excede o ganho de resistência devido ao encruamento, resultando deste modo um máximo para a carga, que passa a diminuir a seguir. Exatamente neste máximo qualquer parte do corpo de prova que seja mais fraca do que o restante irá se deformar sob esta carga, enquanto que todas as outras seções, que requerem um aumento de carga para seguir a deformação, ficam com deformação constante, ou até decrescente. Assim existe uma região que se deforma mais e, portanto, tem a sua seção transversal mais reduzida. Logo, esta região, que já é mais fraca, fica submetida a uma tensão superior à do resto do corpo, pela redução da seção, e assim tem lugar um processo de instabilidade, que leva a um estreitamento no corpo de prova, agora localizado nesta região mais fraca, levando finalmente à ruptura. Desta forma, até o ponto de máximo, a deformação ocorre de uma maneira uniforme sobre todo o corpo de prova. Deste modo a tensão limite de resistência dos materiais dúteis define na realidade o início da instabilidade plástica, onde a deformação plástica avança até a ruptura final. Após a carga máxima, a deformação passa a concentrar-se na região estriada, ficando a deformação real superior à calculada segundo (3.2), pois esta expressão faz a média do alongamento $\Delta\ell$ sofrido, sobre todo o comprimento de referência ℓ_0 .

Apesar de ser um dado fictício, em vista do acima exposto, é comum calcular o alongamento percentual no ponto de ruptura do material, e_f , usando o comprimento do corpo de prova rompido, para fornecer uma idéia da maior ou menor capacidade de deformação plástica que o material apresenta. Uma medida mais precisa da deformação que o material sofre nos instantes finais do ensaio é obtida a partir do diâmetro da seção estriada. Usando a medida do diâmetro mínimo no corpo de prova já rompido é definida a estrição ϕ do material como:

$$\phi = (A_0 - A_f) / A_0 \quad (3.5)$$

sendo A_0 a área original da seção transversal e A_f a área da seção transversal após a ruptura. Esta redução da seção transversal é

consequência direta do efeito de Poisson, onde a deformação axial induz deformações nos eixos transversais.

A figura 3.9 mostra um diagrama tensão-deformação nominal, ou de engenharia, onde estão indicadas tensões características, bem como o alongamento de ruptura, e_f . Este diagrama tem maior importância para a especificação e controle da qualidade de materiais, bem como para uma amostragem sobre a uniformidade de um produto metalúrgico. Para a análise das propriedades mecânicas dos materiais existe mais interesse no diagrama tensão-deformação real, onde a tensão é calculada usando a área real do corpo de prova, e a deformação é medida em relação a um valor instantâneo de referência, e não ao comprimento original da peça sem carga. A análise deste tipo de diagrama é feita na seção 3.3.

3.2 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Nesta seção é feito um resumo das características do ensaio de tração e quais são as informações que podem ser obtidas, quando este ensaio é analisado com o uso do procedimento clássico, através da curva tensão-deformação nominal ou de engenharia. A figura 3.9 ilustra as principais informações que são obtidas habitualmente a partir do diagrama convencional.

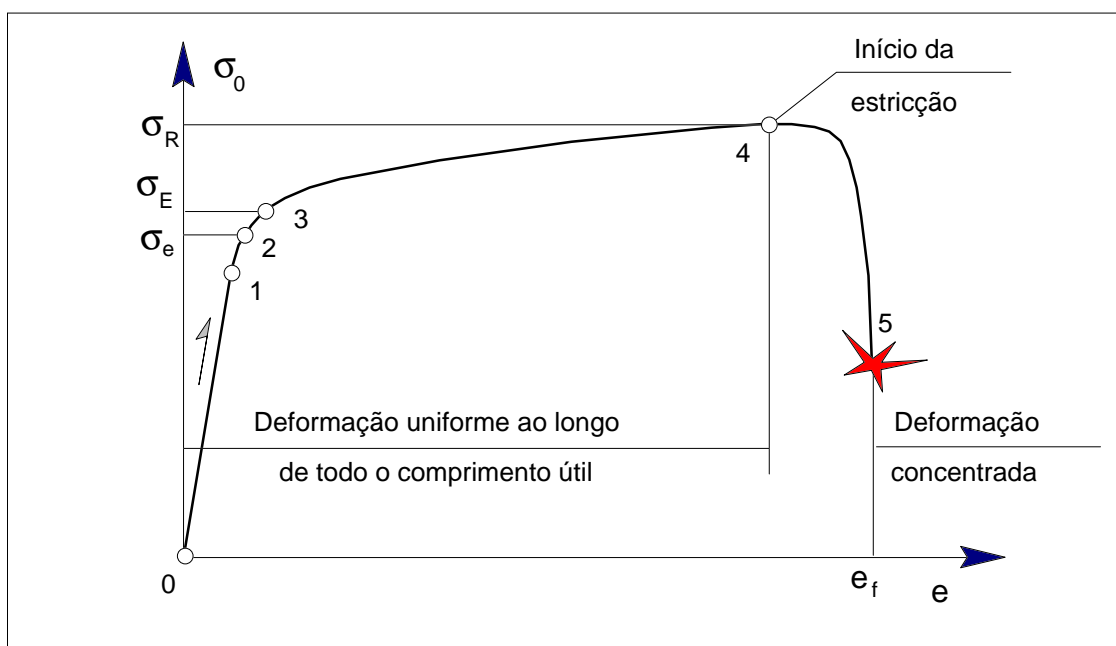


Figura 3.9 - Principais informações obtidas a partir de um diagrama tensão-deformação convencional.

A forma e a magnitude da curva tensão-deformação de um material depende, dentre outros fatores, da sua composição química, dos

tratamentos termo-mecânicos, da temperatura de operação e do estado de tensões imposto durante o teste.

O teste de tração é bastante usado para fornecer informações básicas a respeito da resistência do material para projeto e é um teste aceitável para a especificação de materiais. A curva tensão-deformação de engenharia é obtida a partir da medida da carga e da alongação e os pontos característicos, da curva da figura 3.9, são:

- 01 - porção linear da curva, onde vale a lei de Hooke;
- 1 - ponto correspondente ao limite de proporcionalidade;
- 2 - ponto correspondente ao limite elástico;
- 3 - ponto correspondente ao limite de escoamento;
- 4 - ponto de carga máxima (início da instabilidade);
- 5 - ponto de ruptura final.

As tensões usadas nesta curva tensão-deformação são as tensões nominais que agem no corpo de prova tensionado, designadas por σ_0 , equação (3.1). Esta tensão nominal é obtida pela divisão da carga pela área da seção transversal do corpo de prova indeformado. As deformações são obtidas pela divisão do acréscimo $\Delta\ell$, medido sobre o comprimento padrão, pelo sua dimensão original ℓ_0 , equação (3.2).

Os parâmetros que são usados para descrever a curva tensão-deformação, que procuram caracterizar as propriedades de resistência do material e as propriedades de ductilidade, são, basicamente:

- Tensão limite de escoamento
- Tensão limite de resistência
- Alongamento percentual
- Redução da área da seção transversal

CRITÉRIOS PARA DEFINIR O COMPORTAMENTO ELÁSTICO.

O nível de tensão em que as deformações plásticas começam depende muito da sensibilidade do equipamento usado para monitorar o ensaio, já que a transição do comportamento elástico para o comportamento plástico é gradual. Vários critérios para a determinação do início de plastificação são usados, em função dos equipamentos que estão disponíveis e do uso pretendido para os resultados.

- Limite de proporcionalidade. É a maior tensão em que existe proporcionalidade direta entre as tensões e as deformações. É o valor em que inicia o desvio do relacionamento linear no diagrama tensão-deformação.

- Limite elástico. É a maior tensão que o material pode suportar sem que exista alguma deformação plástica que se possa medir macroscopicamente, após a completa remoção da carga.

- Limite de escoamento. É a tensão requerida para produzir uma deformação plástica especificada, usualmente de 0,2%, quando o material não apresentar um patamar de escoamento.

Alguns materiais não tem um comportamento linear em seu diagrama tensão-deformação, mesmo para baixos níveis de tensão, como por exemplo o cobre recozido e o ferro fundido cinzento. Para estes materiais a determinação da tensão limite de escoamento, por meio da especificação de um valor para a deformação plástica não pode ser usado, pois não é definido com exatidão o módulo de elasticidade. Assim, nestes casos a tensão limite de escoamento é definida como a tensão que provoca uma deformação total pré-estabelecida, como de 0,005 (0,5%) por exemplo. Veja figura 3.8.

TENSÃO LIMITE DE RESISTÊNCIA

A tensão limite de resistência é a tensão nominal correspondente à máxima carga que ocorre no ensaio, considerando a área original da seção transversal no seu cálculo,

$$\sigma_R = F_{\text{máx}} / A_0 \quad (3.6)$$

A tensão limite de resistência é o resultado mais usual do teste de tração e, entretanto, é um valor de pequeno significado físico para avaliar a resistência real do material. Esta afirmação decorre do fato de que a tensão σ_R não ocorre na realidade, pois a área instantânea, no ponto de carga máxima, não é A_0 . Para metais dúteis a tensão limite de resistência pode ser entendida como a medida da máxima solicitação que o metal pode resistir sob condições de carregamento uniaxial. Deve-se no entanto ter muito cuidado para não cair no erro de caracterizar σ_R como a tensão de ruptura do material. A ruptura só irá ocorrer após a estrição avançar consideravelmente, consumindo a ductilidade do material. A tendência atual para o projeto de estruturas de materiais dúteis é o uso da tensão limite de escoamento para definir o início de plastificação. Para materiais frágeis a tensão limite de resistência é uma informação válida para projeto.

CRITÉRIOS PARA MEDIR A DUTILIDADE

A ductilidade é uma propriedade fundamental do material, onde temos diferentes maneiras de a definir e de quantificar. É uma medida útil para indicar:

- Quanto que o material pode ser deformado plasticamente sem que ocorra fratura, para operações de conformação tais como laminação, extrusão e estampagem;
- A capacidade do metal de fluir plasticamente antes da ruptura. Esta característica permite deformações localizadas sem fratura, as quais

podem ocorrer devido a sobrecargas ou pontos de concentração de tensão não esperados;

- O nível de impurezas do material, consequência das condições do processo metalúrgico, já que um maior volume de impurezas reduz significativamente a ductilidade.

As medidas convencionais de ductilidade, obtidas a partir do ensaio de tração, são a deformação de fratura, e_f , denominada usualmente de alongação, e a estricção, ϕ , obtida como a redução de área, em relação à área original.

$$e_f = (\ell_f - \ell_0) / \ell_0 \quad (3.7)$$

$$\phi = (A_0 - A_f) / A_0 \quad (3.8)$$

O valor da deformação de fratura depende do comprimento ℓ_0 , no qual as medidas são tomadas, já que as deformações plásticas mais intensas ficam concentradas na região da estricção. Um menor comprimento de referência, no qual as medidas são tomadas, fará com que a deformação e_f tenda ao valor real. Desta forma quando são dadas as deformações percentuais, de alongação, o comprimento de referência também deve ser dado, normalmente como um múltiplo do diâmetro. A redução da área não sofre esta influência, logo pode ser considerada como uma medida mais adequada da ductilidade do material, sem que haja problema de comprimento de referência.

MÓDULO DE ELASTICIDADE

A inclinação da região linear do diagrama tensão-deformação é denominada de módulo de elasticidade ou módulo de Young. O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material, ou seja, para módulos grandes, menores são as deformações elásticas, para um mesmo nível de tensão. O módulo de elasticidade é necessário para o cálculo de defleções e de deformações para todo e qualquer elemento estrutural, sendo um valor importante para a análise e projeto.

O módulo de elasticidade é resultado das forças de atração entre os átomos, logo, como estas forças não podem ser alteradas sem a variação da natureza básica do material, o módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material. Ele é alterado, apenas levemente, pela adição de elementos de ligas, tratamentos térmicos ou trabalho a frio. No entanto, sofre uma significativa redução de valor com o aumento da temperatura. Para altas temperaturas o módulo de elasticidade deve ser medido por métodos dinâmicos. Valores típicos do módulo de elasticidade, função da temperatura, para materiais de uso comum em Engenharia, estão listados na Tabela 3.1 a seguir.

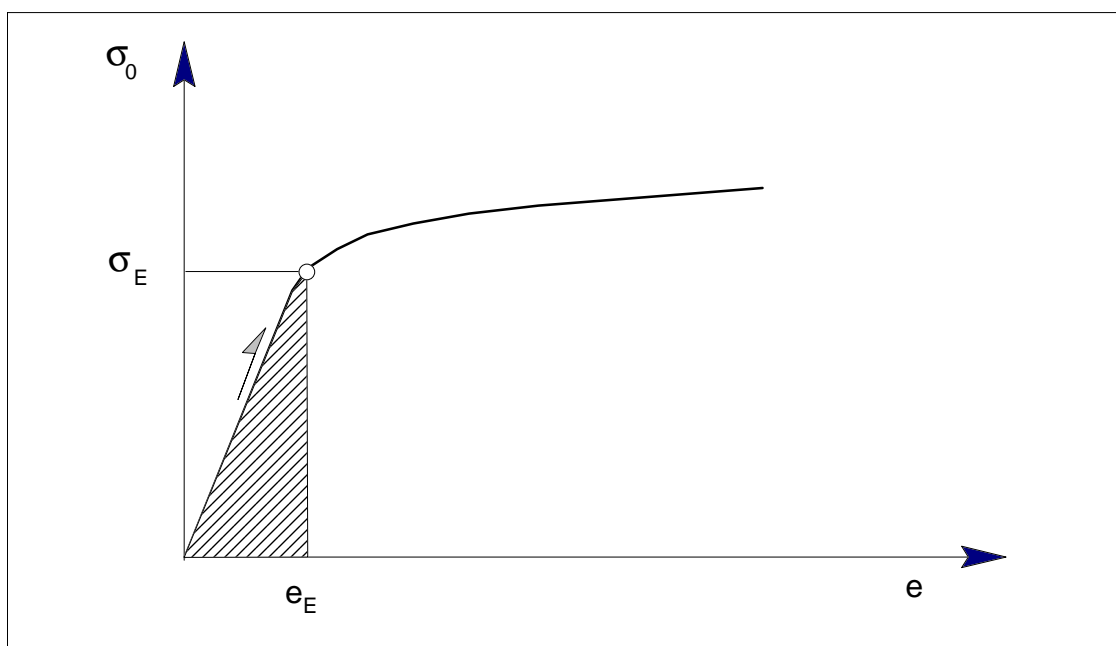
TABELA 3.1

Efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade, [MPa].

MATERIAL	20°C	200°C	430°C	540°C	650°C
Aço carbono	207 000	186 000	155 000	134 000	124 000
Aço austenít.	193 000	176 000	158 000	155 000	145 000
Liga de Ti	114 000	97 000	74 000	70 000	-
Liga de Al	72 000	66 000	54 000	-	-

RESILIÊNCIA

A habilidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e retornar, quando descarregado, às dimensões originais, é denominada de resiliência. Ela é dada usualmente pelo módulo de resiliência, que é a energia de deformação por unidade de volume requerida para as tensões variarem de zero até a tensão limite de escoamento σ_E .

**Figura 3.10** - Definição do módulo de resiliência.

A energia de deformação do material, por unidade de volume, para um estado uniaxial de tensões, dentro do regime elástico, é dada por:

$$U_0 = 0,5 \sigma_x \cdot \varepsilon_x$$

Com a definição de módulo de resiliência temos

$$U_r = 0,5 \sigma_E \cdot \varepsilon_E$$

Usando a lei de Hooke, para um estado uniaxial de tensões, resulta

$$U_r = 0,5 \sigma_E^2 / E \quad (3.9)$$

Esta equação indica que o material adequado para absorver a energia de deformação, em condições que o elemento estrutural não pode permanecer com distorções permanentes, tais como molas e peças de mecanismos de precisão, é aquele que possui uma alta tensão de escoamento e baixo módulo de elasticidade. A Tabela 3.2 fornece alguns valores de módulos de resiliência para diferentes materiais.

TABELA 3.2

Módulo de resiliência para alguns materiais.

ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDADE	TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE RESILIÊNCIA
Aço médio carbono	207 000	310	0,230
Aço mola	207 000	965	2,330
Duralumínio	72 400	124	0,110
Cobre	110 000	28	0,004
Borracha	1	2,1	2,205
Polímero acrílico	3 400	13,8	0,028

TENACIDADE

A tenacidade de um material é definida como a sua capacidade de absorver energia, permitindo-se que penetre no regime plástico. A capacidade de suportar, ocasionalmente, tensões maiores que as de escoamento, sem romper, é desejada em elementos tais como engrenagens, correntes, acoplamentos, cabos, etc. A tenacidade pode ser considerada como a área total sob a curva do diagrama tensão-deformação. Esta área é a representação de quanto trabalho por unidade de volume o material pode absorver sem romper. A figura 3.11 mostra curvas tensão-deformação para materiais de alta e baixa tenacidade. O aço mola tem tensão limite de escoamento mais alta que um aço estrutural, porém este é mais dútil e tem alongação maior, logo a área sob a curva do aço estrutural é maior, o que implica em maior tenacidade. Para materiais dúteis, que possuem um diagrama tensão-deformação semelhante ao do aço estrutural, a área sob a curva pode ser aproximada por uma das seguintes equações:

$$U_t = \sigma_R e_f \quad (3.10)$$

$$U_t = \sigma_L e_f \quad (3.11)$$

onde σ_L é a chamada tensão limite, definida como a média aritmética entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de resistência.

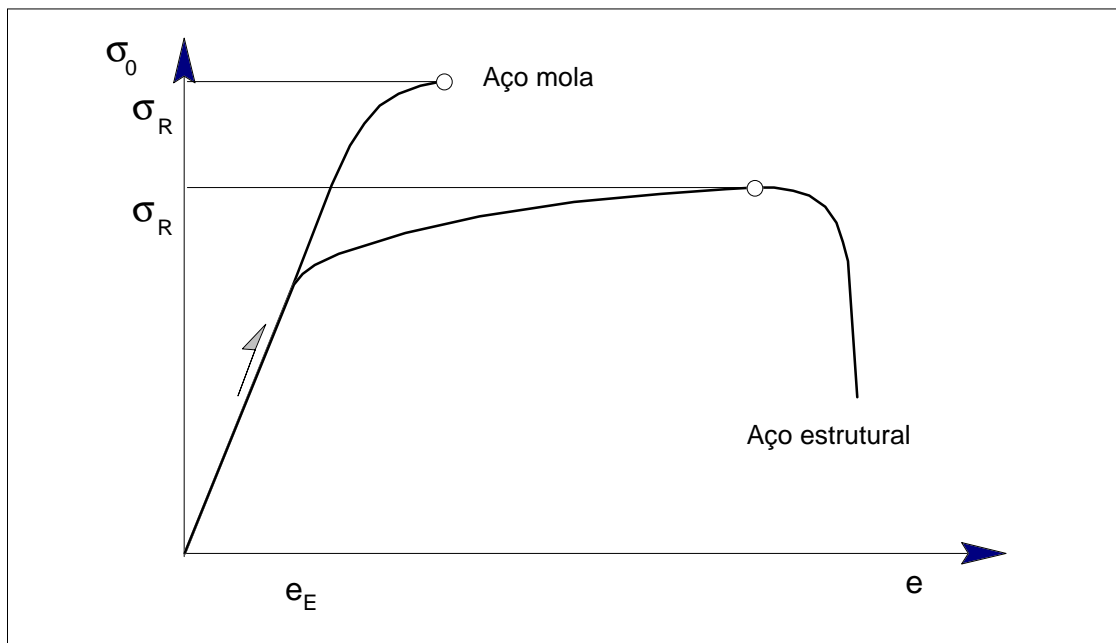


Figura 3.11 - Curvas tensão-deformação típicas para aços de alta e baixa resistência.

Para materiais frágeis, a curva tensão-deformação pode ser considerada como sendo parabólica e a área sob a curva é assim dada por:

$$U_t = 0,667 \sigma_R e_f \quad (3.12)$$

Como esta medida da tenacidade considera a energia por unidade de volume que o material absorve sem romper, é também denominada de tenacidade volumétrica.

3.3 - DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO REAL

O diagrama tensão-deformação convencional apresenta resultados que não são adequados para um estudo mais profundo sobre o comportamento do material, devido à maneira simplificada como os resultados do ensaio foram avaliados. Quando o material está submetido a grandes deformações, como no caso do estudo de processos de conformação, ou do estudo do comportamento do material próximo aos instantes de ruptura, o uso da tensão nominal e

da deformação nominal, obtidas do ensaio de tração, não são adequados. A tensão nominal erra pelo uso da área original, que não é a área real no instante em que a força está atuando. A deformação nominal apresenta problemas para uso quando o material está muito deformado e além disto não considera o efeito da estrição, já que faz uma média da deformação sobre o comprimento de referência.

Antes de atacar o problema do diagrama tensão-deformação real é conveniente definirmos o que é deformação e tensão real. A deformação de engenharia é definida pela equação (3.2), onde o acréscimo de deformação, "de", é calculado pelo acréscimo de comprimento, "dl", referido ao comprimento original, " l_0 ". Quando se trabalha com grandes deformações este processo não é adequado, pois o comprimento de referência pode mudar bastante em relação ao comprimento original, levando a uma medida do acréscimo instantâneo de deformação errônea.

EXEMPLO 3.1.

Uma barra é deformada ao dobro do seu comprimento original. A deformação, quando calculada pela equação (3.2), será $e = 1$, já que $\Delta l = l_0$. Se agora, após ser tracionada, for reduzida à metade do comprimento, temos $e = -0,5$, pois $\Delta l = -0,5 l_0$, em relação ao novo comprimento inicial. É intuitivo que estes valores de deformação não são corretos, pois em valor absoluto a deformação deveria ser a mesma nos dois casos, resultando uma deformação final nula, mas que não ocorre.

Este problema pode ser contornado definindo a deformação real de tal forma que o acréscimo de deformação real, $d\varepsilon$, seja a relação entre dl , acréscimo do comprimento, e o comprimento instantâneo, l , e não o comprimento original, l_0 , de modo que $d\varepsilon = dl / l$. Integrando agora entre o comprimento inicial e o comprimento final, resulta portanto:

$$\varepsilon = \ln l - \ln l_0, \text{ ou}$$

$$\varepsilon = \ln (l / l_0) \tag{3.13}$$

EXEMPLO 3.2.

Consideremos a mesma barra do exemplo 3.1, sendo deformada ao dobro do seu comprimento original. A deformação, calculada agora pela equação (3.13), será $\varepsilon = 0,693$, já que $l = 2 l_0$. Se agora, após ser tracionada, a barra for reduzida à metade do comprimento, temos $\varepsilon = -0,693$, pois $l = 0,5 l_0$. Estes valores de deformação são coerentes com a nossa expectativa intuitiva, onde, em valor absoluto, a deformação é igual nos dois casos, resultando assim em uma deformação final nula.

Comparando a equação (3.13) com a equação (3.2) podemos obter um relacionamento entre a deformação real e a deformação de engenharia, como segue.

$$e = \Delta l / l$$

$$\varepsilon = \ln (l / l_0)$$

$$\varepsilon = \ln (l_0 + \Delta l) / l_0$$

$$\varepsilon = \ln (1 + e) \quad (3.14)$$

Para uma deformação plástica pura do material, verifica-se que o processo é incompressível, ou seja, não ocorre variação de volume. Na realidade a densidade varia um pouco, porém, experimentalmente, esta variação é menor que 0,1%, mesmo para grandes deformações, e desta forma, com boa aproximação podemos considerar que o volume do sólido fica constante durante o processo de deformação plástica. Com isto temos que o volume, limitado por um comprimento de referência, fica constante durante o processo de deformação, o que permite escrever

$$l_0 A_0 = l A$$

e rearranjando a equação:

$$l / l_0 = A_0 / A \quad (3.15)$$

Com o uso desta equação a deformação real pode ser dada em função da variação da área da seção transversal, como na equação (3.23), ou então:

$$\varepsilon = \ln A_0 / A \quad (3.16)$$

Quanto à tensão real, esta é a carga dividida pela área da seção transversal, em um dado instante. A tensão de engenharia, ou tensão convencional, é a carga dividida pela área original da seção do corpo de prova. Considerando o comportamento elástico do material, esta distinção não é necessária, porque os níveis de deformação são baixos. Em certos problemas da plasticidade, particularmente quando do tratamento matemático do teste de tração, é importante a distinção entre as duas definições de tensão. A tensão real será denotada por σ e a de engenharia por σ_0 . Assim,

$$\sigma = F / A \quad (3.17)$$

$$\sigma_0 = F / A_0 \quad (3.18)$$

A tensão real pode ser relacionada com a tensão de engenharia considerando

$$\sigma = (F A_0) / (A_0 / A)$$

e com a substituição das equações (3.15) e (3.2) na equação acima obtemos, após algumas manipulações

$$\sigma = \sigma_0 (1 + e) \quad (3.19)$$

A curva tensão-deformação de engenharia não fornece boas indicações das características de deformação dos materiais, porque é completamente baseada nas dimensões originais do corpo de prova, e estas dimensões variam continuamente durante o teste. Os testes de tração realizados com materiais dúteis, sob controle de carga, tornam-se instáveis e a estrição surge durante o desenvolvimento do ensaio. Por ser a redução de área da seção transversal rápida neste estágio do teste, a carga necessária para continuar a deformar o corpo de prova também decresce. A tensão nominal, baseada na área original, diminui, e isto faz com que a curva tensão-deformação comece a baixar, após o ponto de máxima carga. Na realidade, o metal segue encruando até a fratura, fazendo com que as tensões necessárias, para continuar deformando o material, também precisem ser aumentadas. Se as tensões verdadeiras, baseadas na área instantânea do corpo de prova, forem usadas, a curva tensão-deformação então obtida cresce continuamente até a fratura. Se as deformações são também baseadas em medidas instantâneas, usando a equação (3.13), a curva assim obtida é conhecida como curva tensão-deformação real. A curva tensão-deformação real deve ser vista como uma maneira mais exata de caracterizar o comportamento mecânico do material, necessária quando os níveis de deformações plásticas são elevados, como em análises do processo de fratura, ou de operações de conformação. Deste modo, a curva tensão-deformação real representa também o comportamento qualitativo do material, quando carregado sob tração. Se a carga é removida, e então reaplicada, o material comporta-se elasticamente ao longo de toda a linha de descarga e após, de carga, quando esta for novamente aplicada, de forma similar ao que ilustra a figura 3.4, para a curva tensão deformação convencional.

A equação (3.19) assume que exista constância de volume durante o processo de deformação, bem como uma distribuição homogênea de deformações ao longo do comprimento de referência do corpo de prova, o que ocorre antes do surgimento da estrição. Acima do ponto

de carga máxima, as tensões reais devem ser determinadas a partir de medidas instantâneas da carga e da seção transversal, com a equação (3.17). A deformação real ε pode ser determinada a partir da deformação convencional, ou de engenharia, conforme dado por (3.14), porém esta equação só pode ser aplicada até o ponto de aparecimento da estricção, pelas razões explicadas acima. Além da carga máxima, a deformação real deve ser determinada através de medidas instantâneas da área ou do diâmetro da seção transversal, conforme equação (3.16), ou então pela relação de diâmetros,

$$\varepsilon = \ln (D_0 / D)^2 \quad (3.20)$$

$$\varepsilon = 2 \ln D_0 / D \quad (3.21)$$

A figura 3.12 compara a curva tensão-deformação real com a curva tensão-deformação de engenharia. Do diagrama tensão-deformação real, pode-se obter os seguintes parâmetros:

TENSÃO REAL DE FRATURA

A tensão real de fratura é σ_f , definida como a carga de fratura dividida pela área da seção transversal, no instante de fratura. Essa tensão deve ser corrigida, pois na seção da fratura o estado de tensões é triaxial, como decorrência da estricção que leva a uma região com seção transversal variável. Devido a isto, desenvolvem-se tensões tangenciais e radiais, adicionalmente à tensão axial. Este estado de tensões triaxial exige, para prosseguir com a deformação plástica, uma tensão axial maior do que se o estado fosse uniaxial. Assim, a tensão real de fratura, calculada simplesmente como força sobre área, considera também o efeito de restrição à deformação plástica, provocado pela triaxialidade do estado de tensões, [36]. A tensão que efetivamente o material suporta, em um estado uniaxial de tensões, é um pouco menor, dependendo da geometria do local da estricção, pois o efeito de restrição depende desta geometria.

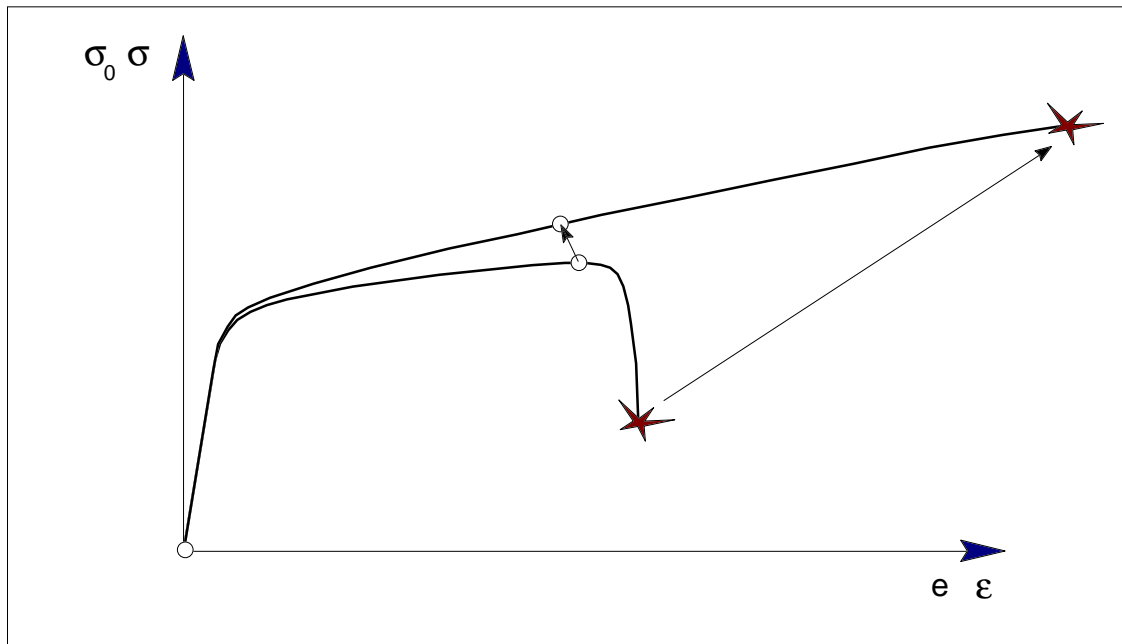


Figura 3.12 - Comparação entre as duas curvas tensão-deformação, a curva real e a curva de engenharia.

DEFORMAÇÃO REAL DE FRATURA

A deformação real de fratura, ε_f , é dada por:

$$\varepsilon_f = \ln (A_0 / A_f) \quad (3.22)$$

onde A_f é a área da seção transversal na seção que rompeu. Outra maneira de calcular ε_f é a partir da estrição na fratura, ϕ , definida pela equação (3.5).

$$\varepsilon = \ln [1 / (1 - \phi)] \quad (3.23)$$

DEFORMAÇÃO REAL UNIFORME

A deformação real uniforme é a deformação que ocorre no ponto de carga máxima, ou seja, é a máxima deformação em que ocorreu, ainda, uma deformação uniformemente distribuída sobre todo o comprimento de referência. Pode ser calculada pela equação (3.24), onde A_R é a área da seção transversal do corpo de prova quando foi atingida a carga máxima, ou seja, exatamente no ponto em que inicia a estrição. Esta deformação é da ordem do expoente de encruamento do material.

$$\varepsilon = \ln (A_0 / A_R) \quad (3.24)$$

ANÁLISE DO EFEITO DE POISSON

A redução da seção transversal é consequência do efeito de Poisson, ou seja, se o material sofre uma deformação na direção do eixo x , por exemplo, provocada por uma carga nesta direção, como no caso do corpo de prova do ensaio de tração, esta deformação ε_x induz deformações em direções perpendiculares, y e z no caso, dando origem às deformações ε_y e ε_z . Se o estado de tensões no ponto considerado é uniaxial, então as deformações ε_y e ε_z são provocadas unicamente pelo efeito de Poisson, o qual pode ser escrito como

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = - \nu \varepsilon_x \quad (3.25)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson, uma característica do material, quando dentro do campo elástico.

No caso de um estado de tensões não uniaxial devemos usar a lei de Hooke generalizada, a qual incorpora o efeito de Poisson sobre as deformações nos três eixos, na forma

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) / E \\ \varepsilon_y &= (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)) / E \\ \varepsilon_z &= (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) / E \end{aligned} \quad (3.26)$$

sendo válida para um estado de tensões genérico. Para as tensões cisalhantes, temos uma similaridade direta com a lei de Hooke para as tensões normais, contudo sem a ocorrência de um acoplamento entre as várias direções, como evidenciado pelo efeito de Poisson. Sendo γ a deformação cisalhante, que pode ser a deformação no plano xy , xz ou yz e τ a tensão cisalhante associada ao plano correspondente, a lei de Hooke fica neste caso expressa por

$$\gamma = \tau / G \quad (3.27)$$

onde G é o módulo de elasticidade transversal do material, que é correlacionado com o módulo de elasticidade e com o coeficiente de Poisson, pela equação:

$$G = E / (2 (1 + \nu)) \quad (3.28)$$

Se o limite elástico do material for ultrapassado, as deformações passam a ter uma parcela elástica e uma parcela plástica, onde o efeito de Poisson deve ser considerado separadamente sobre cada uma das parcelas, pois o coeficiente de Poisson no regime plástico é diferente do coeficiente no regime elástico. Pelo mecanismo microscópico de deformação plástica, esta processa-se praticamente a volume constante, o que leva a um coeficiente de Poisson de 0,5 para as parcelas plásticas de deformação. Assim, as deformações devem ser decompostas nas suas parcelas elásticas e plásticas, cada uma afetada por um valor do coeficiente de Poisson. Para um estado uniaxial de tensões, com ε_{xe} e ε_{xp} , sendo respectivamente as parcelas elástica e plástica da deformação total ε_x , a deformação transversal ε_y que é provocada por ε_x será:

$$\varepsilon_y = - (\nu \varepsilon_{xe} + 0,5 \varepsilon_{xp}) \quad (3.29)$$

Para a maioria dos materiais metálicos o coeficiente de Poisson, no regime elástico, apresenta um valor que tipicamente está na faixa de 0,28 a 0,35, sendo usual adotar um valor de 0,3 ou 1/3, quando não é conhecido o coeficiente para o material em consideração.

EXEMPLO 3.3.

Considerando a equação (3.29), podemos definir um coeficiente de Poisson efetivo, como sendo a relação entre as deformações totais, nos eixos de interesse. Deste modo, sendo ν_{eq} este valor do coeficiente de Poisson, o seu valor depende da relação entre as parcelas elásticas e plásticas das deformações. Assim quando a deformação plástica for nula, $\nu_{eq} = \nu$, e quando a deformação plástica for muito maior do que a parcela elástica, $\nu_{eq} = 0,5$. A tabela abaixo mostra este comportamento, assumindo $\nu = 0,30$.

$\varepsilon_p / \varepsilon_e$	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
ν_{eq}	0,318	0,333	0,367	0,400	0,433	0,467	0,482

O estado de tensões em um dado ponto do material, quando no regime elástico, fica definido em função do carregamento aplicado, para satisfazer as condições de equilíbrio, e também pelas restrições à deformação, função da distribuição de material, podendo fazer com que surjam tensões em direções outras que as das tensões provocadas pelo carregamento, conforme pode ser desprezado das equações (3.26). Neste sentido, duas situações particulares, de grande importância na análise de problemas práticos, se colocam, que são os estados ditos plano de tensões e plano de deformações, EPT e EPD.

Um estado de tensões é denominado de plano de tensões, quando as tensões atuantes no ponto considerado situam-se num único plano, ou seja, se estamos analisando o plano xy , as únicas tensões existentes são as tensões normais σ_x e σ_y , e a tensão cisalhante no plano, τ_{xy} , sendo as outras componentes de tensão necessariamente nulas. Este estado de tensões é facilmente encontrado em problemas reais, como em pontos sobre a superfície externa do material, quando a peça não está sujeita a um carregamento superficial no ponto considerado. Deste modo, todos os pontos situados na superfície de componentes estruturais estão em um estado plano de tensões, respeitando a restrição da ausência de cargas de superfície. Para pontos internos ao material, esta situação pode ocorrer desde que não exista restrição à deformação transversal, ε_z , pois mesmo sendo a tensão transversal σ_z igual a zero, no estado plano de tensões, as tensões normais existentes no plano provocam o desenvolvimento da deformação ε_z , pelo efeito de Poisson. Assim, para que pontos internos ao material estejam em um estado plano de tensões, ou de uma forma abreviada, EPT, a peça deve ser relativamente fina, para que o material existente não venha a restringir o desenvolvimento da deformação transversal. Esta é uma situação que ocorre em peças fabricadas a partir de chapas finas, por exemplo. Deve ser salientado que o conceito de espesso ou fino tem uma interpretação relativa, quanto às outras dimensões da peça, pois pode ocorrer que uma peça com 1 mm de espessura não possa ser considerada fina, quando na presença de um detalhe com 0,1 mm de raio, por exemplo.

Quando não podemos caracterizar para os pontos no interior do material um EPT, ou seja, se existe uma restrição à deformação transversal, desenvolve-se dentro do material uma tensão transversal σ_z . Esta situação atinge uma condição limite quando a peça é bastante espessa, onde o volume de material adjacente ao ponto considerado restringe totalmente a deformação transversal, ou seja, ε_z é igual a zero. Nesta situação temos apenas deformações ocorrendo nas direções x e y , sendo denominada de estado plano de deformações, EPD. Quando ocorre um estado plano de deformações, geralmente em pontos internos ao material, surge a tensão transversal σ_z , que é decorrência do efeito de Poisson, como podemos ver das equações (3.26). Se fizermos a deformação transversal igual a zero, resulta

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.30)$$

que é a tensão que deve se desenvolver, como consequência da restrição à deformação, pelo volume de material que envolve o ponto considerado. Esta condição, de um EPD, desenvolve-se dentro do material, em peças espessas e também em peças onde se tem significativas descontinuidades geométricas, ou seja, pontos com elevado efeito de concentração de tensão.

3.4 - MODELOS DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

É necessário, para a realização de uma análise de tensões, adotar um modelo para a curva tensão-deformação, que deve ser adequado ao tipo de análise a ser realizada. Assim, partimos dos modelos mais simples, como o de um material perfeitamente elástico, ou o de um material rígido-plástico, chegando a um modelo de um material com encruamento potencial, passando pelos modelos de um material elasto-plástico ideal e de um material com encruamento linear. A figura 3.13 ilustra os modelos mais usados para uma análise de tensões.

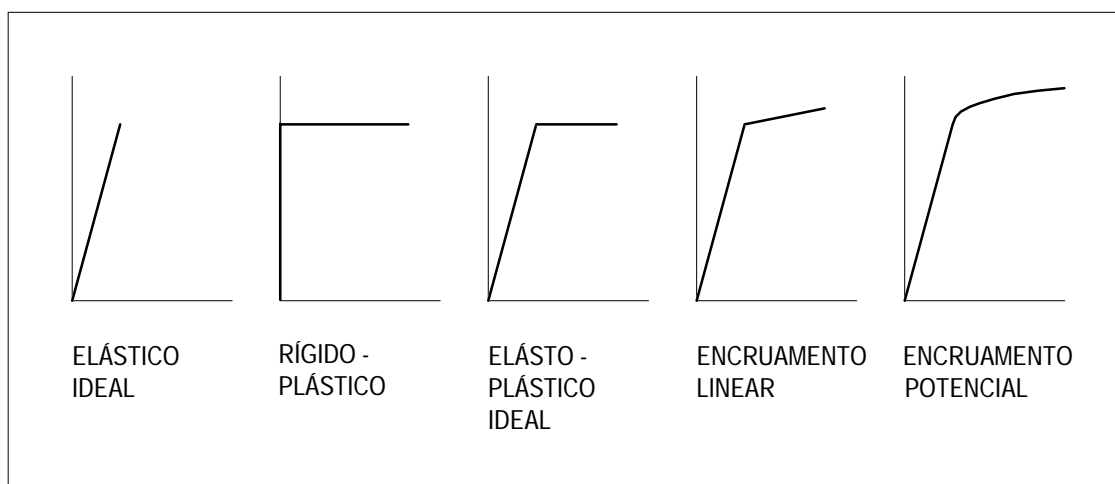


Figura 3.13 - Curvas tensão-deformação segundo modelos normalmente usados para uma análise plástica.

Para um material idealizado como elástico ideal é lógico que o modelo deverá ser usado dentro dos limites do comportamento elástico do material real. Para uma análise plástica, os modelos mais simples para idealizar a curva tensão-deformação do material, são o de um material elasto-plástico ideal e o de um material rígido-plástico. Este último é uma simplificação do primeiro, aplicável quando temos elevados níveis de deformação plástica, de modo que seja possível desprezar a parcela elástica da deformação. A idealização do material como tendo um encruamento linear já é uma melhor aproximação para os materiais reais, que apresentam encruamento, do que a de um material elasto-plástico ideal. No caso de muitos materiais metálicos a curva tensão-deformação fica caracterizada por um comportamento chamado de encruamento potencial, expresso pela equação abaixo:

$$\sigma = k \varepsilon^n \quad (3.31)$$

onde

n - expoente do encruamento

k - coeficiente de resistência

σ - tensão real

ε - deformação real.

O gráfico em escalas logarítmicas da curva tensão-deformação real, a partir do início do escoamento, resulta numa linha reta se a equação (3.31) for satisfeita pelo material. A inclinação desta reta é n , e k é a tensão real para o ponto onde $\varepsilon = 1,0$.

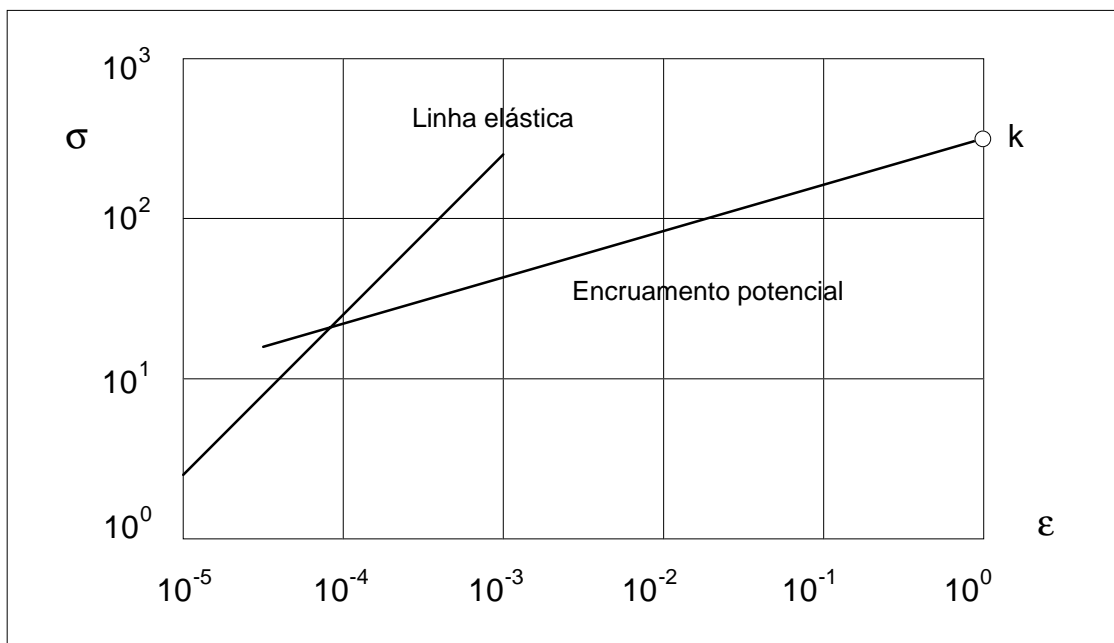


Figura 3.14 - Diagrama tensão-deformação para um material com encruamento potencial, em escalas logarítmicas.

Os valores de n variam desde $n = 0$, caracterizando um sólido perfeitamente plástico, $\sigma = k$, onde k é interpretado como a tensão limite de escoamento do material, até $n = 1$, que caracteriza um sólido perfeitamente elástico, $\sigma = k \varepsilon$, onde k agora representa o módulo de elasticidade do material. Deste modo, o expoente de encruamento situa-se no intervalo $(0 ; 1)$, enquanto que o coeficiente de resistência está no intervalo $(\sigma_E ; E)$. Para a maioria dos metais os valores de n estão situados entre 0,1 e 0,5. A Tabela 3.3 mostra valores de n e k para alguns materiais de uso comum.

A equação (3.31) nem sempre fornece resultados que são coerentes com os experimentos. Desta forma, outros modelos foram sugeridos e a seguir estão apresentadas algumas equações que também podem representar os resultados dos ensaios de forma condizente, como:

$$\sigma = k (\varepsilon_o + \varepsilon_p)^n$$

onde ε_0 é a deformação que o material sofreu antes do ensaio, em um processo de trabalho a frio, como por exemplo trefilação ou laminação, e ε_p é a parcela plástica da deformação. Outra possibilidade é usar a expressão

$$\sigma = \sigma_E + k \varepsilon_p^n \quad (3.32)$$

TABELA 3.3

Parâmetros para a curva tensão-deformação com encruamento potencial.

Material	Condição	n	k [MPa]
Aço 0,05% de C	Recozido	0,26	541
Aço SAE 4340	Recozido	0,15	654
Aço 0,6% de C	Temp. rev. 538-C	0,10	1600
Aço 0,6% de C	Temp. rev. 704-C	0,19	1250
Cobre	Recozido	0,54	330
Latão	Recozido	0,49	920

O modelo da curva tensão-deformação com encruamento potencial pode ser posto na forma abaixo, onde agora apenas a parcela plástica da deformação é que faz parte da equação (3.31), sendo a parcela elástica dada pela lei de Hooke. A deformação total é dada pela soma das duas parcelas de deformação:

$$\varepsilon = \sigma / E + (\sigma / k)^{1/n} \quad (3.33)$$

Podemos mostrar que a tensão que delimita o regime elástico do regime plástico, quando é usado o modelo de encruamento potencial, que pode ser pensada como a tensão limite de elasticidade, σ_e , é obtida da intersecção da porção plástica da curva tensão-deformação com a linha do comportamento elástico, resultando

$$\sigma_E = (k / E^n)^{1/1-n} \quad (3.34)$$

ou então, pelo uso da definição convencional da tensão limite de escoamento, usando o valor $\varepsilon_p = 0,002$ na equação (3.33).

Em muitas situações de análise plástica é usado o modelo de um material elasto-plástico ideal, pela simplicidade que apresenta. Quando os materiais reais apresentam encruamento, é possível ainda usar o modelo elasto-plástico ideal, onde a tensão de escoamento é

substituída pela tensão limite de análise plástica, σ_L , definida como a média aritmética entre σ_E e σ_R do material. Assim é considerado, de um modo aproximado, o encruamento que o material real apresenta.

3.5 - ENSAIO DE IMPACTO

Existem materiais intrinsecamente frágeis, como por exemplo o ferro fundido, pois em aplicações práticas sempre rompem de um modo frágil. Existem outros metais que podem apresentar uma ruptura dútil ou frágil quando em serviço. Dentre estes, os aços ferríticos são os mais importantes e possuem um comportamento muito variável quanto à forma de fratura, dependendo de muitos fatores. Assim, um aço de baixo carbono, normalizado, é dútil sob a ação de um carregamento uniaxial, como no ensaio de tração. Este mesmo aço torna-se frágil quando na presença de entalhes, baixas temperaturas, sob impacto ou ainda sob um estado triaxial de tensão. Para outros materiais, em especial os com estrutura cristalina cúbica de face centrada, como os aços austeníticos, o comportamento à fratura pode ser previsto a partir das propriedades de tração. Se for frágil no ensaio de tração, será frágil com entalhe, e se for dútil no ensaio, também será dútil com um entalhe, exceto no caso de entalhes muito agudos ou profundos. Mesmo baixas temperaturas não alteram este comportamento.

Para os materiais com comportamento semelhante ao dos aços ferríticos, os ensaios de impacto são muito úteis, pois indicam, ao menos de forma orientativa, o grau de ductilidade. Estes materiais possuem um comportamento complexo, difícil de prever com exatidão, estando sujeitos a uma transição de comportamento. Devido a estes fatos, a maior parte dos estudos, sobre a fratura frágil, foram feitos com estes materiais. O parâmetro que caracteriza a resistência à ruptura do material é a tenacidade. Esta é definida como a energia específica absorvida durante o processo de ruptura. Assim, uma fratura dútil é caracterizada por uma grande absorção de energia, o que se traduz em uma tenacidade elevada. Uma fratura frágil possui uma baixa absorção de energia e logo baixa tenacidade.

Em alguns casos a tenacidade pode ser facilmente obtida, como por exemplo em uma barra de seção uniforme tracionada. A tenacidade é fornecida pela área sob a curva tensão-deformação, que representa a energia absorvida por unidade de volume da barra. Infelizmente a tenacidade volumétrica, medida desta maneira, não se correlaciona com a resistência à fratura em serviço. Isto ocorre porque no ensaio de tração grande parte da energia consumida é utilizada para colocar o material em condições de iniciar a ruptura, ou seja, em um nível de deformações plásticas suficiente para iniciar o processo de ruptura.

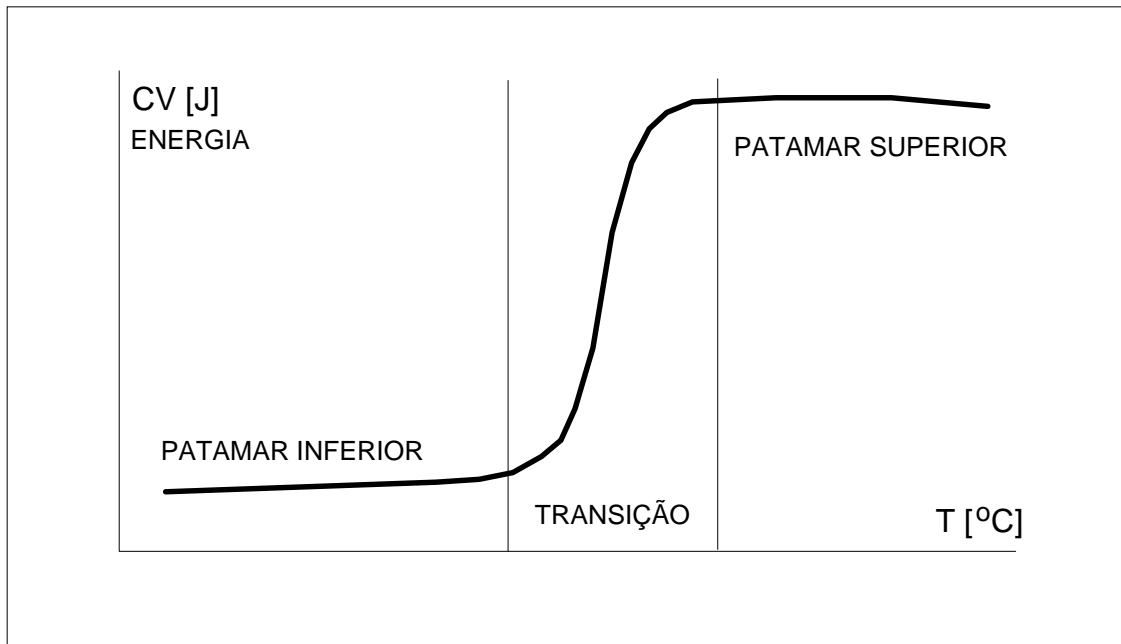


Figura 3.15 - Curva típica CV versus temperatura, para aços carbono e baixa liga.

No caso de uma ruptura em serviço, temos uma falha que geralmente inicia a partir de um defeito pré-existente, o que nos corpos de prova de tração não ocorre. Assim, é necessário distinguir entre a tenacidade volumétrica, medida no ensaio de tração, e a tenacidade superficial, medida como a energia consumida no aumento da área rompida, pela propagação da fissura, a partir do defeito inicial. Esta tenacidade é denominada de tenacidade à fratura. Em aplicações práticas esta última é que tem importância. A tenacidade volumétrica é de interesse em situações onde é necessário estimar a capacidade de absorção de energia por uma estrutura homogênea. A tenacidade à fratura é fundamental para a análise ou previsão de falhas.

Em componentes isentos de defeitos, a energia para a ruptura é elevada, já que deve-se dispendir uma grande parte desta energia para a formação da trinca, enquanto o restante é consumido para a sua propagação. Assim, em elementos estruturais que habitualmente possuem falhas e defeitos, que podem ser pensados como trincas, a falha ocorre quando energia suficiente é fornecida para propagar a trinca já existente. Em vista disto, muitos testes de tenacidade são realizados com corpos de prova já fissurados, medindo-se a energia, por unidade de área rompida, que o material consome durante a sua fratura. A fissura inicial reduz a energia necessária para a ruptura, bem como causa um estado triaxial de tensões de tração elevado, o que eleva a temperatura de transição do material.

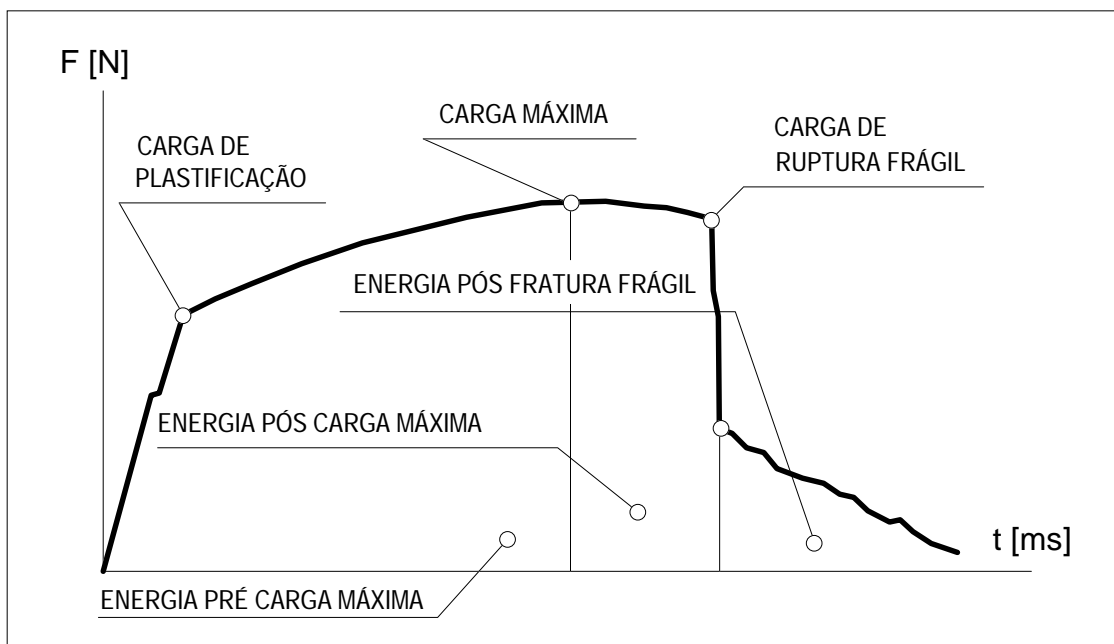


Figura 3.16 - Curva típica força versus tempo no ensaio Charpy.

ENSAIO CHARPY

Para os materiais com transição no comportamento dútil-frágil os ensaios de impacto são muito úteis, sendo o ensaio com corpo de prova Charpy com entalhe em V o mais difundido, estando incluído em muitas especificações de projeto e controle de qualidade. O entalhe provoca restrições à deformação em direções perpendiculares à direção da máxima tensão principal, ou seja, um estado triaxial de tensões, com um efeito também de concentração de tensão. O ensaio Charpy mostrou-se valioso para verificar a suscetibilidade dos aços à fragilização na presença de entalhes, embora o teste não possa ser usado diretamente para assegurar o desempenho da estrutura em serviço. A figura 3.17 ilustra o princípio do ensaio e a geometria do corpo de prova Charpy com entalhe em V.

A aplicação da carga de impacto é feita por um pêndulo que é deixado cair e, após a ruptura do corpo de prova, é determinada a energia absorvida na fratura do material. Esta energia, em Joules [J], é a medida da tenacidade Charpy do material. Os ensaios são feitos a diversas temperaturas para o corpo de prova e assim é obtida a influência desta sobre a tenacidade do material ensaiado. Para os materiais fragilizáveis existe uma faixa de temperatura em que ocorre a transição no modo de fratura. Esta transição é detectada por uma queda brusca na tenacidade, ou seja, o material passa a romper de um modo predominantemente frágil. A figura 3.18 mostra uma curva da tenacidade contra a temperatura para um aço de baixa liga. Deve-se observar que a tenacidade medida pelo ensaio Charpy é distinta da tenacidade volumétrica, medida pelo ensaio de tração, bem como é distinta da tenacidade superficial, medida pelos ensaios de K_{IC} .

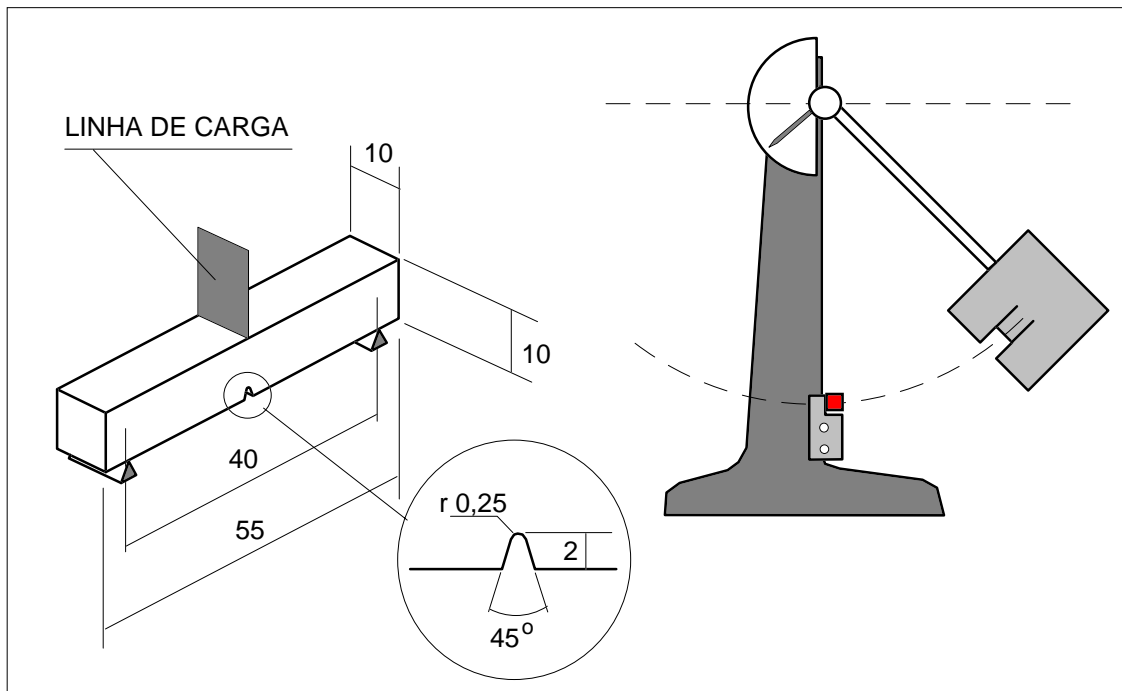


Figura 3.17 - Corpo de prova Charpy com entalhe em V e princípio do ensaio.

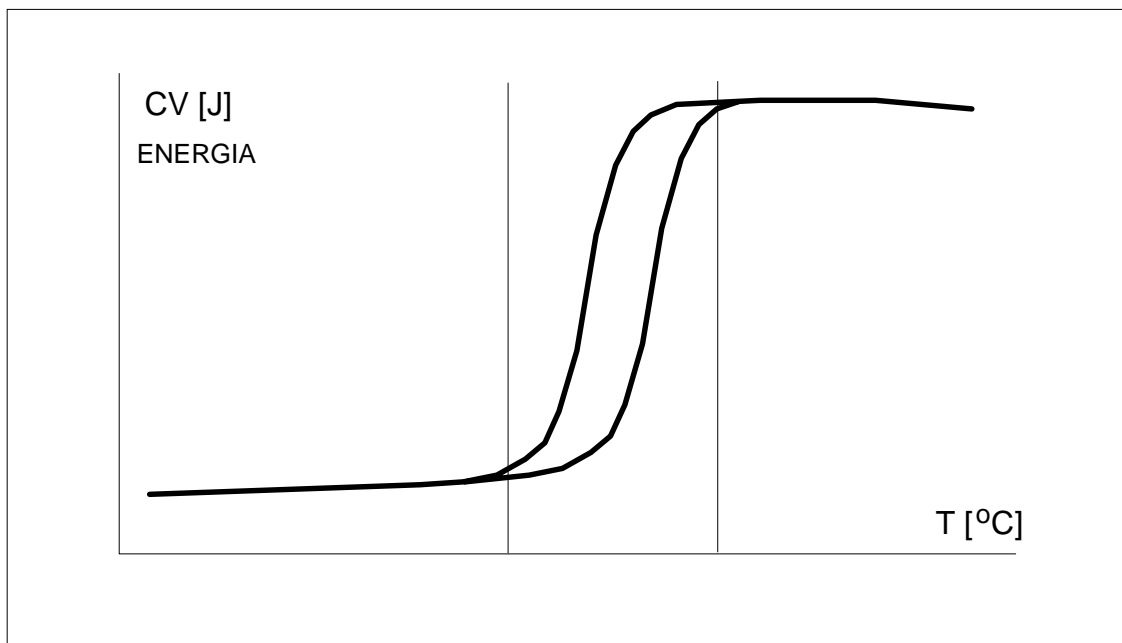


Figura 3.18 - Curva tenacidade versus temperatura para um aço 4137 H.

Existem ao menos três métodos para avaliar o grau de fragilização que o material sofre, a uma dada temperatura de ensaio. A energia consumida na ruptura, conforme já citado, é um deles. A aparência da

fratura fornece meios para avaliar a tenacidade do material, pois quanto maior a área que rompeu por clivagem, menor a energia absorvida na ruptura do corpo de prova, visto que a fratura dútil absorve muito mais energia por unidade de área. Assim, a inspeção do aspecto da superfície rompida fornece informações relevantes. Finalmente, a deformação plástica decorrente da fratura dútil provoca uma contração lateral na zona de entalhe, que fica tracionada, e uma expansão lateral no lado oposto, onde o material fica comprimido.

Não existem apenas estes métodos para medir o efeito de fragilização do material por efeito da temperatura, mas, em geral, a transição dútil-frágil baseada em um único tipo de medida não é suficientemente abrupta de forma a definir claramente uma temperatura específica. Por esta razão foram propostas vários critérios para definir o valor da temperatura de transição, seja pela energia absorvida, seja pela aparência da ruptura. Alguns destes critérios estão descritos a seguir.

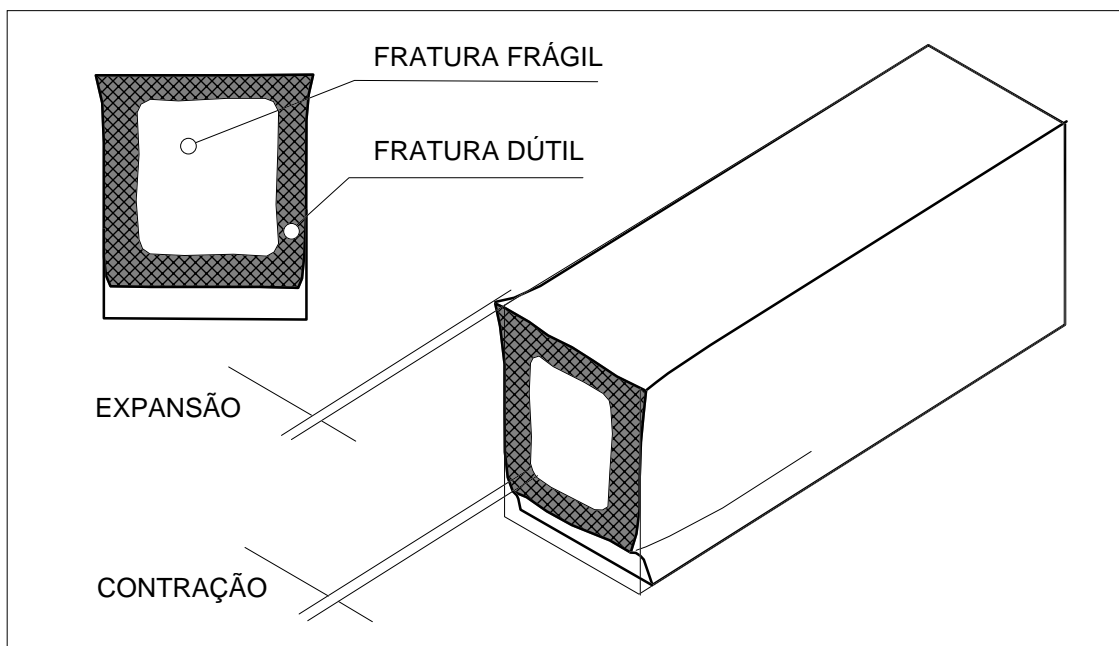


Figura 3.19 - Aspecto de seção rompida do corpo de prova Charpy, indicando as diferentes regiões da superfície rompida e a deformação lateral de contração junto ao entalhe e de expansão no topo do corpo de prova.

CRITÉRIOS BASEADOS NA ENERGIA DE TRANSIÇÃO

- A temperatura na qual a curva energia-temperatura intercepta o nível de 20J (15 lb.ft).

- A temperatura na qual a curva intercepta o nível de 55J (40 lb.ft).
- Energia média de transição. A temperatura correspondente ao valor médio entre os limites máximo e mínimo de energia absorvida nos ensaios.

CRITÉRIOS BASEADOS NA APARÊNCIA DA FRATURA

- A mínima temperatura na qual é ocorre uma ruptura 100% dútil.
- A máxima temperatura na qual é obtida uma ruptura 100% frágil.
- A temperatura na qual 50% de ruptura dútil é obtida.

A temperatura determinada por qualquer um destes critérios deve ser comparada apenas com dados obtidos com o mesmo tipo e tamanho do corpo de prova. Em muitas aplicações é dada importância fundamental à temperatura máxima do nível inferior da curva da energia, ou seja, à temperatura em que a tenacidade começa a subir. Este valor particular parece ser menos sensível aos métodos de ensaio do que os outros critérios. Como esta é a temperatura abaixo da qual o aço não se deforma plasticamente na presença de um entalhe, é referida como temperatura de transição para ductilidade nula, usualmente NDT, (Nil Ductility Temperature).

No ensaio de impacto a energia absorvida do pêndulo é usada para:

- Iniciar a fissura no fundo do entalhe;
- Propagar a fissura no restante da seção;
- Deformar os pontos de contato com o corpo de prova;
- Acelerar a massa do corpo de prova;
- Vencer a resistência do ar e dos mancais.

Apenas os dois primeiros itens são relevantes nos materiais tenazes. Para os materiais frágeis, a parcela de energia combinada pelos outros fatores pode ser uma porcentagem sensível da energia total. Em ensaios normais, não há preocupação sobre as diferentes parcelas no consumo de energia, sendo considerada apenas a energia total absorvida do pêndulo. Os dois últimos itens são considerados pela calibração da escala de leitura

A curva de energia apresenta três regiões características: o patamar inferior de energia, a região de transição e o patamar superior, conforme figura 3.15. No patamar inferior temos uma ruptura frágil, geralmente por clivagem, ficando limitado pela temperatura de referência, NDT. Esta temperatura em geral situa-se na faixa de 10% a 20% da temperatura absoluta de fusão. No patamar inferior temos uma nucleação frágil da fissura e uma baixa energia para a sua propagação, com um conseqüente comportamento frágil. Na região de transição ocorre um modo misto de ruptura, parte da superfície com uma fratura plana e parte por cisalhamento. A ruptura por cisalhamento consome uma grande fração da energia. Para temperaturas ainda maiores atingimos o patamar superior de energia, onde o material é

perfeitamente dútil, com a ruptura ocorrendo quase que inteiramente por cisalhamento. Aqui temos dificuldade de formação da trinca, exigindo altos níveis de deformação plástica; a propagação também é dificultada. A figura 3.20 mostra as curvas carga-deslocamento em cada uma das diferentes regiões.

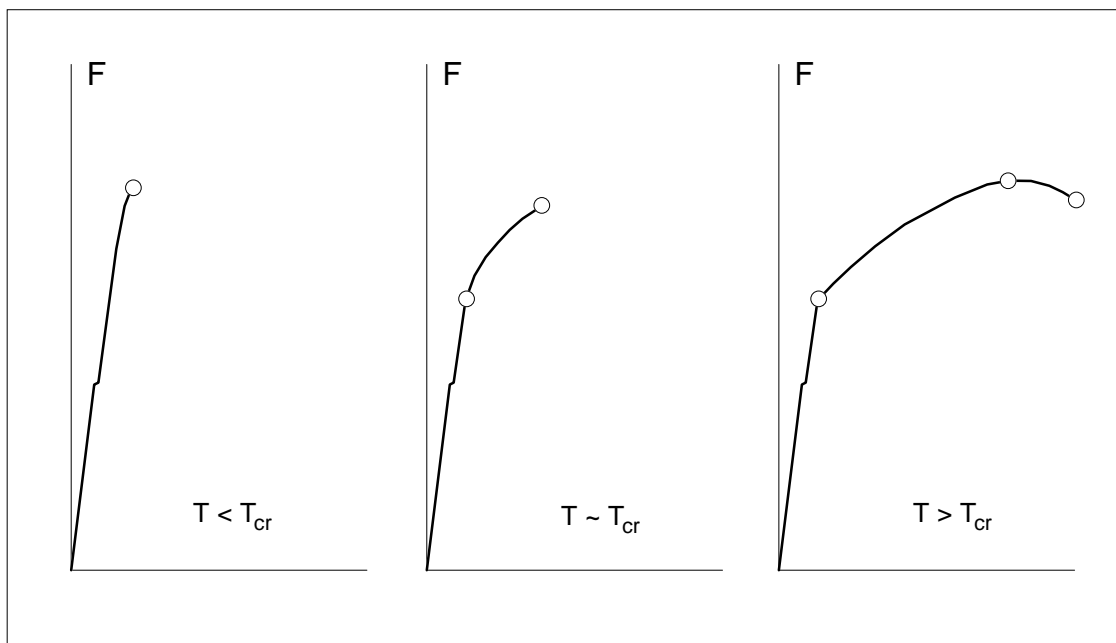


Figura 3.20 - Curvas carga-deformação versus temperatura.

Como o ensaio Charpy não permite prever diretamente o tipo de comportamento em serviço, se dútil ou frágil, dos aços usados em componentes de grandes estruturas, os testes devem ser usados comparativamente, como testes de recepção ou testes para identificar diferentes lotes de um mesmo aço, ou ainda para selecionar um aço dentre vários, quando a correlação do resultado do ensaio com o comportamento em serviço esteja estabelecida e seja confiável. A temperatura de transição para a estrutura não coincide com a temperatura obtida pelo ensaio dos corpos de prova Charpy, pois a geometria do entalhe é diferente, bem como o volume de material envolvido. Por outro lado, a simples realização de análises químicas, ensaios de tração e de dureza podem deixar de indicar a influência de alguns importantes fatores de processamento e fabricação que afetam a suscetibilidade à fratura frágil. De uma forma resumida, o ensaio Charpy vale como uma indicação qualitativa a respeito do comportamento dútil-frágil, falhando no aspecto quantitativo. As limitações que o ensaio Charpy apresenta podem ser listadas como:

- Difícil de correlacionar com o comportamento real em serviço. É usado principalmente na comparação de diferentes tratamentos e materiais.

- Corpo de prova pequeno, não sendo desta forma representativo da heterogeneidade que a estrutura real possui.
- Não é aplicável para aços de alta resistência e para ligas não ferrosas, pois apresentam um valor da energia absorvida muito baixo.
- O ensaio não separa a energia de nucleação e a energia de propagação. Em serviço a ruptura é formada apenas pela propagação, pois a trinca inicial já existe, decorrente de um problema de fadiga, corrosão ou outros mecanismos metalúrgicos, ou mesmo devido a falhas no próprio processo de fabricação.

MODIFICAÇÕES DO ENSAIO CHARPY

Para permitir uma análise mais rigorosa sobre o comportamento real do material, o ensaio Charpy deve ser modificado. Além do ensaio tradicional duas formas derivadas são atualmente mais usadas.

Uma primeira modificação é sobre o corpo de prova, o qual é pré fissurado por fadiga antes de ser submetido ao ensaio de impacto. Isto faz com que o material tenha agora uma trinca aguda, originada no fundo do entalhe, e não mais um raio de concordância no ponto mais solicitado. Assim, a condição que o material apresenta em uma aplicação real fica muito melhor caracterizada pelo corpo de prova e o resultado do ensaio será exclusivamente a energia necessária para propagar a trinca, inexistindo assim a energia de nucleação.

Outra modificação é agora a de instrumentar a máquina de ensaio, no sentido de permitir o registro de um diagrama de carga-deslocamento, como o ilustrado na figura 3.16. Este registro permite assim obter todos os valores mostrados na figura, viabilizando uma análise bastante criteriosa dos resultados do ensaio. O ensaio Charpy instrumentado pode ser feito usando um corpo de prova padrão ou um corpo de prova pré-fissurado.

3.6 - MODELO PARA A TRANSIÇÃO DÚTIL-FRÁGIL

Para explicar a diferença de comportamento de um mesmo material, quanto à energia absorvida na ruptura, várias experiências mostraram a existência de duas tensões que fornecem as características de fratura do material. Estas tensões são:

Uma tensão, σ_{cl} , que produz uma fratura frágil, pela separação ao longo de um plano cristalográfico, pela perda de coesão entre os átomos. É a tensão em que ocorre a ruptura por clivagem.

Uma tensão, σ_{eq} responsável pelo início do escoamento, pelo movimento de discordâncias segundo um dos planos cristalográficos da estrutura do metal. Esta tensão provoca a falha por deformação plástica.

A tensão σ_{eq} pode ser encarada como a tensão principal que corresponde ao início de escoamento do material, que é coincidente com σ_E no caso de um estado uniaxial de tensões.

A tensão de ruptura das ligações atômicas, σ_{cl} , não depende da temperatura, tendo um valor constante. Tal não ocorre com a outra tensão, σ_{eq} , que varia inversamente com a temperatura absoluta, pois o movimento de discordâncias é mais fácil de ocorrer a altas temperaturas do que a baixas. Esta tensão é a tensão principal σ_1 na qual o escoamento tem início. A figura 3.21 mostra a variação destas tensões com a temperatura.

O ponto de intersecção das duas curvas determina a temperatura crítica, acima da qual a falha será por escoamento e portanto com apreciável deformação plástica. Se a temperatura for inferior a T_{cr} , a ruptura ocorre porque a tensão aplicada ultrapassou σ_{cl} , sendo então a falha uma fratura frágil. Na realidade a transição entre uma falha por fratura frágil e dútil não ocorre bruscamente, mas dentro de uma faixa de temperaturas, conforme visto na figura 3.18.

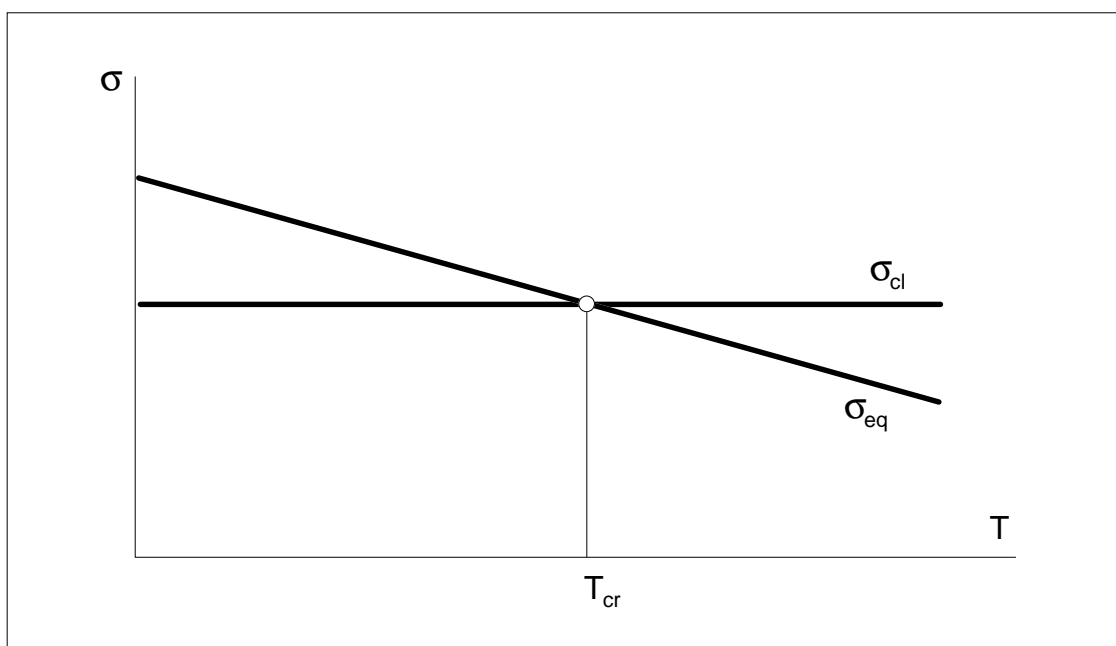


Figura 3.21 - Tensões características de falha.

EFEITO DA VELOCIDADE DE CARREGAMENTO

Com um carregamento que é aplicado mais rapidamente, a resistência ao escoamento do material aumenta, logo é esperado um aumento de σ_{eq} com a velocidade de carga. Assim a curva de σ_{eq} se

move para a direita e, portanto, o ponto de intersecção com σ_{cl} se translada para maiores temperaturas. Deste modo um carregamento por impacto pode provocar uma ruptura frágil, em um material que é dútil normalmente. É o que ocorre com o zinco, que pode ser fletido sob uma deformação lenta, embora com velocidade normal seja extremamente quebradiço.

EFEITO DO ESTADO DE TENSÕES

Num estado tridimensional de tensões, embora a tensão de cisalhamento necessária para o deslizamento dos planos atômicos não seja afetada, a tensão normal necessária para obtermos este será maior, desde que todas as tensões no ponto sejam de tração. Assim, os valores de σ_{eq} aumentam e a curva se move para a direita, aumentando a temperatura crítica. Quando as tensões no ponto são de compressão, e é aplicada uma tensão externa de tração, com pequenos valores desta tensão de tração já ocorrem valores da tensão tangencial que ultrapassam o valor crítico, escoando a peça; portanto a curva de σ_{eq} fica deslocada para a esquerda, diminuindo a temperatura crítica. Estados de tensão não uniaxiais são obtidos em reservatórios e corpos entalhados, em que a temperatura crítica é superior a de um corpo de prova liso.

EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO

Com o aumento dos grãos, a resistência à clivagem do aço diminui. Em consequência, para os aços com granulação grossa a reta de σ_{cl} está mais abaixo, o que corresponde a uma maior temperatura crítica do que para os aços com granulação fina. Com granulação fina, tem-se uma rede de contornos de grão muito mais intensa do que com granulação grossa. Os contornos de grão funcionam como barreiras para o crescimento das trincas de fratura, aumentando a resistência do material considerado.

EFEITO DO TAMANHO DO CORPO

Com o aumento das dimensões, pode-se esperar uma redução da resistência à clivagem σ_{cl} , ou seja, quanto à fratura frágil, pois a probabilidade de haver defeitos críticos aumenta com o volume. Por outro lado, um maior volume também reduz a tensão crítica de deslizamento, havendo assim efeitos contrários sobre a temperatura crítica. O resultado final depende da importância relativa deste dois fatores. As experiências com corpos cilíndricos lisos mostram que o efeito predominante é sobre a resistência coesiva, aumentando assim a temperatura crítica com um maior volume do corpo. Este fator deve ser considerado quando forem usados resultados de ensaios com corpos de prova pequenos em projetos com grandes dimensões.

EFEITO DO GRADIENTE DE TENSÕES

É fato sabido que na flexão o escoamento do material inicia com uma tensão sensivelmente superior à tensão de escoamento sob tração. Tal se explica porque na flexão a tensão de escoamento é atingida primeiro pelas fibras situadas mais distantes do eixo neutro, e a formação de planos de deslizamento nestas fibras é evitada em parte pela presença do material contíguo, sob tensões mais baixas. As fibras próximas ao eixo neutro podem suportar parte da carga das fibras mais afastadas, reduzindo a tensão real nas fibras externas. Este aumento de tensão de escoamento deve então ser considerado, ou seja, a curva de σ_{eq} é movida para cima, aumentando assim a temperatura crítica do material. Semelhante argumento pode ser aplicado nos casos de concentração de tensão produzidos por ranhuras ou concordâncias, sendo esperado um aumento da temperatura crítica para barras entalhadas. É importante a determinação correta de T_{cr} , a fim de se evitar situações perigosas, nas quais a temperatura crítica do material é a temperatura de serviço do equipamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para se ter uma margem de segurança suficiente deve-se usar materiais com uma baixa temperatura crítica. Esta pode ser reduzida não apenas pela alteração da composição química como, também, através de um tratamento térmico que refine o grão. As tensões aumentam nas reentrâncias e nas soldas mal feitas, contribuindo para uma maior temperatura de transição. Um aumento do tamanho da estrutura tem o mesmo efeito.