

ANEXOS

Anexo Um:

Elasticidade e Plasticidade avaliada através do ensaio de tração

- 1. Generalidades sobre o ensaio de tração**
- 2. Parâmetros Mensuráveis**
- 3. Variantes do Ensaio**
- 4. Fatores de Influência**
- 5. Bibliografia**



Anexo Um: Elasticidade e Plasticidade avaliada através do ensaio de tração

Este anexo visa apresentar algumas características mais aprofundadas relativas ao ensaio de tração, orientado para a aplicação de seus parâmetros no estudo da conformação plástica dos metais.

I.1 – Generalidades sobre o Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova de geometria definida, a um esforço crescente de tração, aplicado continuamente até a fratura e no simultâneo registro do alongamento em função da força aplicada, conforme exemplificado na figura I.1.

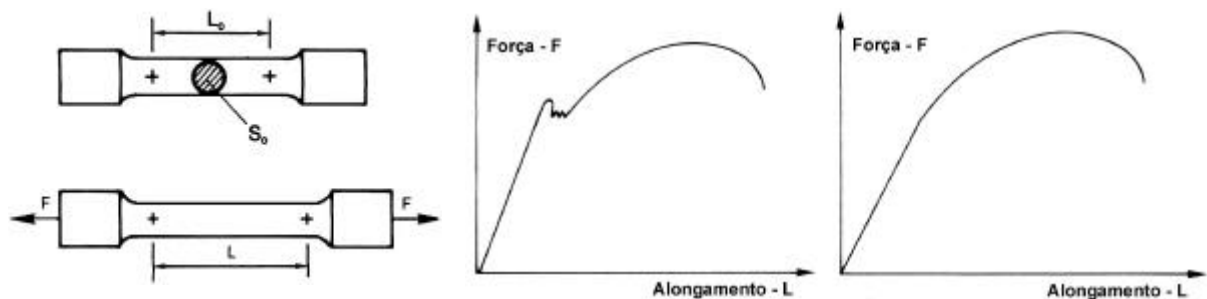


Figura I.1 – Exemplificação de um CP de tração (esquerda) e das respectivas curvas força versus alongamento obtidas.

O ensaio de tração é um dos ensaios destrutivos mais freqüentemente utilizado, quer por fornecer dados para projeto, quer para o controle de qualidade de materiais ou produtos.

A sua larga utilização deve-se à relativa facilidade de execução e à reprodutibilidade das propriedades medidas.

I.2 – Parâmetros Mensuráveis

Na curva tensão vs. deformação convencional pode-se distinguir diferentes fases de durante o ensaio, conforme mostrado na figura I.2:

- região de deformação uniforme;
- região de deformação plástica uniforme;
- região de deformação plástica;
- região de deformação localizada.

I.2.1 – Módulo de Elasticidade

Na primeira parte da curva, verifica-se proporcionalidade entre a carga e a deformação, ou seja, obediência à lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{I.1})$$

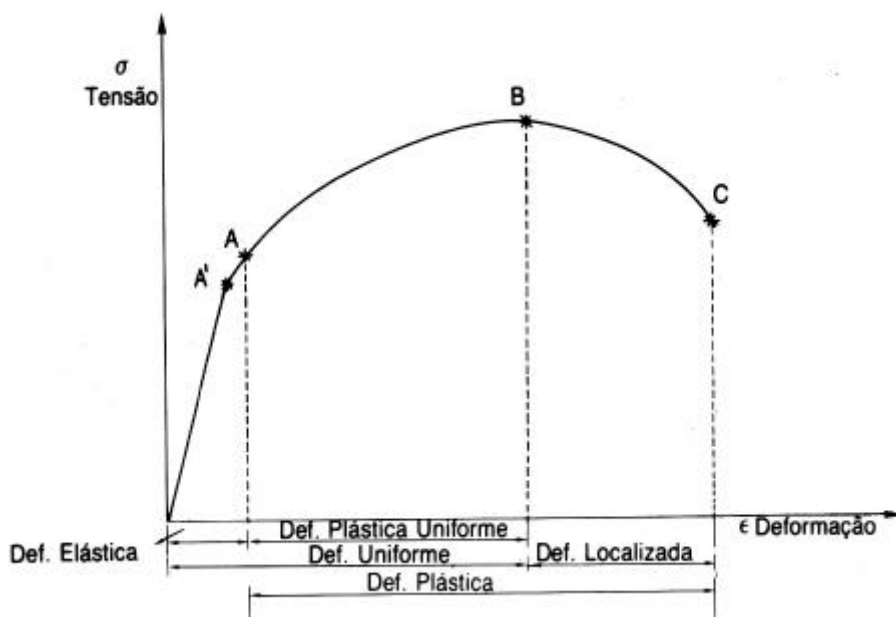


Figura I.2 –
Representação de um
digrama tensão vs.
deformação, com a
indicação das diferentes
fases do ensaio.

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mais constantes dos materiais.

- É determinado pelas forças de ligação entre os átomos.
- Ligeiramente afetado por introdução de elementos de liga, tratamento térmico ou deformação a frio.
- Bastante influenciado pela temperatura ($T \uparrow \Rightarrow E \downarrow$).
- Requer cuidados na medição devido a influência da rigidez da máquina (item 4.3).

I.2.2 – Tensão de Escoamento

Quando o material metálico passa a se deformar irreversivelmente diz-se que a tensão aplicada é a tensão de escoamento (σ_{YS} ou LE) ou simplesmente diz-se que foi atingido o limite de escoamento deste metal. O limite de escoamento é o principal parâmetro utilizado para o projeto de estruturas. O limite de escoamento pode ser contínuo ou descontínuo.

Escoamento Contínuo

Pode haver dificuldades em se determinar a tensão de escoamento quando não há escoamento descontínuo presente no material, conforme ilustra a figura I.3. Neste caso, pode-se:

- realizar carregamentos e descarregamentos (sem extensômetros);
- adotar a tensão correspondente a uma deformação permanente igual a uma percentagem da base do extensômetro (normalmente 0,2%, para materiais frágeis 0,1%), conforme mostrado na figura I.3.a;
- realizar um descarregamento e retirar a paralela a um percentual de deformação (para curvas pouco retilíneas) ou utilizar o módulo de elasticidade do material, conforme mostrado na figura I.3.b;
- Pode-se determinar por uma paralela do eixo de tensão, normalmente a 0,5%, para materiais muito macios (cobre puro ou ferro fundido cinzento).

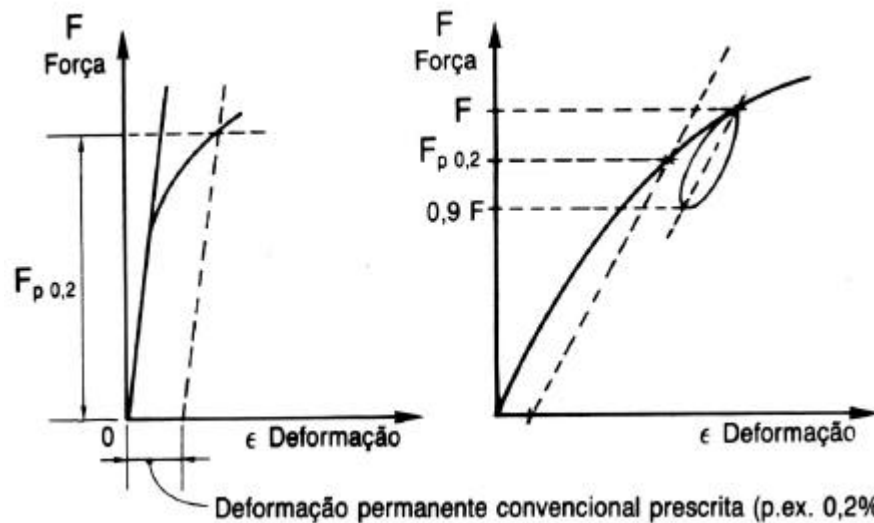


Figura I.3 – Metodologias de se determinar o limite de escoamento de um material que não apresenta este limite descontínuo: a esquerda, obtido por meio de uma paralela e à direita, obtido pelo descarregamento do material.

Escoamento Descontínuo:

O escoamento descontínuo pode ser verificado nas seguintes famílias de materiais: aços macios, Mo, Nb, ligas de Ti e de Al. Os fatores que intensificam são:

- bom acabamento superficial;
- bom alinhamento dos CP's;
- CP's cilíndricos;
- maiores velocidades de deformação e
- rigidez da máquina.

A figura I.4 ilustra curvas tensão vs deformação que apresentam escoamento descontínuo. Nestes casos o escoamento é muito bem determinado pela curva tensão vs. deformação. Algumas vezes, devem ser definidos dois limites de escoamento: um superior e outro inferior.

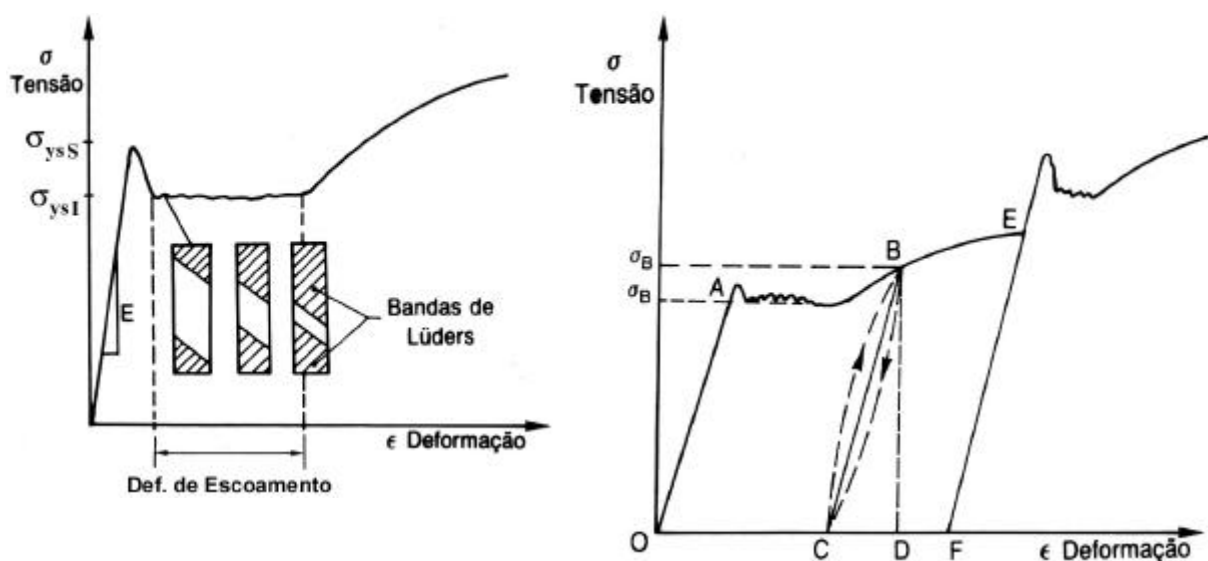


Figura I.4 – Curvas tensão vs. deformação: a esquerda associação com a formação de bandas de Lüders e à direita, associação com o fenômeno de envelhecimento.



Bandas de Piobert-Lüders

Fatores associados à formação de bandas de Lüders:

- sobreposta liberação de novas discordâncias dos empilhamentos formados pelo carregamento mecânico.
- Inicia-se em pontos de concentração de tensões (cabeça dos CP's).

Envelhecimento

Características do envelhecimento:

- Não há perda do encruamento;
- Ocorre difusão de átomos intersticiais;
- Muito sensível ao aumento de temperatura.

I.2.3 – Encruamento

Aumento da tensão aplicada na região de deformação plástica pela interação das discordâncias entre si ou com outras barreiras no metal, dificultando a sua movimentação. A figura I.5 ilustra este efeito sobre a curva tensão versus deformação. Durante a deformação plástica uniforme, o volume do CP permanece constante, assim:

$$S \cdot L = S_0 \cdot L_0 \quad (I.2)$$

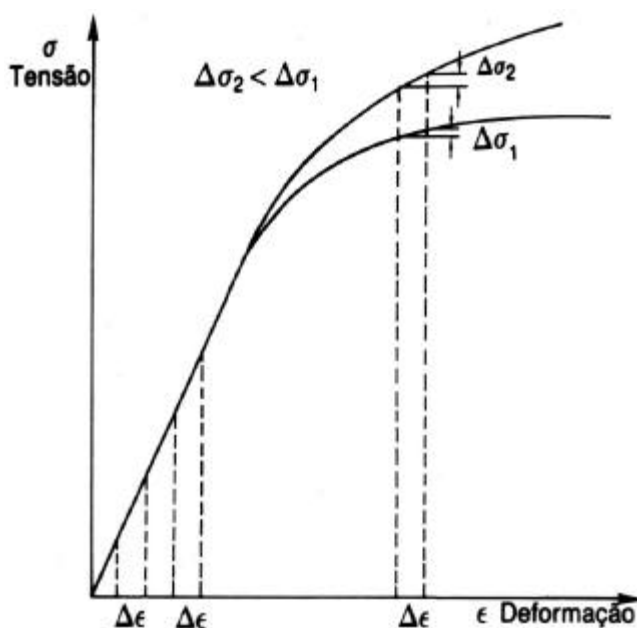


Figura I.5 – Efeito do encruamento de um material metálico sobre a curva tensão vs deformação.

O encruamento compensa a redução da seção do CP na região de deformação uniforme, entretanto ocorre uma concentração de deformação plástica que resultará numa redução de área (estricção). A forma usual de se quantificar o encruamento é através do coeficiente de encruamento “n”, conforme definido pela equação:

$$\sigma = k \epsilon^n \quad (I.3)$$

onde “n” é o coeficiente de encruamento e “K” é o coeficiente de resistência correspondente à tensão real para deformação real igual a um. Isto será novamente discutido no item I.3.1.



1.2.4 – Tensão de ruptura

Razão entre a carga máxima e a área inicial do CP, definida como:

$$\sigma_{\text{Rup}} = \sigma_{\text{máx}} = F_{\text{máx}} / S_0 \quad (\text{I.4})$$

Anteriormente era utilizado como critério de projeto em conjunto com grandes fatores de segurança. Atualmente este parâmetro é utilizado para materiais frágeis e na identificação, especificação e controle de qualidade de materiais. No caso de material para conformação mecânica, torna-se importante a relação entre limite de escoamento e tensão de ruptura:

$$\text{R.E.} = LE/LR = \sigma_{\text{máx}} / \sigma_{\text{YS}} \quad (\text{I.5})$$

1.2.5 – Medidas de ductilidade

São medições qualitativas e subjetivas:

- Indicam a capacidade de deformação de um material ao ser processado em operações de conformação (laminação, estampagem, extrusão, etc.);
- Oferecem indicações da segurança no projeto de uma estrutura que poderá deformar-se plasticamente sem romper;

Podem servir como um indicador do nível de impurezas ou condições de processamento, sendo obtidas após a fratura do CP em tração sendo medidas pela união das partes fraturadas. As duas mais conhecidas são o alongamento¹, definido pela equação (I.6) e a redução de área, definida pela equação (I.7).

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (\text{I.6})$$

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (\text{I.7})$$

Onde: L_0 e L_f são os comprimentos inicial e final das referências e A_0 e A_f as áreas inicial e final medidas cuidadosamente com o corpo de prova rejuntado manualmente após ruptura. Os valores de e_f e q são normalmente expresso em **porcentagem**.

Para se poder comparar alongamentos em CP's de geometria diferentes (L_0) deve-se respeitar um critério de similaridade (semelhança), dado que a extensão da estricção depende da secção do corpo de prova. A lei de Barba oferece a seguinte relação:

$$\frac{L_0}{L_0'} = \frac{S_0}{S_0'} = K, \text{ onde } K \approx 5,65 \quad (\text{I.8})$$

Por outro lado, algumas normas oferecem equações para a conversão de elongações obtidas com diferentes CP's, como por exemplo a ISO 2566/1 (equação I.9) e a ASTM A370 (equação I.10).

¹ Este termo é conhecido, também, por alongação.



$$e_f = 2e_{f0} \left(\frac{S}{L} \right)^{0,4} \quad (\text{I.9})$$

Onde o subíndice “0” corresponde ao CP proporcional segundo definido pela lei de barba ($L_0=5,65S_0$) e internacionalmente aceita com a melhor forma de se medir o alongamento. Esta fórmula, citada na norma ISSO 2566/1, é devida à Oliver (1928).

$$e_f = e_f' (4,47 S_0/L_0)^n \quad (\text{I.10})$$

onde e_f é a elongação de um CP cilíndrico com $\phi=12,7\text{mm}$ e $L_0=50\text{mm}$; e_f' é a elongação de um CP prismático com S_0 e L_0 .

I.2.6 – Resiliência

Capacidade de absorver energia quando deformado elasticamente (energia/vol.) e definida conforme mostrado na equação (I.11). A resiliência é uma propriedade importante em aplicações em que se deve evitar a deformação permanente. Nestes casos utiliza-se materiais com alta resiliência, como mostrado na figura I.6.

$$U = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (\text{I.11})$$

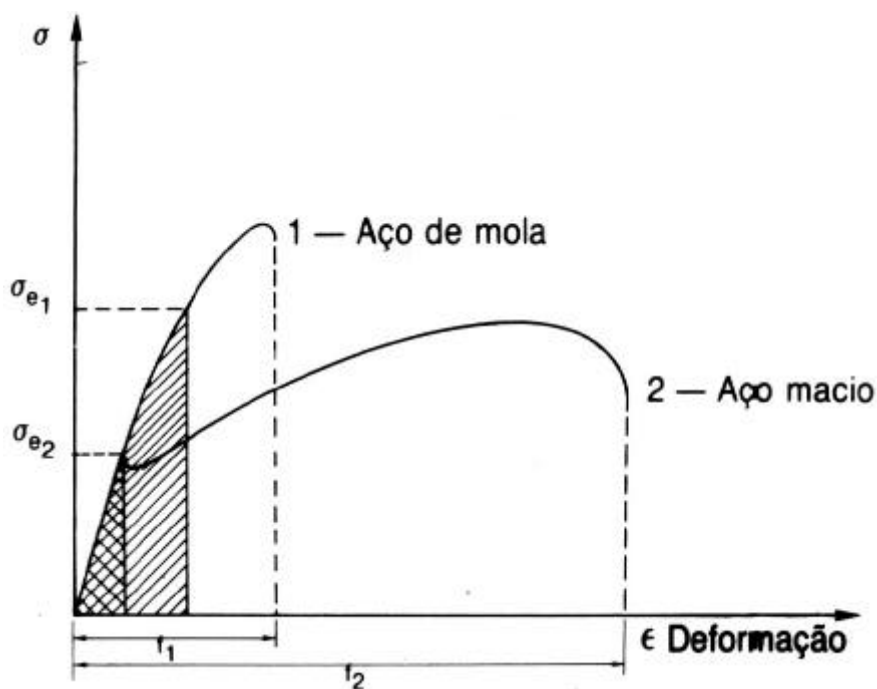


Figura I.6 – Comparação entre as curvas de tensão vs. Deformação de um material de alta resiliência e outro de maior ductilidade.

I.2.7 – Tenacidade

Capacidade de absorção de energia no regime plástico. Propriedade de difícil determinação. Considerada, geralmente, como a área sob a curva tensão-deformação em tração, conforme mostrado na figura I.7. Esta área é uma indicação da quantidade de trabalho suportado por um material antes de atingir a ruptura. A tenacidade pode ser aproximada pelas expressões (I.12) para materiais dúcteis e (I.13) para materiais frágeis.

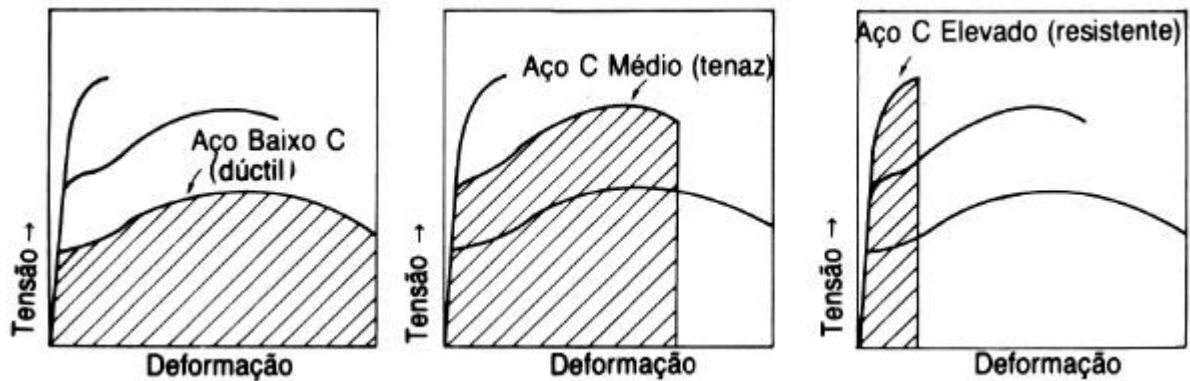


Figura I.7 – Variação de tenacidade entre materiais (da esquerda para a direita): muito dúctil, tenaz e resistente.

$$U_T \approx \sigma_{rup} \epsilon_{rup} \quad \text{ou} \quad U_T \approx (\sigma_{ys} \sigma_{rup})/2 \epsilon_{rup} \quad (I.12)$$

$$U_T \approx \frac{2}{3} \sigma_{rup} \epsilon_{rup} \quad (I.13)$$

I.3 – Variantes do Ensaio

I.3.1 – Ensaio de tração real

O ensaio de tração convencional baseia-se nas dimensões iniciais do CP que se alteram ao longo do ensaio. Se os cálculos das tensões e deformações forem baseados nas atuais dimensões do corpo de prova, ter-se-á uma curva tensão verdadeira-deformação verdadeira que corresponde a um ensaio de tração real.

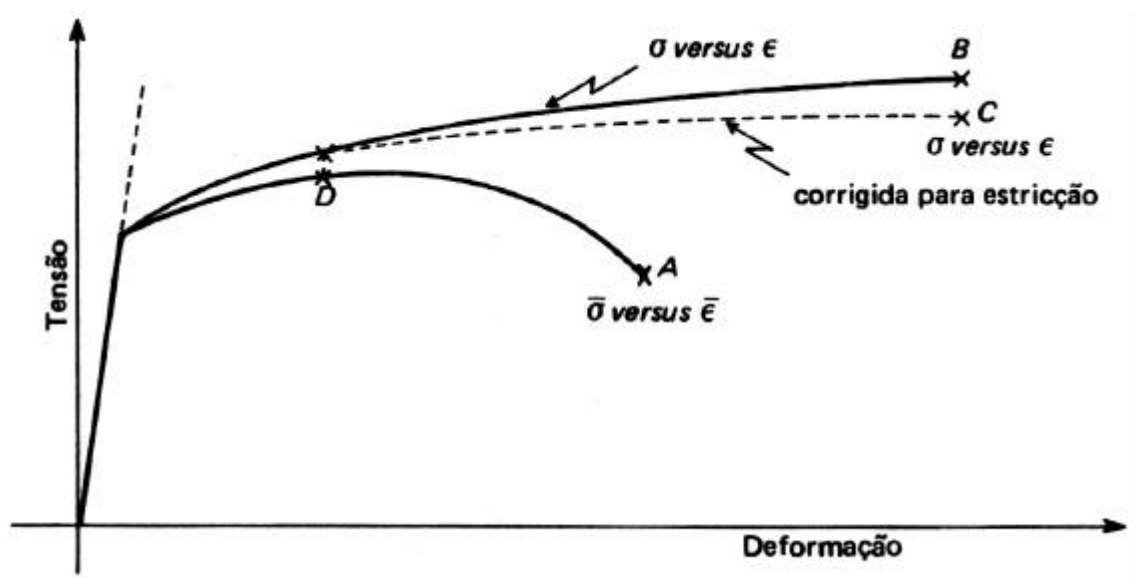


Figura I.8 – Comparação esquemática entre as curvas tensão vs. deformação real e de engenharia. A correção para a estricção é feita levando-se em conta a triaxialidade de tensões cada vez maior com a alteração da geometria do corpo de prova na região de estricção.

A tensão e deformação reais são calculadas de acordo com as equações (I.14) e (I.15).

$$\sigma_{Real} = \frac{F}{S} \quad (I.14)$$

$$\epsilon_{Real} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (I.15)$$

onde estas equações são oriundas da teoria já discutida no capítulo 1.

Durante a etapa de deformação plástica homogênea durante o ensaio de tração (vide figura I.2), quando é válida a equação (I.2) ($S \cdot L = S_0 \cdot L_0$), têm-se:

$$\epsilon_{Real} = \ln (\epsilon + 1) \text{ e} \quad (I.15)$$

$$\sigma_{Real} = \sigma(\epsilon + 1) \quad (I.16)$$

Após a ultrapassagem da carga máxima no ensaio de tração convencional, a equação anterior deve ser corrigida pela mudança local da seção do corpo de prova (estricção). A partir do início da estricção, a deformação real, localizada na região de estricção, ultrapassa a deformação convencional.

A deformação real de ruptura pode ser obtida matematicamente, desde que para corpos de prova cilíndricos, com sendo:

$$\epsilon_{real} = \ln [1/(1-q)] \quad (I.17)$$

onde q é a redução de área, segundo definida pela equação (I.7).

A determinação da curva de tração real pode ser feita:

1. Através de ensaios, com cargas crescentes, onde sejam medidas os diâmetros mínimos ao longo do comprimento do corpo de prova.
2. Determinar as tensões e deformações reais a partir das tensões e deformações convencionais (de engenharia) até a carga máxima (a partir deste ponto unir com o último ponto obtido na condição de ruptura);

Coeficiente de encruamento ("n")

O encruamento pode ser estudado pelo modelamento matemático da curva tensão-deformação real mostrado na equação (I.3 - $\sigma_{Real} = K \epsilon_{Real}^n$). A norma brasileira que trata da medição deste parâmetro é a NBR 8164. Depois de análises matemáticas, obtêm-se:

$$n = \ln (1 + \epsilon_{Real \text{ máx}}) \quad (I.18)$$

Índice de anisotropia ("R")

Também conhecido como coeficiente de Lankford, é definido como sendo a relação entre as deformações reais segundo a largura (W) e segundo a espessura (t), conforme definido pela equação I.9. Este parâmetro mede a resistência do material à redução de

espessura quando deformado plasticamente. Como a medição da espessura apresenta dificuldades de precisão e admitindo-se constância de volume do material ($S \cdot L = S_0 \cdot L_0$), pode-se calcular o índice de anisotropia alternativamente pela medição das variações na largura e comprimento, conforme mostrado na equação (I.19).

$$R = \frac{e_{\text{Real-largura}}}{e_{\text{Real-espessura}}} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{L_0 \cdot w_0}{L \cdot w}} \quad (\text{I.19})$$

A figura I.9 mostra um corpo de prova de tração típico, conforme citado na norma ASTM E8M e as dimensões que o definem. A figura I.10 ilustra os valores de deformação utilizados para a medição do coeficiente de anisotropia.

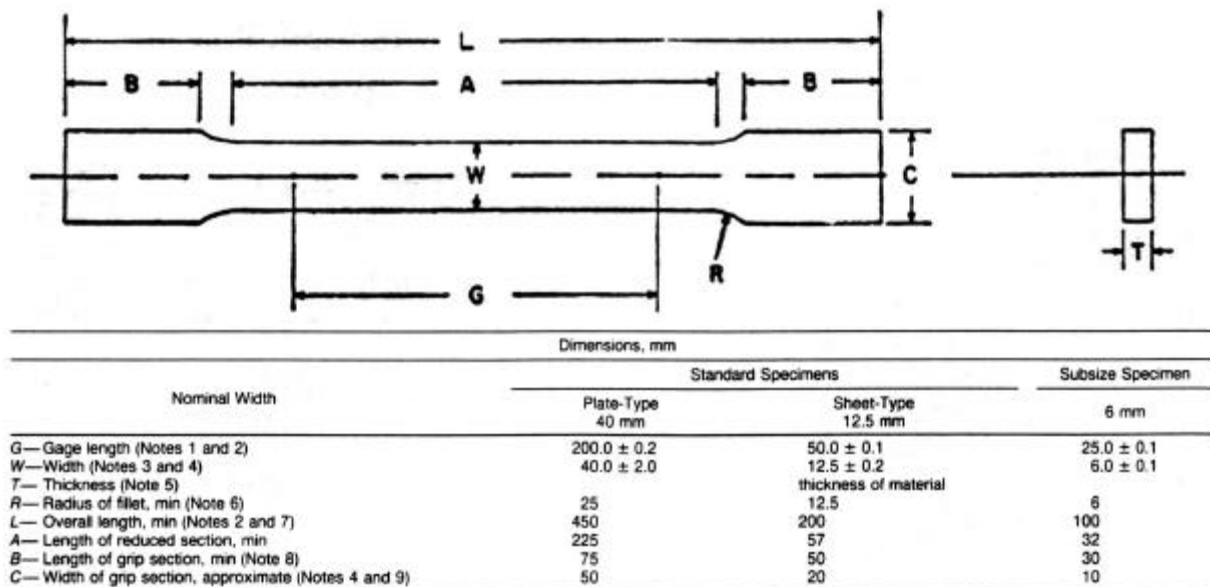
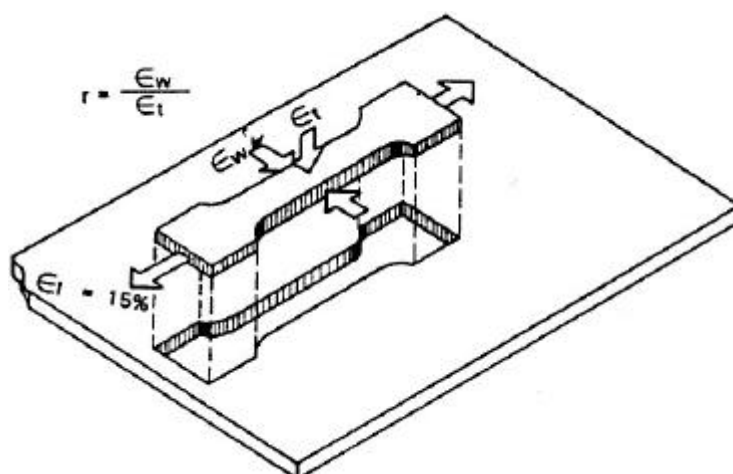


Figura I.9 – Dimensões de um CP de tração plano, segundo citado na ASTM E8 M.



Onde:
deformações verdadeiras ou loga- Deformações convencionais
rítmicas
 $\epsilon_w = \ln (1 + e_w)$
 $\epsilon_t = \ln (1 + e_t)$
 $e_w = \frac{W - W_0}{W_0}$

Figura I.10 – Definição de um CP para medição do índice de anisotropia (“R”).

A figura I.12 apresenta um gráfico correlacionando os valores do parâmetro NYR com o parâmetro K_{IC} para ligas de alumínio. O parâmetro K_{IC} é obtido em ensaios de mecânica de fratura e é considerado o mais preciso para caracterizar a resistência à fratura de um material.

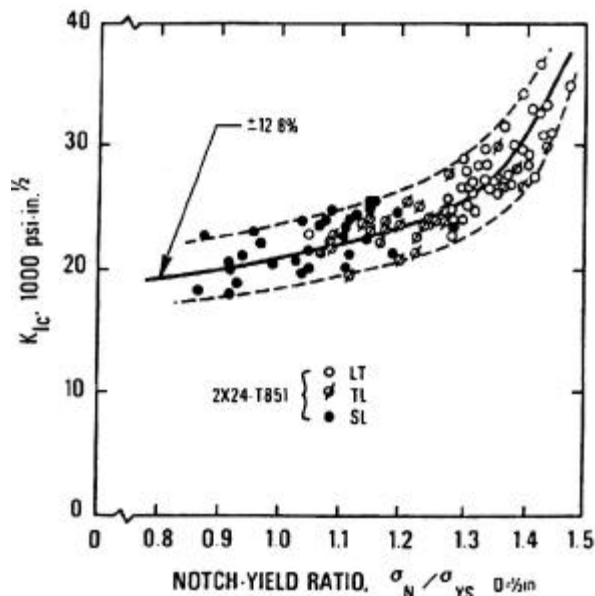


Figura I.12 – Comparação entre o NYR, medido em um ensaio de tração com entalhe, com o K_{IC} , para ligas de alumínio.

Este ensaio também apresenta sensibilidade a variação de alguns aspectos microestruturais não percebidos por outras propriedades convencionais.

I.4 – Fatores de Influência

I.4.1 – Temperatura

Podem ser realizados ensaios em diferentes temperaturas, as maiores diferenças não são nos corpos de prova, mas sim nos equipamentos de ensaios. De um modo geral há um aumento de resistência e perda de ductilidade em baixas temperaturas, conforme esquematizado na figura I.13. O aumento da temperatura nem sempre corresponde a um aumento na ductilidade porque podem ocorrer fenômenos metalúrgicos (por exemplo, precipitação de carbonetos).

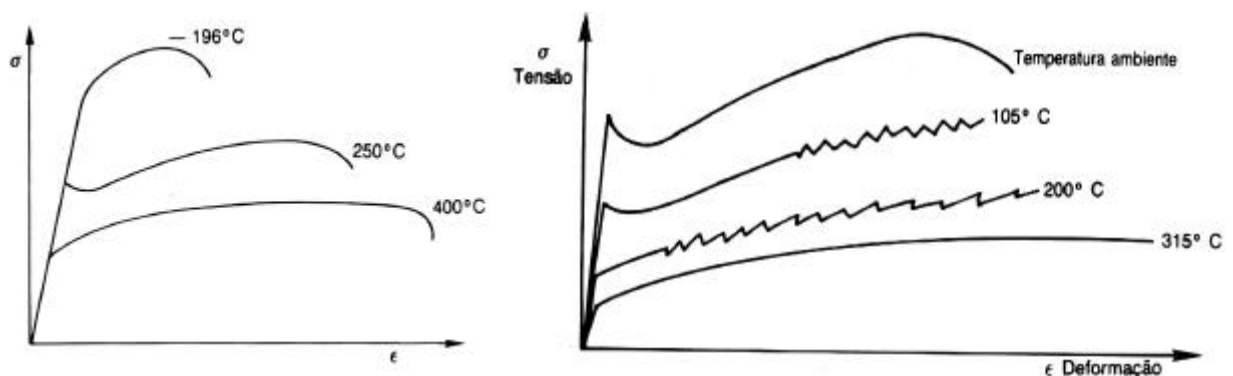


Figura I.13 – Possíveis efeitos do aumento da temperatura sobre a curva tensão vs. deformação em um ensaio de tração.

O fenômeno de Portevin-Le Chatelier, que consiste na ocorrência de um denteamento na zona plástica, ou escoamento descontínuo repetitivo pode ocorrer também, em determinadas temperaturas, conforme ilustrado na figura I.13.

A temperatura influencia no encruamento apresentado pelos materiais metálicos, quanto mais alta a temp. menor a quantidade de encruamento (menor o valor do fator de encruamento “n”).

I.4.2 – Velocidade de deformação

De um modo geral, pode-se dizer que a resistência dos materiais aumenta com o aumento da velocidade de deformação. Materiais como o alumínio e suas ligas são, em geral, menos sensíveis à velocidade de deformação do que os aços.

As normas de ensaio impõem valores máximos de velocidade de deformação. Ensaios a velocidades superiores ao padrão podem ser realizados quando se deseja estudar o comportamento de um material em processos de fabricação, que normalmente são realizados em altas velocidades de deformação.

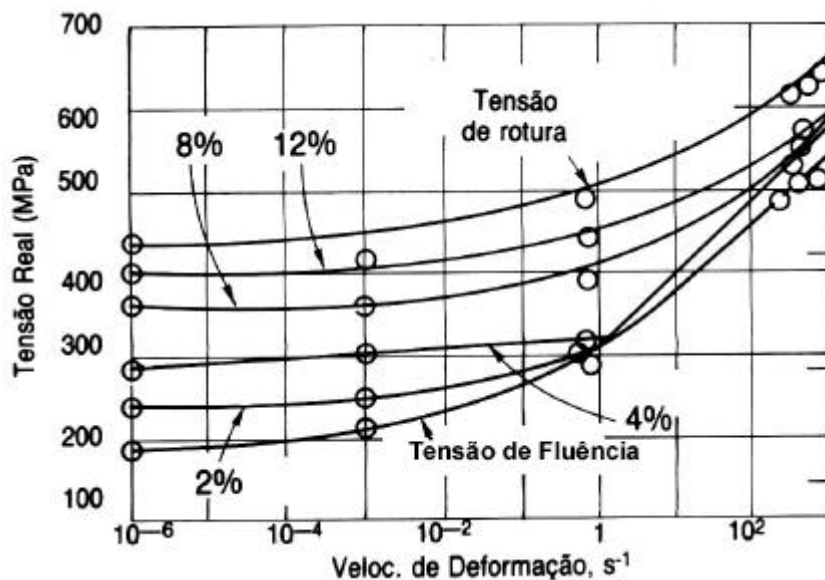


Figura I.14 – Influência da taxa de deformação nos valores de tensão real medida sob diferentes deformações ao longo de um ensaio de tração.

I.4.3 – Máquinas de ensaio

Há basicamente dois tipos de máquinas de tração:

- acionadas por parafusos sem-fim (eletromecânicas);
- acionadas hidraulicamente (servo-hidráulicas);

a figura I.15 mostra o princípio de funcionamento de cada sistema e a figura I.16 mostra duas máquinas baseada em cada mecanismo.

A distorção da amostra durante o ensaio de tração é acompanhada pela distorção da própria máquina. O módulo de elasticidade obtido de uma curva registrada diretamente pela máquina de tração é bem diferente daquele característico do material, conforme mostrado no gráfico da figura I.17.

Por isto as normas técnicas requerem que a determinação do módulo de elasticidade dos materiais seja feita por meio de strain-gages colados em contato com a amostra testada.

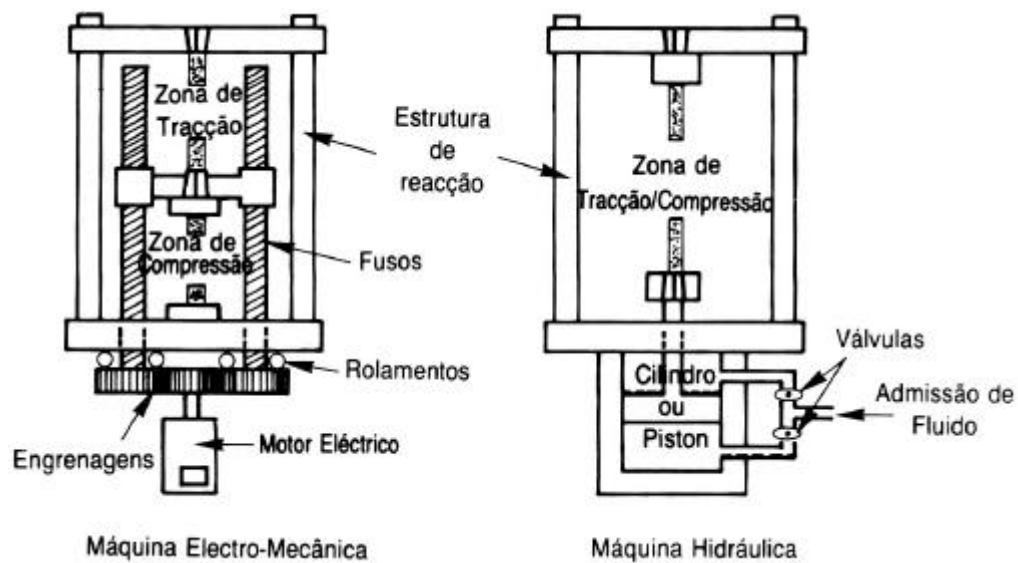


Figura I.15 – Esquema de funcionamento de máquinas de tração eletromecânicas (à esquerda) e servo-hidráulicas (à direita)



Figura I.16 – Exemplos de máquinas de tração eletromecânica (à esquerda) e servo-hidráulica (à direita), ambos os equipamentos foram fabricadas pela MTS.

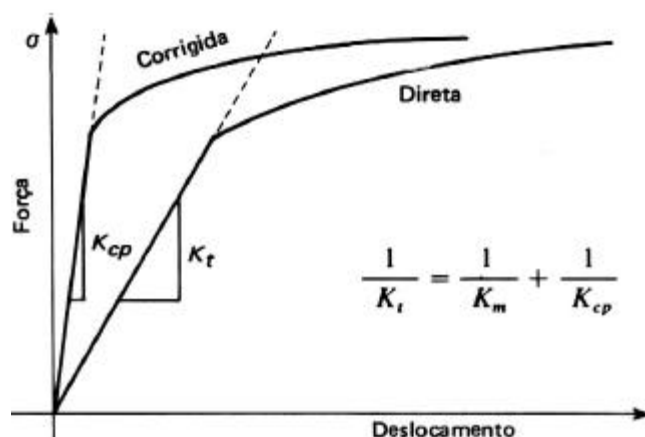


Figura I.17 – Curvas força vs. deslocamento aparente (direta) obtida pela influência da deformação (rigidez) da máquina de tração utilizada e a respectiva curva real (corrigida).



I.4.4 – Corpos de prova

O acabamento superficial dos corpos de prova testados em tração influencia no limite de elasticidade assim como na ductilidade. A geometria dos corpos de prova altera a obtenção das medidas de ductilidade (alongação e redução de área), pois altera o tipo de carregamento imposto na condição de instabilidade plástica (estricção). São recomendáveis CP's proporcionais e proceder de acordo com a norma a utilizar. O uso de CP's normalizados é importante, porque minimiza irregularidades e aumenta a reprodutibilidade e a comparação dos resultados.

I.5 – Bibliografia

- ASTM E8M-95a; **Standard test methods for tension of metallic materials**. Annual Book of ASTM Standards; v.03.01, 2001.
- ASTM E 338-91 (reapproved 1997); **Standard test method of sharp-notch tension testing of high-strength sheet materials**. Annual Book of ASTM Standards; v.03.01, 2001.
- ASTM E 602-91 (reapproved 1997); **Standard test method for sharp-notch tension testing with cylindrical specimens**. Annual Book of ASTM Standards; v.03.01, 2001.
- MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K.; **Principles of Mechanical Metallurgy**. Prentice-Hall Inc., 1983.
- DIETER, G.E.; **Mechanical Metallurgy**. McGraw Hill Book Company, SI Metric Edition, 1988.
- DOWLING, N. E.; **Mechanical Behavior of Materials**. Prentice-Hall Inc., 1993.
- GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A.; **Ensaio dos Materiais**. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1999.
- ISO 2566/1; Steel – **Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels**. International Organization for Standardization, second edition, 1984.
- OLIVER, D.A.; .Proceedings Institute Mechanical Engineering, v.11, 1928.
- USIMINAS; **Estampagem dos aços**. Apostila PU 102.