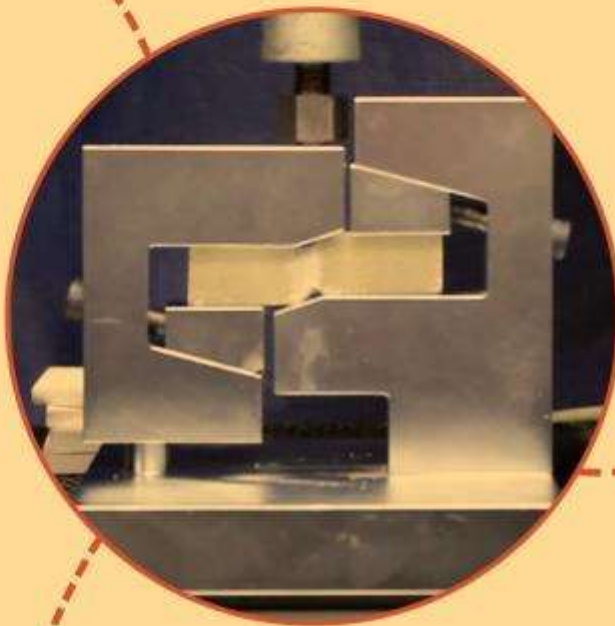
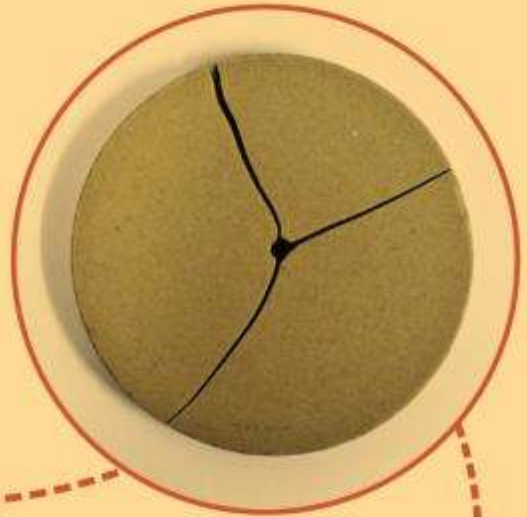
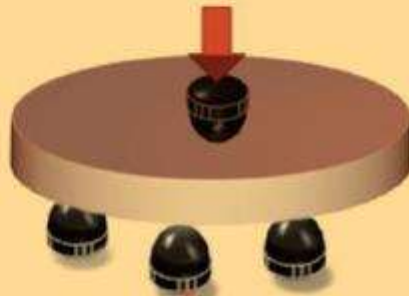


PROPRIEDADES MECÂNICAS: ENSAIOS FUNDAMENTAIS - VOL.1



Prof. Dr.-Ing. Márcio C. Fredel
Dra. Patricia Ortega
Eng. Edson Bastos

SUMÁRIO

1. TRAÇÃO	4
1.1 Ensaio de Tração	5
1.1.1 Fundamentos.....	5
Ensaio de tração permitem conhecer o comportamento dos materiais, como eles reagem sob esse tipo de esforço, seu limite de escoamento e de ruptura.	5
1.1.2 Corpos de prova utilizados para o ensaio de tração.....	5
1.1.3 Equipamento para o ensaio de tração.....	6
1.2 Tipos de máquinas universais	8
1.2.1 Máquinas eletromecânicas.....	8
1.2.2 Máquinas hidráulicas.....	8
1.3 Fixação do corpo de prova	8
1.4 Realização do ensaio de tração no LPM – Laboratório de Propriedades Mecânicas	10
1.5 Medição da deformação total – alongamento	11
1.6 Medição da redução de área	12
1.7 Propriedades obtidas no ensaio de tração	14
1.7.1 Relação das propriedades da curva tensão x deformação	14
1.7.2 Discordâncias (materiais metálicos)	17
1.7.3 Limite de proporcionalidade.....	17
1.7.4 Limite de resistência	18
1.7.5 Módulo de elasticidade (E) (Young) e coeficiente de Poisson	19
1.7.6 Módulo de resiliência (U_R)	20
1.7.7 Tensão limite de escoamento (σ_e)	21
1.7.8 Ductilidade	22
1.7.9 Tenacidade (U_T)	23
1.7.10 Tensão limite de resistência à tração (σ_u).....	24
1.7.11 Encruamento	24
1.7.12 Tensão e deformação de engenharia	25
1.7.13 Tensão e deformação verdadeiras	25
1.7.14 Relação entre tensão de engenharia e tensão verdadeira	27
1.7.15 Outras propriedades obtidas no ensaio de tração.	27
1.8 Materiais dúcteis e frágeis	29
1.9 Extensômetros	33
1.10 Fontes de erro na geração da curva tensão-deformação	34
2. Flexão	37
2.1 Ensaio de flexão	37

2.2	Corpos de prova	43
2.3	Comportamento dos materiais cerâmicos à flexão	43
2.4	Distribuição de Weibull	46
3.	Impacto	53
3.1	Ensaio de impacto	54
3.2	Características do ensaio de impacto	56
3.3	Temperatura de transição dúctil-frágil	61
3.3.1	Influência do trabalho mecânico no corpo de prova	64
3.3.2	Fatores metalúrgicos que afetam a temperatura de transição	65
3.3.3	Procedimento para execução do ensaio.....	68
3.3.4	Determinação da temperatura de transição dúctil - frágil (TTDF).....	69
3.4	Aspecto da fratura de materiais metálicos submetidos a impacto	70
4.	Dureza	74
4.1	Dureza Mohs	74
4.2	Dureza Brinnell	76
4.3	Dureza Rockwell	81
4.4	Dureza Vickers	88
4.5	Dureza Shore	94
4.5.1	Durômetro Shore	95
4.6	Microdureza	98
4.6.1	Microdureza por penetração	98
4.7	Dureza Janka	101
4.8	Considerações sobre os ensaios de dureza	103
5.	Tenacidade à fratura	106
5.1	Fator de intensidade de tensão	107
5.2	Zona plástica na região da trinca	109
5.3	Validade do campo da mecânica da fratura linear elástica (MFLE)	111
5.4	Critério energético de Griffith	112

5.6 Medição do K_{IC} através da dureza Vickers em materiais cerâmicos - ICL	117
6. Fadiga	121
6.1 Caracterização do processo de fadiga	123
6.2 Falha por fadiga	125
6.3 Características do ensaio de fadiga	127
6.4 Curva: tensão x número de ciclos (Curva S x N)	129
6.5 Efeito da velocidade de ensaio	130
6.6 Efeito do meio ambiente	130
6.7 Efeito da variação da tensão máxima	131
6.7.1 Sobretensão	131
6.7.2 Subtensão	131
6.8 Método estatístico para o cálculo do limite de fadiga – método escada	131
6.9 Propagação da trinca em fadiga	135
6.10 Exemplo de projeto	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

1. TRAÇÃO

O projeto de um componente mecânico ou equipamento industrial requer conhecimento das propriedades dos materiais disponíveis. Durante a seleção de um tipo de material para o projeto são avaliadas as suas propriedades mecânicas e seu comportamento mecânico.

A determinação das propriedades mecânicas é realizada através de ensaios normalizados. A maioria destes ensaios é destrutiva isto é, promovem a ruptura (ou grandes deformações) no corpo de prova (ensaio de tração, impacto, fadiga, fluências, dobramentos, etc.). Existem ainda os ensaios não destrutivos (ultrassom, magna flux e outros), que visam não inutilizar a peça ensaiada.

As principais associações de normas técnicas fornecem as normas que descrevem o procedimento do ensaio, bem como requisitos mínimos de resistência mecânica e dureza para diversas classes de aços e ferros-fundidos. Desta forma se estabelece uma linguagem comum entre fornecedores e usuários do setor industrial metal mecânico.

1.1 Ensaio de Tração

1.1.1 Fundamentos

No ensaio de tração (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), submete-se um corpo de prova a um esforço, que tende a alongá-lo ou até mesmo esticá-lo até a sua ruptura. Os esforços ou cargas aplicadas ao mesmo são medidas na própria máquina de ensaio. Geralmente, este ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Equação 1

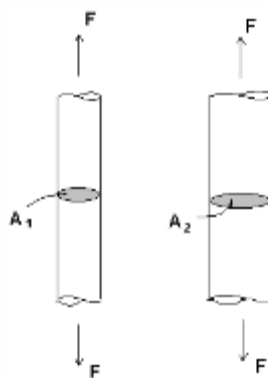
$$\sigma_1 > \sigma_2$$

Equação 2

Figura 1 Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seção transversal. [1]

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ainda mostra como as tensões são calculadas, como demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Ensaio de tração permitem comportamento dos eles reagem sob esse tipo limite de escoamento e de



conhecer o materiais, como de esforço, seu ruptura.

1.1.2 Corpos de prova ensaio de tração

Os corpos de prova ensaio de tração (**Erro! Fonte de** **encontrada.**) devem seguir padrões de forma e dimensões para que os resultados obtidos nos testes possam ser utilizados. No Brasil, a norma que padroniza os corpos de prova é a MB-4 da ABNT, especificando formatos e dimensões para cada tipo de teste.

utilizados para o

utilizados no **referência não**

Segundo a norma, a secção transversal do corpo de prova pode ser circular ou retangular, dependendo da forma e das dimensões do produto de

onde for extraído. A seguir, o desenho esquemático mostra as partes de um corpo de prova circular usado em ensaios de tração.

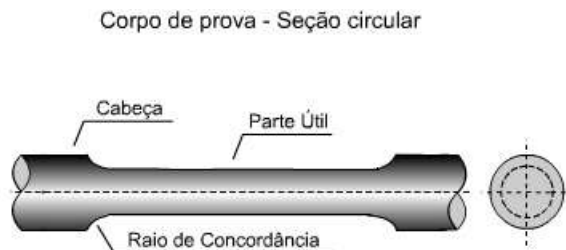


Figura 2 Corpo de prova de secção circular. [site](#)

A análise das propriedades mecânicas de um metal depende da precisão com que os corpos de prova são usinados. Como os corpos de prova são de geometria circular ou plana, uma usinagem adequada é essencial para um programa de testes de qualidade. As dimensões e o acabamento superficial devem estar de acordo com a norma brasileira.

Algumas normas pertinentes são listadas abaixo:

- Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura elevada NM-ISO783 1996;
- Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente NBRISO6892 11/2002;
- Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial – Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração do sistema de medição da força NBRNM-ISO7500-1 03/2004;
- Materiais metálicos - Calibração de extensômetros usados em ensaios uniaxiais NBR14480 03/2000;
- Materiais metálicos - Calibração de instrumentos de medição de força utilizados na calibração de máquinas de ensaios uniaxiais NBR6674 MB1488 07/1999;
- Produtos planos de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração NBR6673 MB856 07/1981;
- Produtos tubulares de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração NBR7433 MB736 07/1982;
- Determinação da resistência à tração NBR8548 MB1804 08/1984;
- Alumínio e suas ligas - Ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos NBR7549 MB1714 12/2001.

1.1.3 Equipamento para o ensaio de tração

O ensaio de tração pode ser realizado por uma máquina universal de ensaios, que também executa ensaios de compressão e flexão. Abaixo, nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e quatro consta um desenho esquemático da máquina universal, e seus componentes.

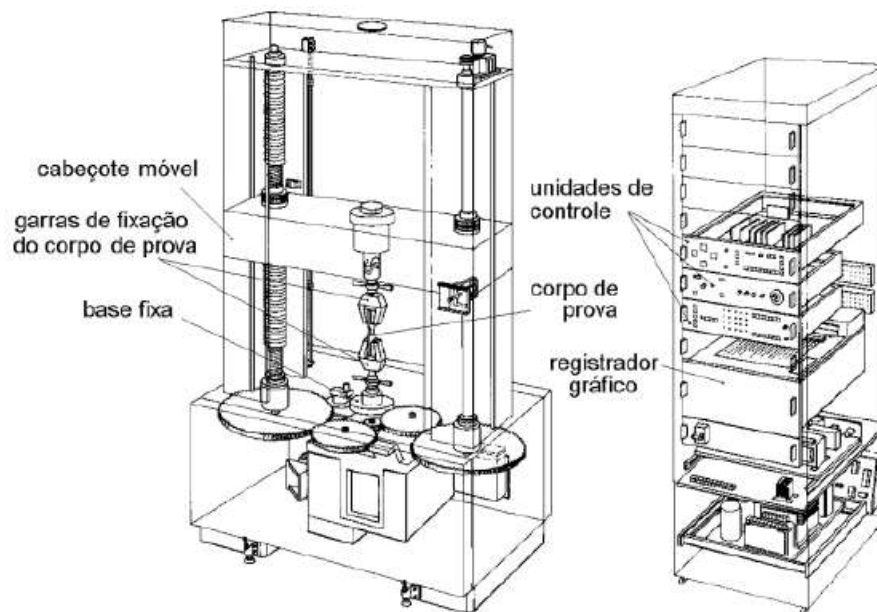


Figura 3 Desenho esquemático de uma máquina universal de ensaios. [site](#)

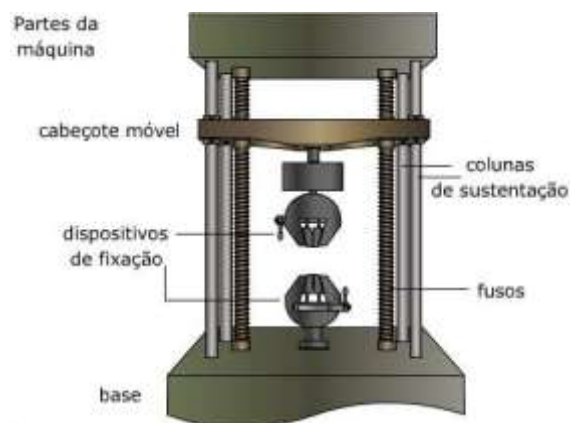


Figura 4 Máquina do ensaio de tração. [site](#)

A função básica destas máquinas é plotar um diagrama de carga versus deslocamento. Uma vez gerado o diagrama, pode-se manualmente calcular a tensão de escoamento com os simples recursos geométricos de lápis e régua, ou via um algoritmo computacional acoplado.

Neste caso, é também calculado o módulo de Elasticidade **E**, a tensão limite de ruptura e o alongamento total. Quanto ao tipo de operação, as máquinas de ensaio podem ser eletromecânicas ou hidráulicas. A diferença entre elas é a forma como a carga é aplicada. Em qualquer caso a referência é para diferenciar máquinas de carregamento estático, quase estático e dinâmico.

1.2 Tipos de máquinas universais

1.2.1 Máquinas eletromecânicas

Tem seu funcionamento baseado em motor elétrico de velocidade variável, um sistema de engrenagens de redução e um ou vários parafusos que movimentam o cabeçote na direção vertical. Estes movimentos para cima e para baixo permitem executar testes de tração e compressão respectivamente.

As velocidades do cabeçote podem ser alteradas pela velocidade do motor. Um servossistema pode ser adaptado para controlar mais precisamente a velocidade do cabeçote.

1.2.2 Máquinas hidráulicas

Máquinas hidráulicas para testes são baseadas no movimento de um pistão de atuação simples ou dual, que aciona o cabeçote para cima e para baixo. Entretanto, na maioria das máquinas para teste estático existe um pistão de ação simples.

Numa máquina de operação manual, o operador ajusta o orifício de uma válvula de agulha com compensação de pressão para controlar a taxa de alimentação. Num servo sistema hidráulico de ciclo fechado, a válvula de agulha é substituída por uma servo-válvula operada eletronicamente para um controle preciso.

Em geral as máquinas eletromecânicas permitem uma gama maior de velocidades e maiores deslocamentos do cabeçote, por outro lado as máquinas hidráulicas permitem gerar maiores forças de carregamento.

1.3 Fixação do corpo de prova

Para a maioria dos ensaios mecânicos, o corpo de prova deve concentrar as tensões dentro da região de teste (parte útil do CP), sendo assim, o teste exige um formato específico do corpo de prova. Caso o mesmo não tenha sido bem fabricado, poderá até mesmo quebrar fora da região de teste, acarretando assim erros na deformação. Além disso, deve-se assegurar que os equipamentos de medição usados para a tomada de dimensões, estejam devidamente calibrados.

A forma e a magnitude da curva levantada pelo ensaio podem ser afetadas pela velocidade do carregamento, pois alguns materiais podem apresentar um significativo aumento da resistência à tração quando as velocidades de carregamento são aumentadas. Com a introdução dos sistemas de teste com microprocessamento, as cargas podem inadvertidamente ser zeradas, resultando em leituras reduzidas para as tensões. Para evitar este erro recomenda-se fixar o corpo de prova na morsa superior, zerar a carga, e finalmente fixar a extremidade inferior conforme mostrado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

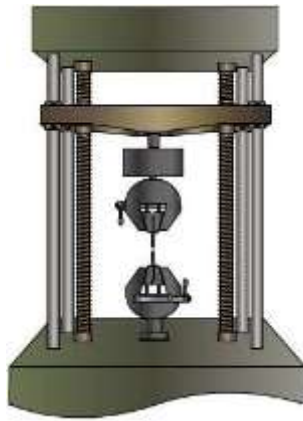


Figura 5 Ensaio de tração. [Site](#)

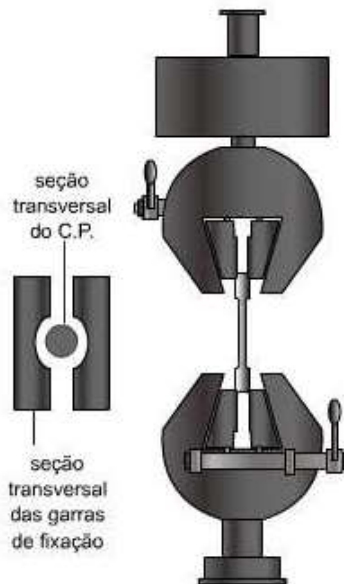


Figura 6 Fixação do corpo de prova na máquina. [Site](#)

Para a realização dos ensaios, o corpo de prova deve estar perfeitamente alinhado durante sua fixação nas garras da máquina, caso isso não ocorra surgirá um estado triaxial de tensões inviabilizando o ensaio, pois os valores encontrados não serão reais, obrigando uma repetição do mesmo com um maior cuidado. Exemplos mais comuns de fixação de corpo de prova à máquina de ensaio são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

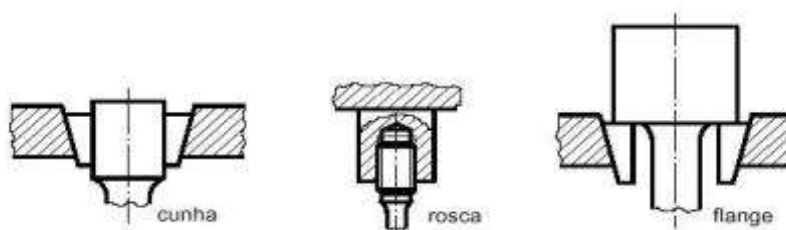


Figura 7 Exemplos de fixação de corpos de prova. [Site](#)

1.4 Realização do ensaio de tração no LPM – Laboratório de Propriedades Mecânicas

Para o ensaio de tração corpo de prova apresenta em geral a configuração geométrica da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as dimensões variam conforme a norma como será apresentado em item posterior.

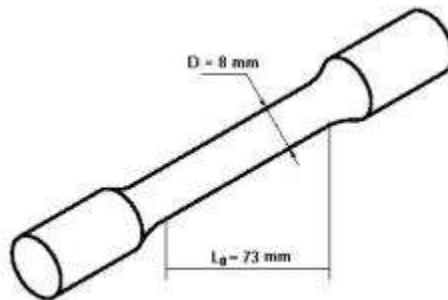


Figura 8 Corpo de prova (CP). [site](#)

Os corpos de prova são posicionados numa Máquina de Ensaio Universal EMIC DL 20000, eletromecânica, micro processada. A máquina é do tipo Bi fuso Autoportante, com duas colunas guias cilíndricas paralelas sendo que o acionamento é realizado por Fusos de Esferas Recirculantes. A figura 9 mostra a máquina.

A faixa de velocidades de aplicação de cargas é 0,01 a 500 mm/min, sendo que a Medição de Força aplicada ocorre através de células de carga intercambiáveis, onde a célula padrão instalada é de 200 KN e a resolução de leitura de 10N (1kgf), com utilização recomendada para ensaios na faixa de 4 a 200 KN. A Medição do Deslocamento é realizada através de Sensor Óptico (encoder), com resolução de 0,01 mm

A velocidade de aplicação da carga de tração influencia no modo de fratura do corpo de prova (CP). Altas velocidades de carregamento não permitem que o corpo se deforme de maneira uniforme produzindo fraturas tipicamente frágeis. No caso de baixas velocidades de aplicação de carga, fraturas do tipo dúctil são mais comuns. Os ensaios são, portanto, conduzidos através da aplicação de velocidades de carregamento estipuladas nas normas técnicas. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, têm-se um corpo de prova montado na máquina de ensaio.



Figura 9 Máquina Emic DL 20000.



Figura 10 Corpo de Prova fixado na máquina para a realização de ensaio de tração.

1.5 Medição da deformação total – alongamento

O alongamento do corpo de prova pode ser medido em qualquer etapa do ensaio de tração. Entretanto o comprimento final L_f , no momento da ruptura, é necessário para o cálculo da deformação total.

A deformação total é a soma das deformações:

- Deformação elástica (recuperada após a ruptura);
- Deformação durante o escoamento;
- Deformação plástica;
- Deformação depois de atingida a carga máxima.

A deformação total é dada pela equação $\varepsilon = \Delta l / L_0$

Δl = alongamento do campo elástico;

L_0 = comprimento inicial do corpo de prova

A soma da deformação no escoamento com a deformação plástica é a chamada deformação uniforme. Para efetuar a medição do comprimento final, seguem-se os seguintes passos:

1º- Marcam-se **n** divisões iguais sobre a parte útil do corpo de prova antes do início do ensaio;

2º- Um comprimento de referência **L₀** deve ser escolhido neste estágio. É recomendável que o comprimento total das **n** divisões seja bem superior ao comprimento **L₀**;

3º- Traciona-se o corpo até a ruptura, juntando-se a seguir, as partes fraturadas;

4º- Mede-se a distância correspondente ao comprimento final, tomando-se o mesmo número de divisões à esquerda e à direita da secção de ruptura, quando possível. Quando a ruptura for próxima ao final da parte útil do corpo de prova, toma-se o número máximo de divisões do citado lado, compensando-se a diferença do lado oposto para completar o comprimento de referência. O procedimento está ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Juntando as partes para medição

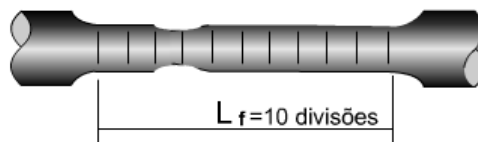


Figura 11 Procedimento para a medição da deformação do corpo de prova. [site](#)

1.6 Medição da redução de área

Outra definição importante usada em ensaios de tração é a estricção, que é a redução percentual da área da secção transversal do corpo de prova na região onde se localizará a ruptura. A estricção determina a ductilidade do

material. Quanto maior a porcentagem de estrição, maior a ductilidade do material.

A estrição ocorre depois de atingida a carga máxima. A deformação é maior nesta região enfraquecida. A estrição é usada como medida da ductilidade. O fenômeno da estrição é ilustrado na Figura 12, para um corpo de prova de secção transversal circular. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstram como calcular as reduções de área.

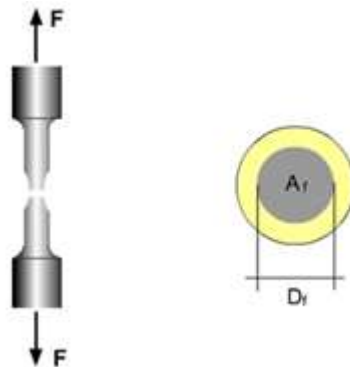


Figura 12 Procedimento para a medição da estrição do corpo de prova. [site](#)

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

Equação 3

$$A = \pi D^2 / 4$$

Equação 4

Vale ressaltar que a estrição não pode ser considerada uma propriedade específica do material, mas somente uma característica do seu comportamento. Isto se justifica, porque o estado de tensões depende da forma da secção transversal, por sua vez, a fratura depende não só do estado de tensões e deformações, mas de como se desenvolveu. Então, a deformação após a carga máxima não é sempre a mesma. Apesar do seu caráter mais qualitativo, a estrição é mencionada e usualmente especificada para diversos materiais.

As medidas de estrição podem ser tomadas tanto para corpos de secção circular como corpos de secção retangular. As medidas e os valores são mostrados nas figuras 13 e 14. As equações cinco e seis demonstram como calcular as reduções de área numa seção circular e retangular respectivamente.

Redução da área no teste de tração – CP seção circular:

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(D_o^2 - D_f^2)}{D_o^2} \times 100$$

Equação 5

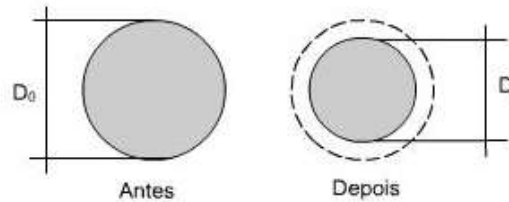


Figura 13 Estrição do CP de seção circular. [site](#)

Redução da área no teste de tração – CP seção retangular:

$$\varphi = q \times 100 = \frac{(a_z b_z - a_0 b_0)}{a_0 b_0} \times 100$$

Equação 6

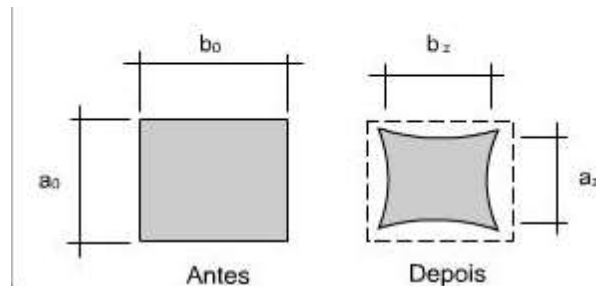


Figura 14 Estrição do CP de seção retangular. [site](#)

1.7 Propriedades obtidas no ensaio de tração

1.7.1 Relação das propriedades da curva tensão x deformação

Como já citado anteriormente, durante o ensaio de tração, é fornecido um gráfico pela máquina, que mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o desenvolvimento do ensaio. Mas, o objetivo principal do ensaio é a obtenção da relação entre a tensão e a deformação do material.

A tensão é dada pela razão entre força aplicada, denominada **F**, pela área da secção do corpo de prova, denominada **A**. Como a secção é variável com a deformação do corpo de prova, convencionou-se que a área da secção utilizada para os cálculos é a área da secção inicial do corpo de prova, denominada **Ao**. A curva obtida neste ensaio, mostrada na figura 15, apresenta certas características que são comuns a vários tipos de materiais com aplicação nas engenharias.

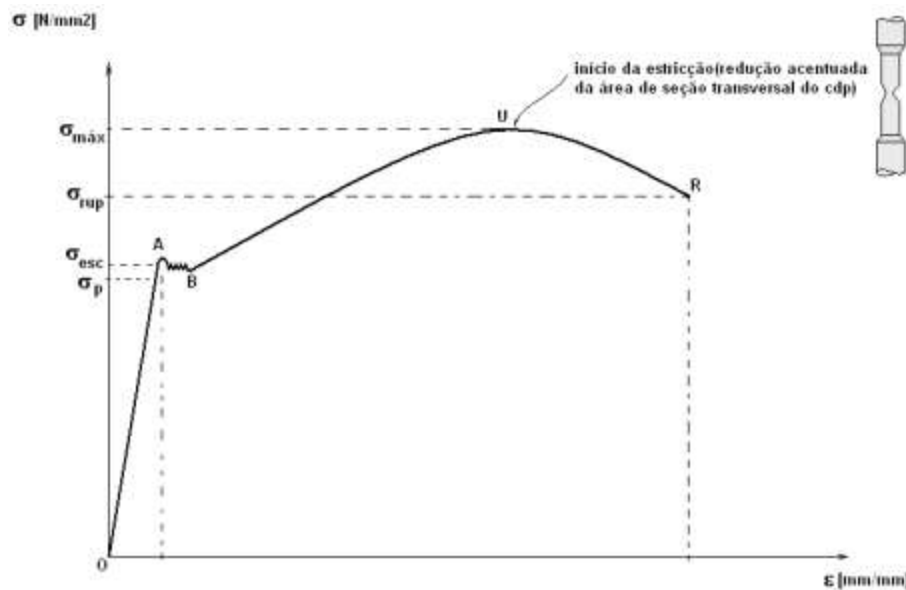


Figura 15 Curva $\sigma \times \epsilon$ convencional de um metal dúctil submetido ao ensaio de tração. [site](#)

A relação de propriedades da Curva Tensão x Deformação mostrada na Figura 15 é a seguinte:

OA – região de comportamento elástico,

AR – região de comportamento plástico,

AB – região de escoamento de discordâncias,

BU – região de encruamento uniforme (empilhamento de discordâncias).

UR – região de encruamento não uniforme (estricção),

A – ponto de escoamento,

U – ponto de tensão máxima,

R – ponto de ruptura,

σ_U – limite de resistência do material [Mpa] ou $[N/mm^2]$,

σ_R - limite de ruptura do material [Mpa] ou $[N/mm^2]$,

σ_e - limite de escoamento [Mpa] ou $[N/mm^2]$,

σ_p - limite de proporcionalidade [Mpa] ou $[N/mm^2]$.

Caso o ensaio seja interrompido antes do ponto elástico e a força de tração seja retirada do corpo de prova, o mesmo volta a sua forma original, como se fosse um “elástico de borracha”, numa analogia simples. Na fase

elástica, todos os metais seguem a lei de Hook, sendo que a relação tensão-deformação é linear.

Tal lei foi formulada por Robert Hook, no século XVII. Hook observou que uma mola tem sempre uma deformação, designada ϵ , proporcional à tensão aplicada σ , desenvolvendo-se desta forma a constante da mola, designada K , desta forma, tem-se a seguinte relação como demonstra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$K = \sigma / \epsilon$$

Equação 7

Usando a analogia da lei de Hook para o ensaio de tração, durante a fase elástica, a divisão da tensão pela deformação, em qualquer ponto, é um valor constante, denominado módulo de elasticidade E . O módulo de elasticidade mensura a rigidez do material a tração.

Quanto maior for o valor de E , menores serão as deformações elásticas resultantes da aplicação de carga, sendo mais rígido o material. O módulo de elasticidade é dado pela relação matemática apresentada na equação oito.

$$E = \sigma / \epsilon$$

Equação 8

As deformações resultantes dos campos de força podem ser classificadas em dois tipos:

- **Deformação elástica** – é aquela em que removidos os esforços atuantes sobre o corpo, este volta a sua forma original,

- **Deformação plástica** – é aquela em que removidos os esforços, não há recuperação da forma original.

Os dois tipos de deformação podem ser explicados pelos movimentos atômicos na estrutura cristalina do material. Cada átomo do cristal vibra em torno de uma posição de equilíbrio, característica do tipo de rede cristalina do material, sendo seu núcleo atraído pelas eletrosferas dos átomos vizinhos e repelido pelos núcleos dos mesmos, como se estivessem em um poço de energia.

Sob a ação de esforços externos, os átomos tendem a se deslocar de sua posição de equilíbrio. A deformação plástica envolve a quebra de um número limitado de ligações atômicas seguidas pela formação de novas ligações. O conjunto de ligações rompidas e formadas gera o movimento das discordâncias. Depois de removidos os esforços continuam a existir um deslocamento diferenciado de uma parte do corpo em relação à outra, ou seja, o corpo não recupera sua forma original.

Para avaliar a deformação em função da tensão aplicada ao corpo de prova, levanta-se a curva denominada diagrama tensão - deformação.

1.7.2 Discordâncias (materiais metálicos)

A movimentação plástica do material ocorre em virtude da movimentação das discordâncias no interior da rede cristalina, que é o rompimento das ligações atômicas e a formação de novas ligações. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a aplicação de uma tensão de cisalhamento, o plano (A) é forçado para a direita, ele por sua vez empurra as metades superiores dos planos (B) e (C) na mesma direção. Se a magnitude da tensão aplicada for suficiente, então as ligações Inter atômicas do plano (B) são rompidas ao longo do plano de escorregamento, esse processo é repetido e no final pode sobrar um semiplano extra.

Esse processo produzido pelo movimento das discordâncias é denominado escorregamento. Assim a deformação plástica macroscópica corresponde simplesmente à deformação permanente que resulta do movimento da discordância, ou do escorregamento em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento.

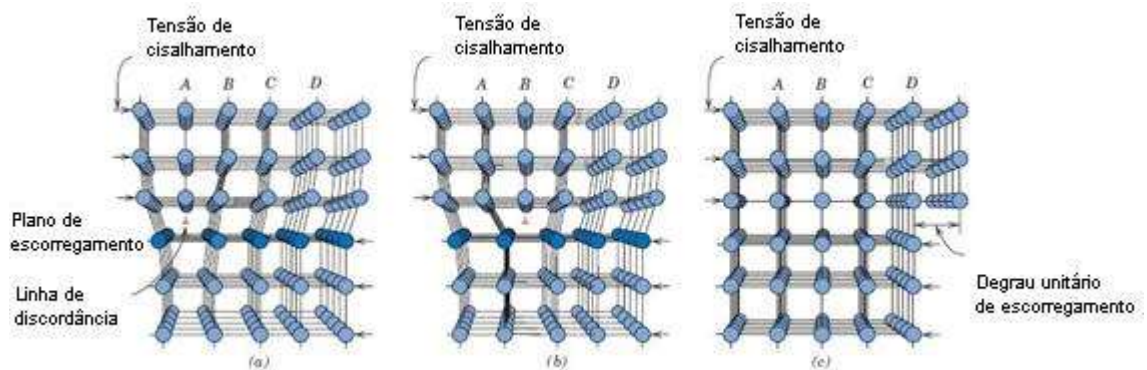


Figura 16 Mostra o rearranjo atômico que acompanha o movimento de uma discordância. [1]

1.7.3 Limite de proporcionalidade

A lei de Hook só vale até um determinado valor de tensão, denominado limite de proporcionalidade, que é o ponto representado na figura a seguir por **A'**, a partir do qual a deformação deixa de ser proporcional a carga aplicada. Muitas vezes, considera-se que o limite de proporcionalidade coincide com o limite de elasticidade. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta-se uma curva com limite de proporcionalidade bem definido.

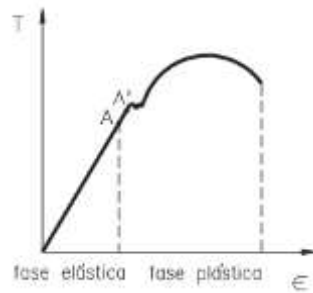


Figura 17 Limite de Proporcionalidade e Escoamento. [1]

Nos materiais dúcteis ao terminar a fase elástica inicia-se a fase plástica, onde ocorrem deformações permanentes do material mesmo havendo a retirada da força de tração. No início da fase plástica, ocorre o fenômeno denominado de escoamento, apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tal fenômeno é caracterizado por uma deformação permanente do material sem que haja incremento da carga, mas ocorre um aumento da velocidade de deformação. Durante o escoamento, os valores de carga oscilam [muito próximos uns dos outros.

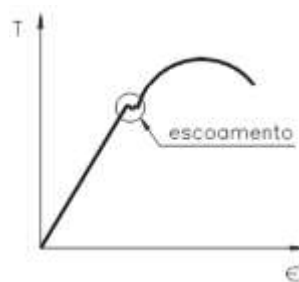


Figura 18 Limite de escoamento. [1]

1.7.4 Limite de resistência

O Limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. Esse ponto corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura sob tração, se essa tensão for aplicada e mantida ocorrerá fratura no material. Nessa região uma pequena constrição ou estrangulamento começa a se formar e toda deformação subsequente fica confinada nesta região

Nessa fase, a tensão recomeça a subir até chegar a um valor máximo, denominado limite de resistência (B), mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Para o cálculo do valor do limite de resistência, usa-se a seguinte relação matemática demonstrada na equação nove.

$$Lr = Fmax/Ao$$

Equação 9

Fmax = força máxima aplicada pelo equipamento

Ao = área da secção inicial do corpo de prova

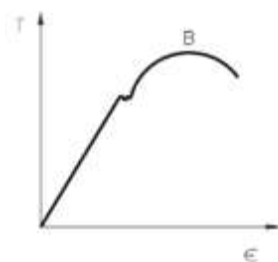


Figura 19 Limite de resistência. [1]

1.7.5 Módulo de elasticidade (E) (Young) e coeficiente de Poisson

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é a medida da rigidez do material. Ou seja, quanto maior o módulo menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material. Entretanto, o módulo de elasticidade é inversamente proporcional à temperatura, sendo assim aumentando-se a temperatura decresce o valor de E. A constante de proporcionalidade entre σ e ϵ é denominada Módulo de Elasticidade **E**, como demonstrado nas equações 10 até 16.

$$\sigma = E \times \epsilon \therefore E = \sigma / \epsilon [10^3 \text{ N/mm}^2] \text{ ou } [10^3 \text{ MPa}] \text{ ou } [\text{GPa}];$$

Equação 10 **Equação 11**

Como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ e } \epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \therefore E = \frac{F/A}{\Delta l/L_0} \therefore E = \frac{F \cdot L_0}{\Delta l \cdot A} \text{ e } \Delta l = \frac{F \cdot L_0}{E \cdot A}$$

Equação 12 **Equação 13** **Equação 14** **Equação 15** **Equação 16**

Esta expressão é conhecida por Lei de Hook, onde Δl = alongamento do campo elástico; E = Módulo de Elasticidade; L_0 = comprimento inicial do corpo de prova; A = área da seção transversal do corpo de prova; F = carga aplicada.

No campo elástico ocorrem mudanças nas distâncias das ligações Inter atômicas. O valor de E representa uma medida da resistência à quebra das ligações.

Tabela 1 Módulos de Elasticidade, Tensão Limite de Escoamento (σ_e), Tensão Limite de Resistência (σ_U) e Ductilidade (alongamento percentual Δl %) para diferentes ligas ferro-carbono.

Material	E (GPa)	σ_e (MPa)	σ_U (MPa)	(Δl %)
Aço comum (0,2%C)	207	295	395	36,5
Aço comum (0,4%C)	207	355	520	30,2
Aço inoxidável	193	205	515	40
Ferro fundido	80	-	124	-

A mudança de geometria da peça pode ser estudada através do Módulo de Poisson. Quando uma barra cilíndrica é tracionada, seu comprimento aumenta, porém, seu diâmetro diminui. Assim sendo, tem-se a deformação longitudinal (ε_l) e a transversal (ε_t), simultaneamente. A deformação transversal é resultante de compressão (o diâmetro diminui). O coeficiente de Poisson, ν é definido pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$\nu = - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Equação 17

1.7.6 Módulo de resiliência (U_R)

A resiliência refere-se à propriedade que alguns materiais possuem de acumular energia quando exigidos ou submetidos às tensões elásticas. Portanto, é a capacidade do material absorver energia ao ser elasticamente deformado e liberar esta energia quando descarregado. O módulo U_R é a área abaixo da curva tensão x deformação na região elástica de proporcionalidade conforme a figura 20.

Os materiais resilientes são utilizados na fabricação de molas, por apresentarem tensões limite de escoamento elevadas e módulos de elasticidade pequenos. Após a tensão ser retirada do corpo de prova poderá haver ou não uma deformação residual causada pela histerese do material. Esta propriedade é medida em porcentual da energia liberada após a deformação e pode ser expressa matematicamente segundo a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$U_R = \frac{\varepsilon_p \times \sigma_p}{2} = \frac{\sigma_p^2}{2 \cdot E}$$

Equação 18

Alguns autores usam a relação com o formato da equação 19.

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{\sigma_0^2}{E}$$

Equação 19

Onde:

σ_0 = limite de escoamento

E = modulo de elasticidade ou de Young

ω = modulo de resiliência

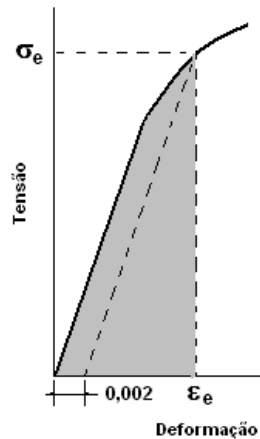


Figura 20 - Módulo de resiliência. [1]

1.7.7 Tensão limite de escoamento (σ_e)

Em geral estruturas e componentes mecânicos são projetados para resistirem a tensões elásticas, logo se torna necessário conhecer o nível de tensão onde se inicia a deformação plástica. No início do escoamento geralmente ocorre maior deformação em relação à tensão aplicada, o que torna este ponto perceptível em alguns materiais dúcteis como o aço de baixo carbono.

Nestes materiais a transição do regime elástico para o plástico ocorre de modo abrupto. Este fenômeno é conhecido por pico de escoamento descontínuo. Por outro lado, para a maioria dos materiais a transição elasto-plástica ocorre de maneira gradual, não sendo nítido o seu ponto de escoamento.

Convencionou-se assim traçar uma linha reta paralela à porção elástica da curva $\sigma \times \epsilon$, a partir de uma pré-deformação de geralmente 0,002. O ponto de encontro da linha paralela com a curva representa o limite de escoamento convencional de 0,002% como demonstra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

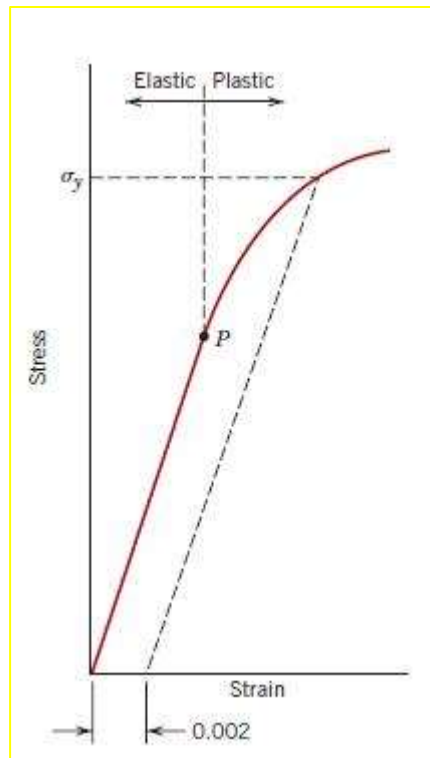


Figura 21 - Gráfico mostrando a transição elástico-plástica. [1]

A tensão σ_e é útil no cálculo de uma tensão admissível em projetos (σ_{adm}), onde:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{C.S.}$$

Equação 20

C.S. = coeficiente de segurança.

1.7.8 Ductilidade

É a medida da capacidade de deformação plástica de um material metálico até a ruptura. Um material frágil experimenta pouca ou nenhuma deformação até o instante da ruptura, enquanto que os materiais dúcteis deformam consideravelmente antes da ruptura.

A ductilidade de um metal ou liga, mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode ser medida através de dois métodos: alongamento percentual (Δl %) e redução de área percentual (RA%) como são demonstrados nas equações 21 e 22, respectivamente.

$$\Delta l\% = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100$$

Equação 21

$$RA\% = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100$$

Equação 22

Onde:

L_f = comprimento final da parte útil do corpo de prova após a fratura *

L_o = comprimento inicial da parte útil do corpo de prova após a fratura

A_f = área da seção transversal final da parte útil do corpo de prova após a fratura *

A_o = área da seção transversal inicial da parte útil do corpo de prova

(* a medição é efetuada após juntarem-se as extremidades de fratura do cp)

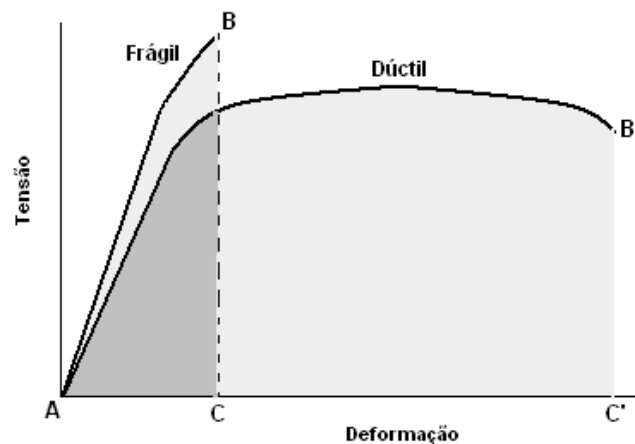


Figura 22- Curvas tensão x deformação para um material (área sombreada sob a curva no regime elástico) frágil e um material dútil. Limite convencional de 0,2%. [1]

Um conhecimento sobre ductilidade fornece informações tanto para a área de projeto como para o processo, por exemplo, a capacidade de deformação plástica de uma estrutura antes da sua falha é extremamente útil ao projetista; já nas operações de conformação também é necessário saber o grau de deformação que o material pode suportar sem que ocorra sua fratura.

1.7.9 Tenacidade (U_T)

A capacidade de um material absorver energia até o momento da fratura é denominado de tenacidade. Já o módulo de tenacidade expressa a energia absorvida por unidade de volume, desde o início do ensaio de tração até a fratura do corpo de prova.

A área total sobre a curva $\sigma \times \epsilon$ representa a tenacidade de um material, nestas condições em que ocorrem pequenas taxas de deformação (situação estática). As **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstram como calcular a tenacidade para um material dútil e frágil respectivamente.

$$U_T = (\sigma_e \times \sigma_u) \cdot \frac{\varepsilon_f}{2} \quad (\text{Material dúctil})$$

Equação 23

$$U_T = (\sigma_u \times \varepsilon_f) \cdot \frac{2}{3} \quad (\text{Material frágil})$$

Equação 24

A tenacidade pode ser medida de forma direta usando diversos ensaios mecânicos. Um exemplo é o ensaio de impacto que usa carregamento dinâmico. Também pode se obter a tenacidade à fratura quando se quer conhecer a tenacidade de um corpo de prova que já contém uma trinca.

1.7.10 Tensão limite de resistência à tração (σ_u)

A tensão máxima suportada pelo material corresponde ao ponto U da figura 15, denominado Tensão Limite de Resistência à Tração (tensão última) que é calculada através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$\sigma_u = F/A_o$$

Equação 25

Após o ponto U (Figura 15) tem início a estricção, que representa o início da ruptura do material, sendo este fenômeno marcado pela formação de um “pescoço” no corpo de prova.

1.7.11 Encruamento

A zona plástica caracteriza-se pelo endurecimento por deformação a frio, ou seja, pelo encruamento do metal. Quanto mais o metal é deformado, mais ele se torna resistente. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra esquematicamente esse efeito do encruamento, para um aço de baixo carbono.

Se durante o ensaio de tração, a tensão for elevada até o ponto M na zona plástica e depois descarregada e reensaiada, o escoamento que ocorreu no primeiro ensaio não existirá mais e a zona plástica só aparecerá a uma tensão maior que no primeiro carregamento. A repetição do ensaio elevará ainda mais a tensão de escoamento do material. A área, equivalente a parte tracejada indicada na figura, representa a perda de energia da deformação dissipada na forma de calor produzido pela fricção interna durante o descarregamento e recarregamento sucessivo, essa perda de energia é denominada histerese mecânica.

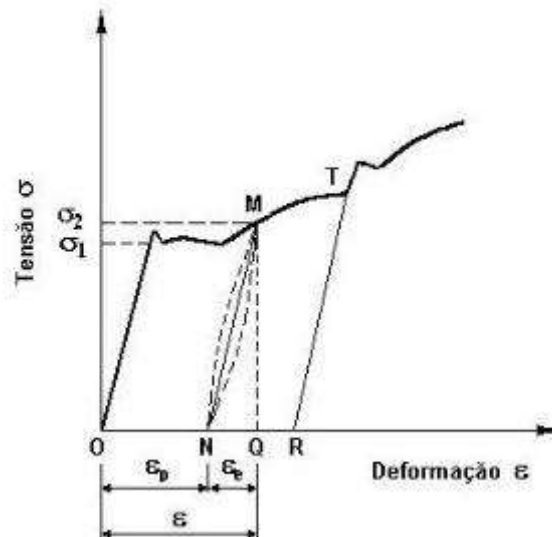


Figura 23 - Aumento do escoamento pelo encruamento e histerese mecânica. [site](#)

O fenômeno de encruamento é explicado com base nas interações das discordâncias. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o trabalho a frio, consequentemente a distância entre as mesmas diminui restringindo a sua movimentação. Assim a tensão, imposta para deformar um metal, incrementa com o aumento do trabalho a frio. Átomos intersticiais e contornos de grão também são barreiras para as discordâncias, auxiliando no encruamento do material.

1.7.12 Tensão e deformação de engenharia

A deformação de engenharia é definida através da Equação 26 como:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Equação 26

A deformação de engenharia é, portanto uma grandeza adimensional e representa um valor médio específico da deformação tomado sobre a extensão do segmento observado. Admitindo que a seção transversal no estado não deformado tenha área A_0 , e que a força se distribui uniformemente em todos os pontos da seção transversal, a tensão de engenharia pode ser expressa através da τ =Equação 27 como:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Equação 27

1.7.13 Tensão e deformação verdadeiras

A deformação real ou verdadeira no processo de carregamento pode ser estabelecida imaginando-se uma sequência de etapas de carregamento onde o corpo alonga-se de um valor Δl . Tomados intervalos Δl_i muito pequenos, ou

seja, aumentando indefinidamente o número de etapas i , a deformação pode ser definida através da Equação 28 como:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

Equação 28

Tem-se, portanto que a integral resulta na Equação 29.

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$

Equação 29

Ao valor ε dá-se o nome de **deformação verdadeira**.

Neste caso, se o carregamento é feito em etapas, as deformações ocorrem conforme demonstradas Equação 30, 31 e 32 abaixo.

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

Equação 30

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{l_2}{l_0}$$

Equação 31

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \ln \frac{l_2}{l_0}$$

Equação 32

Com isto vê-se que a deformação verdadeira é uma grandeza aditiva.

Similarmente, define-se a **tensão de engenharia** como na Equação 33.

$$\sigma = \lim \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Equação 33

Se o valor de σ é tomado constante, sobre uma determinada seção transversal, isto é, se a força é uniformemente distribuída sobre a área da seção, tem-se a Equação 34.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Equação 34

Onde **A** é o valor instantâneo da área da seção transversal. O valor da tensão verdadeira é um valor instantâneo de tensão, portanto independente das dimensões originais do corpo carregado.

1.7.14 Relação entre tensão de engenharia e tensão verdadeira

O valor instantâneo da tensão real para uma carga F , com área instantânea da seção transversal A , foi definido como F/A . Para o regime de deformação plástica, o volume do corpo permanece constante. Levando em conta as expressões da tensão de engenharia $S = F/A_0$ e da deformação de engenharia, pode-se escrever a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$\sigma \equiv S$$

Equação 35

Então as duas tensões são praticamente iguais, considerando pequenas deformações.

1.7.15 Outras propriedades obtidas no ensaio de tração.

Além das propriedades que já foram citadas anteriormente, o ensaio de tração pode ainda determinar outra propriedade mecânica: o Coeficiente de Encruamento. O coeficiente de encruamento N , segundo a equação de Hollomon, é também uma medida da ductilidade, uma vez que ele indica a deformação verdadeira para a qual a estricção do metal é iniciada. É adimensional e independe do tamanho inicial do corpo de prova analisado, é função da microestrutura, sendo sensível ao tamanho de grão da matriz e da quantidade de impurezas contidas na mesma. Sua dependência em relação ao tamanho de grão da matriz (d), para aços de baixo Carbono, é dada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$N = \frac{5}{10 + d^{-\frac{1}{2}}} \text{ (sendo } d \text{ dado em milímetros)}$$

Equação 36

Às vezes, há a necessidade de determinar-se mais que um valor de N para um mesmo material, visto que este pode obedecer à equação de Hollomon em determinado trecho da curva tensão x deformação e em outro trecho, necessitar de outro que se adapte melhor. Isto é bastante comum no caso dos aços.

Outro método de quantificar o encruamento está relacionado com a curva tensão-deformação verdadeiro. Uma comparação esquemática entre comportamentos de tensão-deformação de engenharia e verdadeiro é feito na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nela é possível observar que a tensão verdadeira necessária para manter uma deformação crescente continua a aumentar após o limite de resistência a tração, ponto M' .

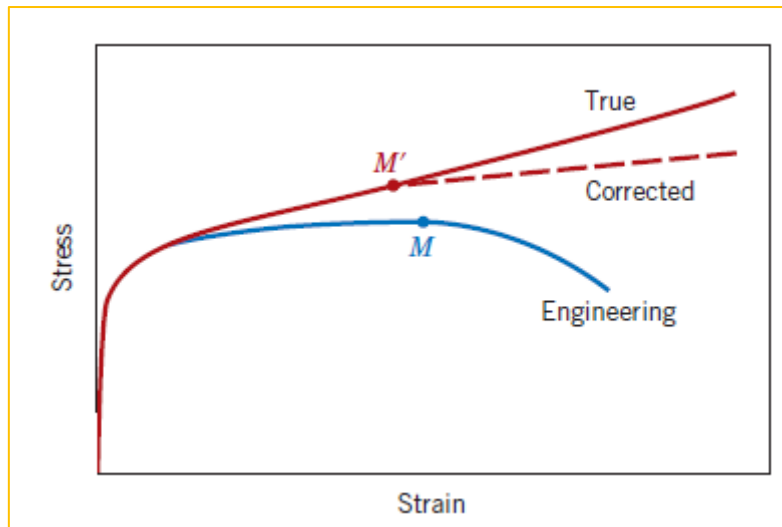


Figura 24 - Comparação entre curvas de tensão-deformação de engenharia e verdadeira. [1]

Coincidentemente á formação de um empescoçamento, há a introdução de um estado de tensões complexo (existência de outras componentes de tração além da axial). Como consequência disto, a tensão correta (axial) no empescoçamento é ligeiramente menor do que a tensão calculada a partir da carga aplicada e da área da secção transversal do empescoçamento, levando a curva corrigida mostrada na figura.

Para alguns metais e ligas, a região da curva tensão-deformação verdadeira tem início na deformação plástica até o ponto de início de empescoçamento, e pode ser aproximada pela Equação 37.

$$\sigma_v = K \epsilon^n$$

Equação 37

Nessa expressão, K e n são constantes, cujos valores variam de uma liga para outra e também dependem da condição do material, ou seja, se ele foi tratado termicamente ou deformado. O parâmetro n é denominado expoente de encruamento, possuindo valores menores que um.

A tabela 2, a seguir, apresenta alguns valores de n e K para algumas ligas.

Tabela 2 - Coeficientes n e K . [1]

<i>Material</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	
		<i>MPa</i>	<i>psi</i>
Low-carbon steel (annealed)	0.21	600	87,000
4340 steel alloy (tempered @ 315°C)	0.12	2650	385,000
304 stainless steel (annealed)	0.44	1400	205,000
Copper (annealed)	0.44	530	76,500
Naval brass (annealed)	0.21	585	85,000
2024 aluminum alloy (heat treated—T3)	0.17	780	113,000
AZ-31B magnesium alloy (annealed)	0.16	450	66,000

1.8 Materiais dúcteis e frágeis

Um material dúctil é aquele que pode ser alongado, flexionado ou torcido, sem se romper. Ele admite deformação plástica permanente, após a deformação elástica. A deformação plástica, em geral, é acompanhada de encruamento. O ponto de escoamento determina a transição entre as fases elástica e plástica (com ou sem patamar na curva).

Um material frágil rompe-se facilmente, ainda na fase elástica. Para estes materiais o domínio plástico é praticamente inexistente, indicando sua pouca capacidade de absorver deformações permanentes. Na curva tensão deformação, a ruptura se situa na fase elástica ou imediatamente ao fim desta, não havendo fase plástica identificável.

A seguir, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são apresentadas curvas tensão - deformação para diferentes materiais.

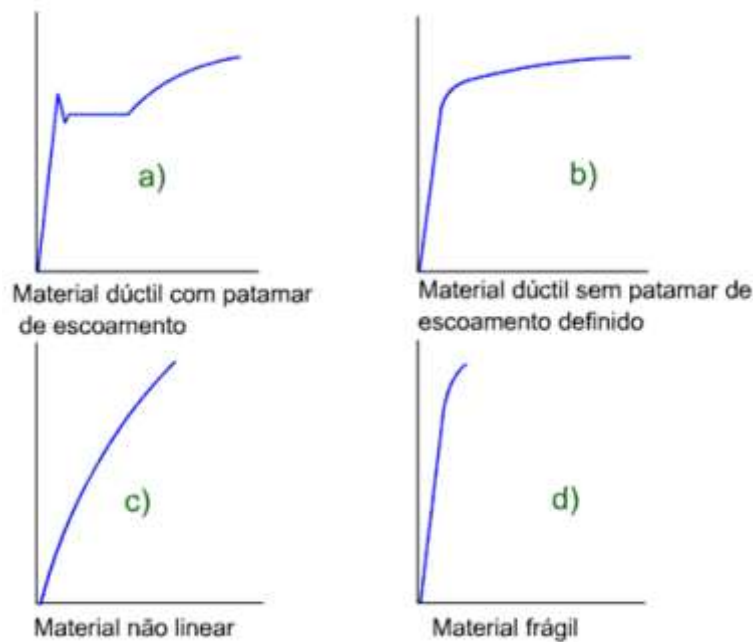


Figura 25 - Diagrama tensão-deformação para diferentes materiais. [1]

Para os materiais de engenharia, existem duas modalidades de fratura, dúctil e frágil. A classificação é baseada na habilidade de um material apresentar deformação plástica. Os materiais dúcteis exibem tipicamente uma deformação plástica substancial com uma grande absorção de energia antes da fratura. Por outro lado existem pouco ou nenhuma deformação plástica, com uma baixa absorção de energia, acompanhando uma fratura frágil.

Qualquer processo de fratura envolve duas etapas, formação e propagação de trincas em resposta a imposição de uma tensão. O modo da fratura é altamente dependente do mecanismo de propagação da trinca. A fratura dúctil é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando, isso resulta numa propagação lenta à medida que o comprimento da trinca aumenta. Assim é dito que a trinca é estável.

Acompanhando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Após o início do empescoamento, pequenas cavidades ou microvazios se formam no interior da seção transversal (b). Em seguida, à medida que a deformação prossegue, esses micros vazios aumentam, se aproximam e coalescem para formar uma trinca elíptica (c). Finalmente a fratura ocorre pela rápida propagação de uma trinca ao redor do perímetro externo do pescoço (d). Por meio de deformação cisalhante em um ângulo de aproximadamente 45° em relação ao eixo de tração, esse é o ângulo no qual a tensão de cisalhamento é máxima (e).

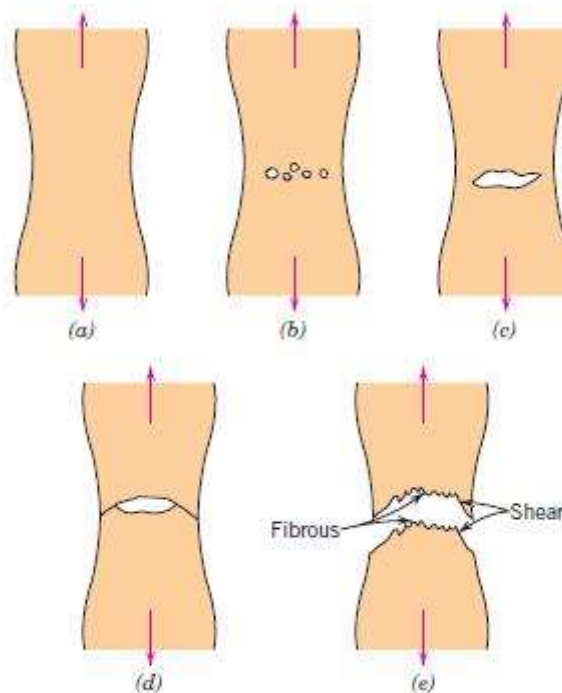


Figura 26 - Estágios de surgimento da fratura. (a) empescoçamento inicial (b) formação de cavidades pequenas. (c) coalescência de cavidades para formar trinca. (d) propagação da trinca. [1]

(e) fratura final.

Já em materiais frágeis, as trincas podem se propagarem de maneira extremamente rápida, acompanhadas de muito pouca deformação plástica, tais trincas são denominadas instáveis. A propagação da trinca, uma vez iniciada, irá continuar espontaneamente sem aumento na magnitude da tensão aplicada.

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e pela rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é aproximada perpendicular à direção da tensão de tração aplicada e produz uma superfície de fratura relativamente plana. Estarão ausentes quaisquer sinais de deformação plástica generalizada.

As superfícies das fraturas frágeis podem apresentar “marcas de sargento” (formato em “V”), que podem se formar perto do centro da seção transversal da fratura, apontando em direção ao ponto de início da trinca, veja **aErro! Fonte de referência não encontrada.(a)**. Outras superfícies de fratura frágil contêm linhas ou nervuras que se irradiam a partir do ponto de origem da trinca seguindo um padrão em forma de leque, veja **aErro! Fonte de referência não encontrada.(b)**.

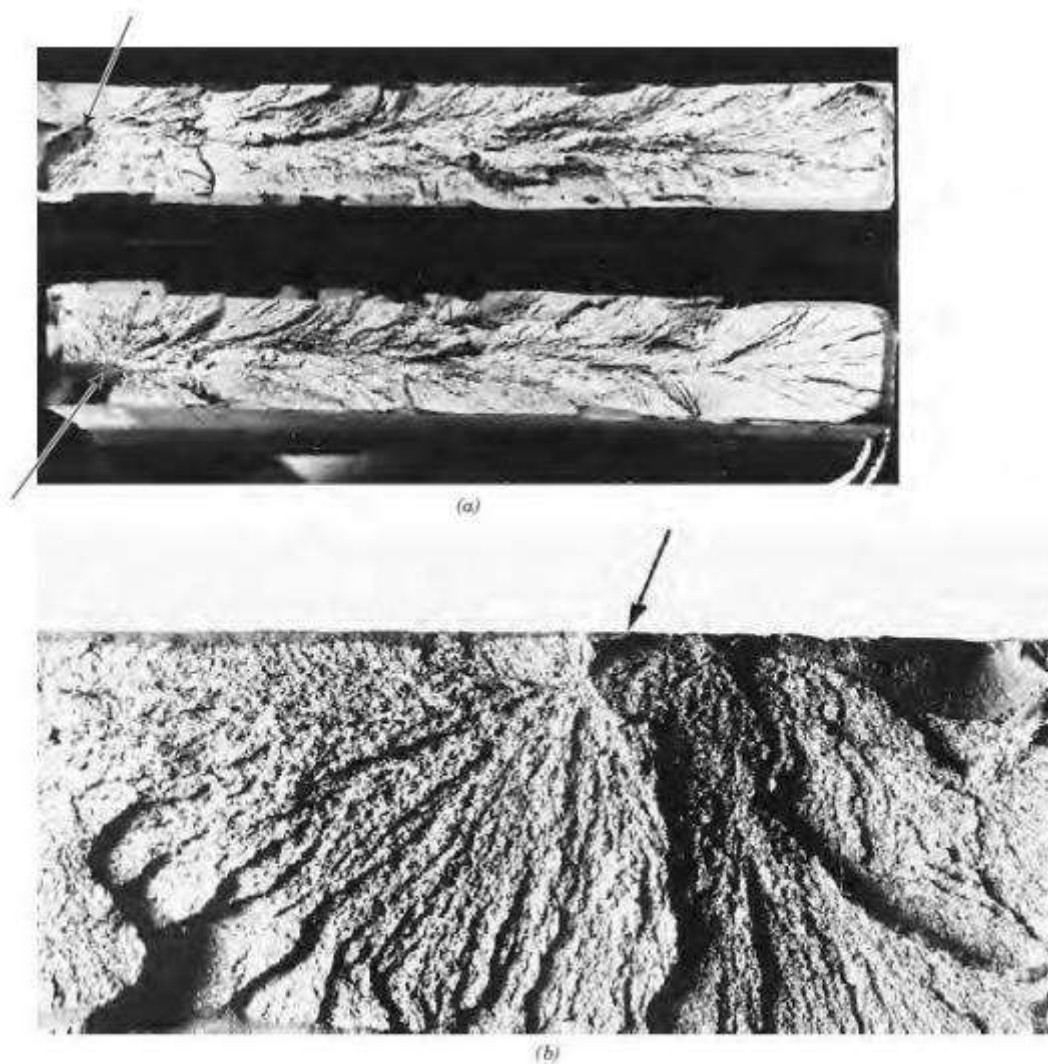


Figura 27 - Aspectos da fratura frágil, “marcas de sargento” (a) e nervuras radiais em formato de leque (b). [1]

O aspecto macroscópico do corpo de prova de tração é mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, em (a) mostrando a fratura dúctil, do tipo cone e taça em um corpo de alumínio e em (b) mostrando um corpo de prova com fratura frágil de aço doce.



Figura 28 - (a) fratura dúctil e (b) fratura frágil [1]

1.9 Extensômetros

Os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados geralmente entre os engenheiros de instrumentação.

Sendo assim, os extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação.

Os extensômetros utilizados no LPM (Laboratório de Propriedades Mecânicas) mostrados nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, servem para medição de pequenas deformações em corpos de prova rígidos. Apresentam configuração dupla com sensores independentes para medição em cada lado do corpo de prova e caixa de equalização para obtenção do sinal de deformação média, com distância base de medida de 50 mm e máxima deformação mensurável de 2,5 mm, para montagem direta sobre o corpo de prova.



Figura 29 - Extensômetro tipo Clip Gage.



Figura 30 - Instalação de Extensômetro Clip Gage em Corpo de Prova.

1.10 Fontes de erro na geração da curva tensão-deformação

No ensaio de tração, os erros mais comuns são ocasionados no extensômetro. Durante o ensaio, a deflexão do quadro de carga, composto pelas colunas da máquina, cabeçote e mesa, em relação à deformação do corpo de prova pode ser grande o suficiente para gerar significativas discrepâncias.

Por isso, o extensômetro deverá medir apenas a deformação do corpo de prova. Na maioria das vezes, liga-se o extensômetro no corpo de prova, ou utilizam-se sistemas de medição sem contato. Um extensômetro é caracterizado por um mecanismo de fixação, as pontas em faca, o comprimento de medição, o movimento percentual e a sua precisão. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 32 apresentam um esquema típico de montagem e escorregamento de facas de extensômetro.

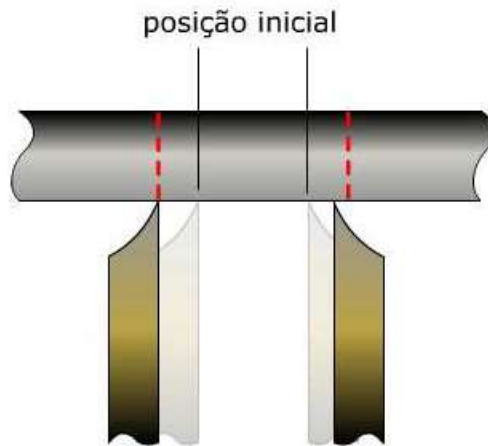


Figura 31- Pontas em faca e o escorregamento. [site](#)

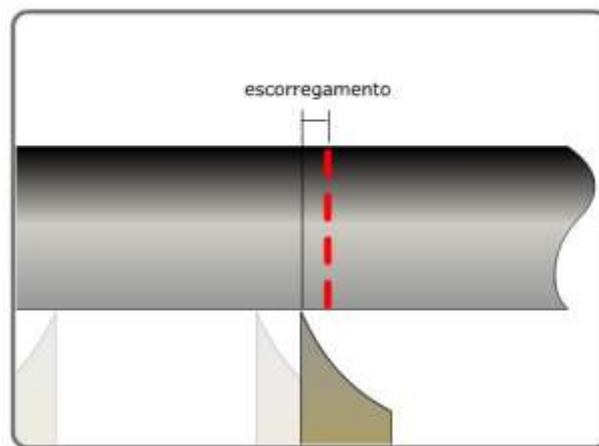


Figura 32- Representação do escorregamento durante o ensaio de tração. [site](#)

Caso o ajuste do mecanismo de fixação estiver desgastado ou com pontas, poderão ocorrer erros na confecção do diagrama. O escorregamento é uma fonte de erros muito comum em ensaio de metais. Com o intuito de evitar tais inconvenientes, deve-se adotar um programa de manutenção na máquina de ensaios, para que sejam substituídas pontas desgastadas e as molas que não estejam pressionando adequadamente o corpo de prova. Comprimentos de medição padrão para extensômetros são em geral 1" 2" e 8".

O comprimento de medição necessário depende do tamanho do corpo de prova e do método de teste. Deve ser tomado cuidado para fixar o comprimento de medição na hora de fixar o extensômetro. O ajustamento adequado e a operação das paradas mecânicas eliminam os erros de comprimento de medição.

Deve haver a compatibilidade entre o curso total do movimento do extensômetro e o alongamento total do corpo de prova. Para extensômetros com cursos grandes, pode ser difícil determinar o "E" com precisão.

Já com cursos pequenos, poderá não ser possível a medição completa de alguns parâmetros. As garras de fixação da máquina de ensaio em "v" são

as mais usadas em testes de metais. Com o aumento da carga axial, as cargas atuam aumentando a pressão de aperto sobre o corpo de prova.

Pode haver o ajuste manual das garras, bem como o ajuste hidráulico e pneumático. Caso o número de testes for grande, não é recomendando o ajuste manual. As garras devem estar limpas e novas, pois se a superfície da mesma estiver suja ou desgastada, pode ocorrer o escorregamento do corpo de prova, o que causa erros no levantamento do diagrama.

Outro detalhe de suma importância é o alinhamento do corpo de prova com as garras durante a montagem do teste, pois tais desvios podem provocar o surgimento de tensões de flexão e diminuição dos valores lidos da tensão de tração. Algumas máquinas de teste necessitam do uso de contra porcas, para que se mantenham as morsas em posição adequada. Estas porcas devem ser apertadas com a máquina carregada na sua capacidade máxima de carga, sendo usado um corpo de prova especial para o ajuste.

2. Flexão

A resistência mecânica de cerâmicas, aços ferramenta e metal duro em geral não são avaliados a partir da curva tensão-deformação gerada no ensaio de tração, devido à dificuldade na preparação e no teste dos corpos de prova (elevando o custo do ensaio), assim como pela alta sensibilidade à fratura do corpo de prova nos pontos de fixação.

Portanto, em função desta demanda e pelo uso predominante dos materiais cerâmicos foi desenvolvido um ensaio de flexão com o objetivo de ser utilizado em materiais frágeis para determinar a tensão e flecha de ruptura. Este ensaio também permite avaliar outras propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade à flexão.

A vantagem do ensaio de flexão é a fácil preparação dos corpos de prova quando comparado com o ensaio de tração. No entanto, os materiais frágeis apresentam resultados com grande dispersão, de modo que em geral é necessário realizar vários ensaios para quantificar a tensão de resistência à flexão com uma precisão adequada. Para o processamento dos dados podem ser usadas ferramentas estatísticas, que serão mais utilizadas quando a dispersão for grande e/ou o grau de exigência dos ensaios for alto.

2.1 Ensaio de flexão

O ensaio consiste basicamente em apoiar um corpo de prova e aplicar uma força de flexão (F) que pode ser concentrada ou distribuída, de forma a produzir uma deflexão no mesmo até sua ruptura. Uma das variações do ensaio de flexão é mostrada nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 34 a seguir, onde a carga é concentrada e aplicada no centro do corpo de prova.

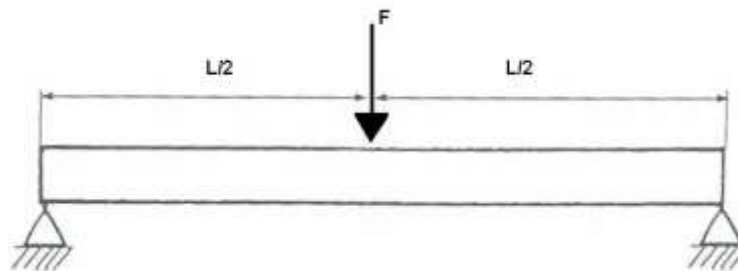


Figura 33 -Esquema de Ensaio de Flexão. [Site](#)



Figura 34 - Equipamento e corpo de prova no ensaio de flexão de três pontos.

O ensaio de flexão pode ser realizado de outras maneiras onde a configuração é diferente daquela mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, por exemplo, o corpo apoiado em duas extremidades e com dois pontos de aplicação de carga.

O ensaio de flexão é feito, geralmente, com corpo de prova constituído por uma barra de secção circular ou retangular para facilitar os cálculos, com um comprimento especificado. A carga deve ser elevada lentamente até romper o corpo de prova.

Quando se tem uma barra de secção retangular de comprimento “ L ”, altura “ a ”, e largura “ b ” da secção normal, e no centro está aplicada uma carga de flexão (cortante) “ F ”, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os elementos internos da barra estarão sujeitos a um sistema de tensões de compressão e tração. Há, no entanto, um plano em que não há tensão, ou seja, a tensão resultante é zero. Este plano geralmente é denominado de linha neutra.

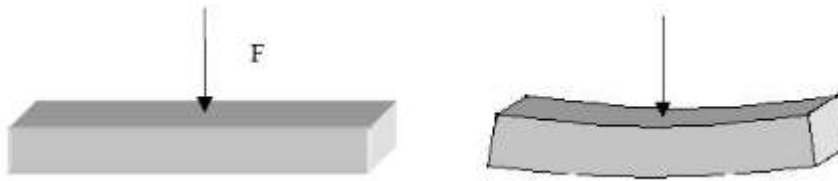


Figura 35- Flexão em uma barra de secção retangular. [2]

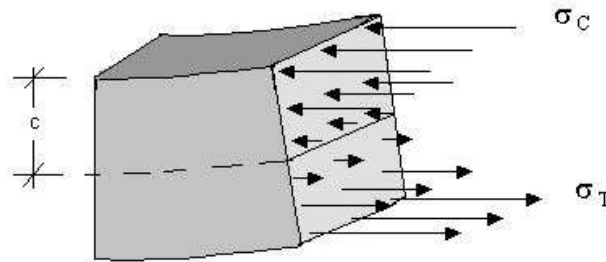


Figura 36- Elemento de uma Barra de secção retangular submetida à flexão. [2]

A resistência à flexão é definida como a tensão máxima de tração na ruptura e é denominado frequentemente como módulo de ruptura (MOR), do inglês “*modulus of rupture*”, que significa o valor máximo da tensão de tração ou de compressão nas fibras externas do corpo de prova.

Se a ruptura ocorrer dentro da zona elástica do material, o módulo de ruptura (MOR) representará a tensão máxima na fibra externa; caso ocorra na zona plástica, o valor obtido para MOR é maior que a tensão máxima realmente atingida, porque a expressão é determinada para uma distribuição linear (elástica) de tensão entre o eixo da barra e as fibras externas. O valor do módulo de ruptura também pode ser relacionado com o limite de resistência do material.

A tensão fletora é dada pela equação Equação 38:

$$\sigma = \frac{+M_f c}{-I}$$

Equação 38

Onde:

σ é a tensão fletora (tensão normal de compressão ou de tração);

M_f é o momento fletor;

I é o momento de inércia da secção transversal;

c é a distância da linha neutra até a fibra mais afastada (Para o ensaio de flexão que é feito com barras retangulares esta distância é a metade da espessura do corpo de prova).

O sinal positivo e negativo corresponde às tensões de tração e de compressão respectivamente. Na “**linha neutra**”, vista sob um plano, a tensão resultante é zero.

No dimensionamento das peças à flexão admitem-se apenas deformações elásticas. A tensão de trabalho é fixada pelo fator de segurança ou pela tensão admissível. A fórmula da tensão é aplicada nas secções onde pode haver ruptura do material, ou seja, nas regiões que se tem momento fletor máximo que produzirá tensões de compressão e de tração máximas, a qual poderá ser superior à tensão de resistência do material.

O momento de inércia de uma secção retangular segundo um sistema de eixo cartesiano “YZ” é dado pela Equação 39 e pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$I_y = \frac{ab^3}{12} \text{ (em relação ao eixo } y)$$

Equação 39

$$I_z = \frac{ab^3}{12} \text{ (em relação ao eixo } z)$$

Equação 40

E, para uma secção circular, o momento de inércia em relação ao eixo Y ou Z é dado pela Equação 41:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

Equação 41

Onde, “D” é o diâmetro da secção circular.

A partir de um modelo simplificado do ensaio de flexão de três pontos, onde foram substituídas as variáveis relacionadas anteriormente (Figura 37), permite realizar o cálculo da tensão de flexão utilizando as equações 42 e 43 para as duas geometrias básicas (retangular e circular).

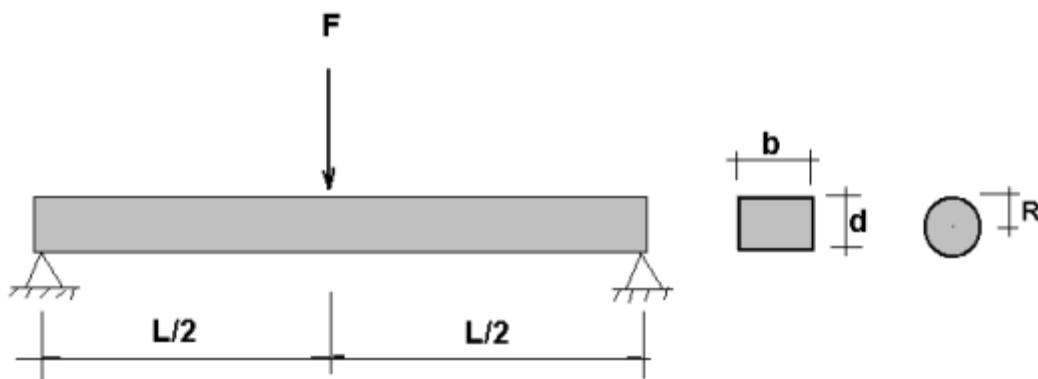


Figura 37 – Modelo de Flexão de três pontos [2]

$$\sigma_f = \frac{3F_f L}{2bd^2} \text{ (Seção retangular)}$$

Equação 42

$$\sigma_f = \frac{F_f L}{\pi R^3} \text{ (Seção circular)}$$

Equação 43

No caso de flexão pura, como o caso descrito anteriormente, a linha neutra forma um arco, onde cada secção infinitesimal da barra está em equilíbrio sob a ação de momentos fletores iguais e opostos, de módulo M_f . A flecha “ f ” do arco de circunferência (deflexão da barra) é dada pela Equação 44:

$$f = \frac{1}{48} \frac{FL}{EI}$$

Equação 44

Onde:

“ E ” é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young,

“ I ” é o módulo de flexão plana ou momento de inércia, que cada perfil tem seu valor próprio.

Quanto maior for o momento de inércia da secção retangular menor será a flexão, para um dado material e um determinado momento fletor. Isto significa que a posição da viga tem grande influência na resistência a flexão. A Figura 38 mostra o caso da flexão plana normal produzida por uma força “ F ” aplicada na extremidade livre de uma barra em balanço, com uma extremidade engastada.

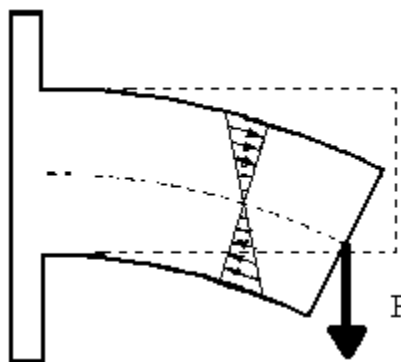


Figura 38- Viga em balanço com engaste rígido sendo fletida por uma força F aplicada em sua extremidade. [2]

Neste caso, não se tem uma flexão pura, mas uma combinação de flexão e cisalhamento, devido à reação do engaste rígido que, no equilíbrio, equivale a uma força F' , igual e oposta a F , mais um momento binário oposto

ao gerado pelo par FF'. Existe ainda outro caso de flexão, a flambagem, muito frequente e importante no cálculo de estruturas metálicas e concreto armado, que é aquele provocado por uma carga vertical aplicada numa barra vertical, quando esta foge levemente de sua posição axial.

O equilíbrio, que inicialmente era obtido pela compressão axial da barra, se rompe quando o esforço aplicado foge ligeiramente da área da secção retangular, produzindo uma flexão crescente e quase que incontrolável. Dentro de um campo limitado de deformações, os corpos sólidos reais obedecem à lei de Hook. As deformações perfeitamente elásticas, em geral, só ocorrem no início do processo.

Com o tempo, o esforço e a deformação atingem valores assintóticos, podendo haver a ruptura do material pela fadiga do mesmo ou pela variação da sua tensão elástica. Isto acontece porque após a aplicação sucessiva de esforços de tração ou compressão, permanece uma deformação residual.

Os ensaios de flexão mais usados: os métodos de três pontos e os métodos de quatro pontos se encontram esquematizados juntamente com as distribuições das tensões respectivamente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 40. A tensão de flexão de três pontos pode ser calculada pela Equação 45 e a tensão de flexão de quatro pontos pode ser calculada pela Equação 46.

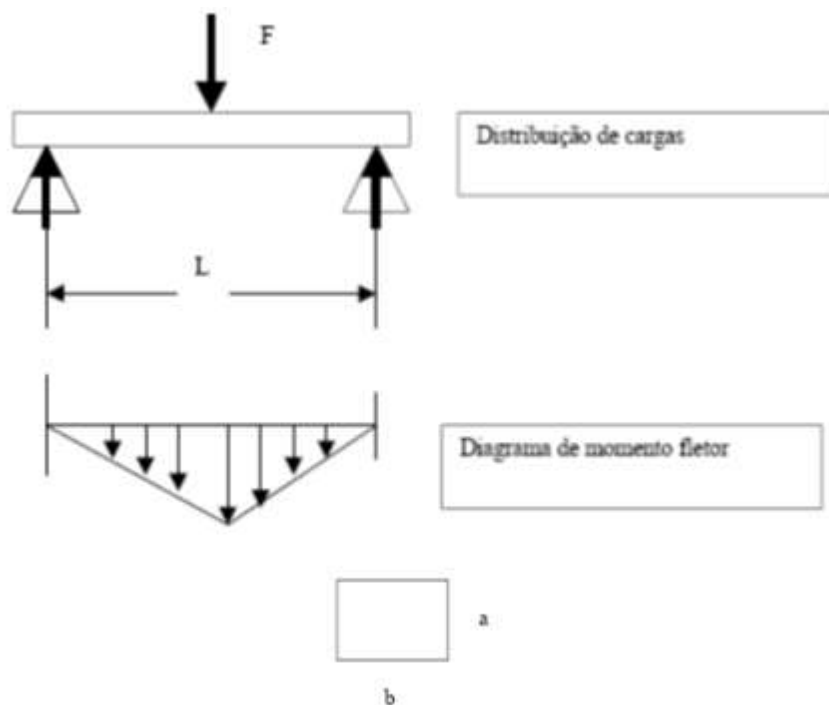


Figura 39 - Método de flexão três pontos. [2]

$$MOR = \frac{3 FL}{2 ba^2}$$

Equação 45

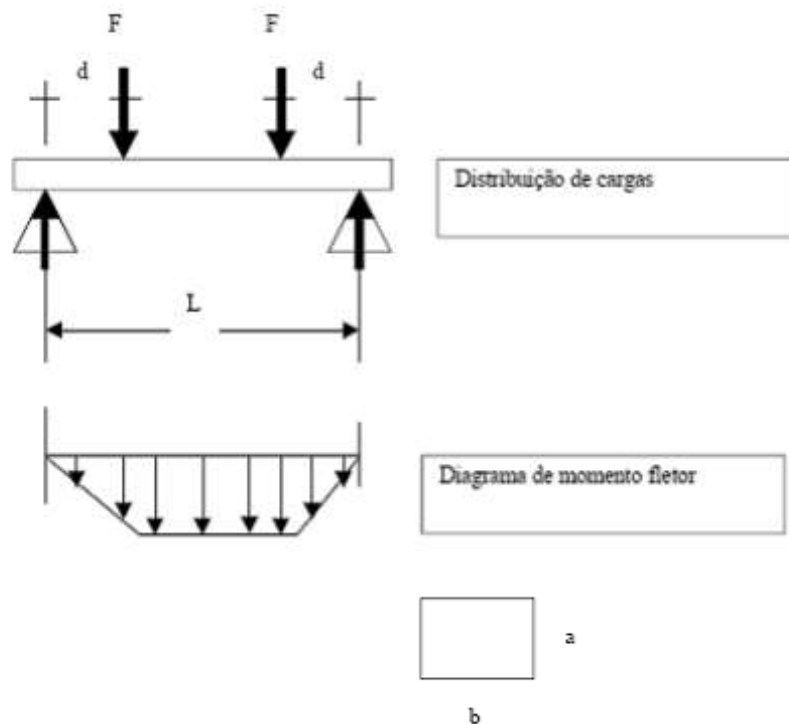


Figura 40- Método de flexão a quatro pontos.

$$MOR = 3 \frac{Fd}{ba^2}$$

Equação 46

Conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o ensaio de flexão à 3 pontos, possui um local onde o esforço é máximo, e o material sempre tende a romper na posição central indicada, a não ser que em outra localidade existam defeitos mais críticos que ocasionem sua ruptura.

Já para o ensaio de flexão à 4 pontos mostrado na Figura 40, uma região considerável do corpo de prova fica submetida ao mesmo esforço máximo, sendo que o corpo de prova romperá no local onde existir maior concentração de tensões.

Assim sendo, o ensaio de flexão à 4 pontos apresenta dados mais confiáveis a respeito do material ensaiado, visto que o volume de material ensaiado é mais representativo e sujeito a tensões mais equivalentes.

2.2 Corpos de prova

A obtenção dos corpos de prova deve seguir as recomendações do fabricante do material, podendo ser retirado do produto acabado ou podendo ser o próprio produto acabado, se ele for adequado para ser colocado na máquina de ensaio de flexão.

As normas técnicas especificam que os corpos de prova devem ser em forma de barra, as faces superiores e inferiores paralelas entre si e de mesmo comprimento, largura, espessura e peso para questões de comparação.

Para o ensaio de flexão é recomendado que o corpo de prova tivesse relação comprimento-largura (L/w) menor que 20, pois assim o deslocamento causado pelo cisalhamento é insignificante. As dimensões dos corpos de prova são importantes por terem influencia nos valores de resistência encontrados. Quanto maior o corpo de prova usado maior a probabilidade de encontrar defeitos ao longo da amostra e logo menores os valores de resistência.

Após a obtenção e confecção dos corpos de prova deve-se realizar um acabamento superficial fino para que a superfície fique livre de irregularidades que possam gerar concentradores de tensões. No caso de não ter sido especificado a quantidade de corpos de prova a serem ensaiados é recomendada um mínimo de cinco para haver obtenção de resultados mais confiáveis, porém o ideal é que o número de corpos de prova seja maior que 10.

2.3 Comportamento dos materiais cerâmicos à flexão

Os materiais cerâmicos possuem características intrínsecas quanto ao seu comportamento mecânico como, por exemplo, elevada dureza e fragilidade. Conhecer as propriedades que descrevem estas características é importante para a escolha e o dimensionamento de componentes desta classe de materiais.

As cerâmicas são constituídas por átomos metálicos e não metálicos; na maioria das vezes, elas consistem de óxidos, nitretos e carbeto. Por exemplo, alguns dos materiais cerâmicos incluem o óxido de alumínio (ou alumina Al_2O_3), o dióxido de silício (ou sílica SiO_2), o carbetto de silício (SiC), o nitreto de silício (Si_3N_4) e, ainda, o que alguns referem como sendo as cerâmicas tradicionais, aquelas que são compostas por minerais argilosos, assim como o cimento e o vidro.

Em relação ao comportamento mecânico, os materiais cerâmicos são relativamente rígidos e resistentes (a rigidez e a resistência são comparáveis àquelas dos metais). Adicionalmente, as cerâmicas são tipicamente muito duras. Por outro lado, elas são extremamente frágeis (ausência de ductilidade) e altamente suscetíveis à fratura.

Na temperatura ambiente, tanto as cerâmicas cristalinas quanto as não cristalina quase sempre fraturam antes que qualquer deformação plástica possa ocorrer em resposta à aplicação de uma carga de tração. O processo de fratura frágil consiste na formação e na propagação de trincas ao longo da seção transversal de um material, em uma direção perpendicular a da carga aplicada. O crescimento da trinca nas cerâmicas cristalinas pode ser tanto transgranular como intergranular; nas fraturas transgranulares, as trincas se

propagam ao longo dos planos cristalográficos específicos (ou planos de clivagem), que são planos com alta densidade atômica.

Os limites de resistência medidos para os materiais cerâmicos são substancialmente menores do que os estimados pela teoria a partir das forças de ligação interatômicas. Isso pode ser explicado pela existência de defeitos muito pequenos e onipresentes no material, que servem como concentradores de tensão – pontos onde a magnitude de uma tensão de tração aplicada é amplificada.

Esses concentradores de tensão podem ser diminutas trincas superficiais ou internas (microtrincas), poros internos e vértices do grão, os quais são virtualmente impossíveis de serem eliminados ou controlados. Uma concentração de tensões na extremidade de um defeito pode causar a formação de uma trinca, a qual pode se propagar até uma eventual falha.

Existe geralmente uma variação e dispersão consideráveis no limite de resistência para muitas amostras de um material cerâmico frágil específico. Esse fenômeno pode ser explicado pela dependência da resistência à fratura com a probabilidade da existência de um defeito que seja capaz de iniciar uma trinca.

Essa probabilidade varia de uma amostra para outra do mesmo material e depende da técnica de fabricação e de qualquer tratamento subsequente. O tamanho ou volume da amostra também influencia o limite de resistência; quanto maior for uma amostra, maior é a probabilidade de existirem defeitos e menor é o limite de resistência.

Para tensões de compressão, não existe qualquer amplificação da tensão associada a qualquer defeito existente. Por essa razão, as cerâmicas frágeis exibem resistências muito maiores em compressão do que em tração (da ordem de um fator de 10) e elas são geralmente utilizadas quando as condições de aplicação de carga são de imposição de tensões residuais de compressão na sua superfície.

Cerâmicas são tipicamente isolantes à passagem de calor e eletricidade e são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes severos do que os metais e polímeros. Em relação às suas características ópticas, as cerâmicas podem ser transparentes, translúcidas e opacas e algumas à base de óxidos exibem comportamento magnético.

Através do ensaio de flexão pode-se determinar a tensão de ruptura de um lote de amostras, e a partir destes dados realizar uma análise estatística para estimar o comportamento mecânico de toda uma população através da determinação dos parâmetros de Weibull. As figuras 41 e 42 mostram ensaios de flexão de três e quatro pontos em corpos de prova cerâmicos.

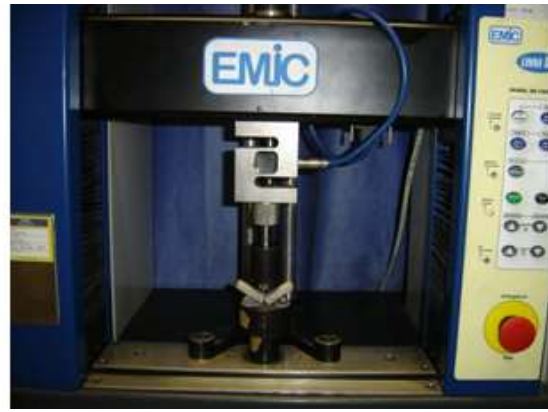
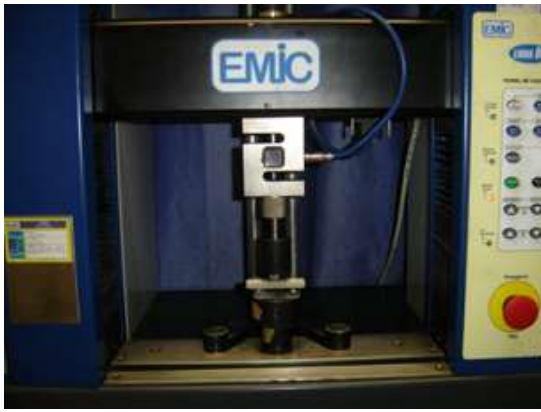


Figura 41 - Ensaio de Flexão a três pontos em corpos de prova cerâmicos.



Figura 42 - Ensaio de Flexão a quatro pontos em corpos de prova cerâmicos.

2.4 Distribuição de Weibull

Cerâmicas são materiais de baixa reprodutibilidade, já que sua ruptura depende dos defeitos presentes na mesma. Assim, quando ensaiados, os corpos de prova apresentam defeitos distintos e localizados de forma aleatória, o que irá ocasionar a fratura sob diferentes tensões.

A fim de se estimar a probabilidade de falha de um componente, bem como a confiabilidade em determinada aplicação, os dados resultantes de sucessivos ensaios de flexão podem ser organizados através do modelo estatístico proposto por Weibull. A distribuição de Weibull, nomeada pelo seu criador Waloddi Weibull, é uma distribuição de probabilidade contínua, usada em estudos de tempo de vida de equipamentos e estimativa de falhas. A função densidade de Weibull é dado pela equação Equação 47.

$$F = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m}$$

Equação 47

Que ajustando os parâmetros σ_0 e m , pode-se ajustar a função densidade de probabilidade de diferentes formas, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

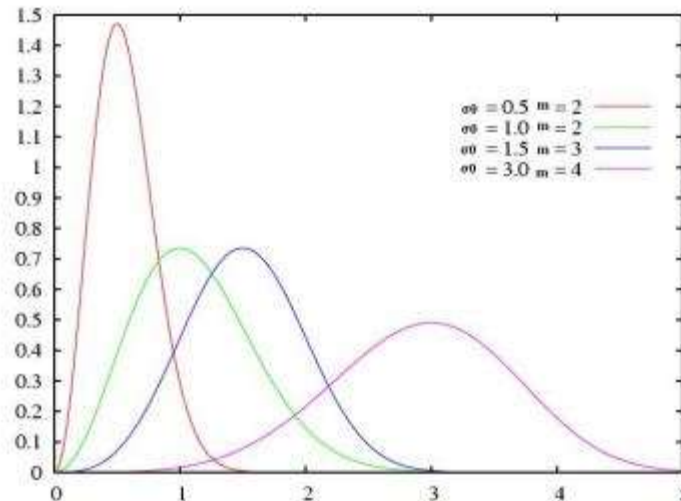


Figura 43 - Ajustes da função densidade de probabilidade de Weibull.

Também se pode ajustar uma expressão cumulativa, mostrada na Equação 48:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m}$$

Equação 48

Na equação anterior, F é a probabilidade de falha, σ é a tensão de ruptura do material, já σ_0 atende pela tensão na qual 63,2% dos corpos de prova romperam e m é o módulo de Weibull que é determinado pela inclinação da reta e sugere a confiabilidade do material. Quanto maior este valor melhor o ensaio, uma vez que indica uma menor distribuição dos dados, ou seja, as amostras tenderão a fraturar na mesma tensão.

Aplicando-se o logaritmo natural dos dois lados da equação, é possível linearizar a equação cumulativa de Weibull na forma $y = ax + b$ como demonstra a.

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$$

Equação 49

Assim, pode-se construir um gráfico para obterem-se os parâmetros de Weibull (σ_0 e m).

O modelo proposto por Weibull, possui 2 parâmetros a se definir, que são:

- $m \rightarrow$ Coeficiente de repetibilidade para as medidas. Indica a frequência com a qual as tensões de ruptura podem se repetir. Quanto maior o valor de “ m ”, mais confiável e regular será o material, sendo que “ m ” menores equivalem a dispersão nas tensões de ruptura. Basicamente, valores de “ m ” menores que 6 são ruins, e acima de 15 são interessantes.

- $\sigma_0 \rightarrow$ É a tensão para a qual 63,2% dos corpos de prova rompem. Para determiná-la, deve-se montar o gráfico de Weibull, e o ponto no qual ocorre a intersecção do eixo das ordenadas corresponderá ao valor de σ_0 .

Para montar o gráfico, deve-se colocar as tensões em ordem crescente, e utilizar um ordenador (ordenador: numeral que começa com o numero 1). Este ordenador serve para relacionar as tensões mais baixas a valores menores (o número 1 será relacionado a tensão mas baixa e assim por diante). Como o ordenador tem seu valor relacionado com a tensão, pode-se então relacioná-lo com a probabilidade de falha para determinadas tensões. Então a probabilidade de falha é calculada mediante a Equação 50

$$Pf = \frac{n}{N + 1}$$

Equação 50

Onde:

Pf é a probabilidade de falha

n é a ordem numérica crescente das medidas de tensão (ordenador)

N é o número total de observações.

Após ter feito o procedimento descrito anteriormente, pode-se encontrar os valores do eixo das ordenadas através da Equação 51:

$$\ln(\ln(\frac{1}{1 - Pf}))$$

Equação 51

Posteriormente os dados são plotados como é mostrado no gráfico da

Erro! Fonte de referência não encontrada..

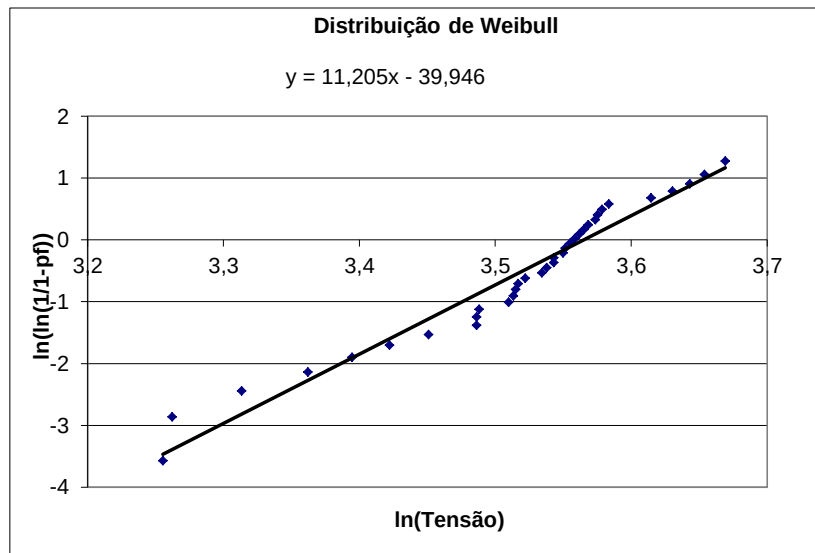


Figura 44 - Exemplo de plot de $\ln(\ln(1/(1-pf))) \times \ln(\text{tensão})$.

A seguir é retratado um exemplo onde se tratam os dados de um ensaio a flexão segundo o método de Weibull:

Foram testados 20 corpos de prova cerâmicos de seção retangular sendo que os mesmos foram divididos em dois lotes, nos quais um lote estava com a superfície esmaltada voltada para cima e o outro lote estava com a superfície esmaltada voltada para baixo. O valor médio de largura dos corpos de prova é de 20,10 mm com desvio padrão de 0,1146 mm e o valor médio da espessura é de 7,985 mm com desvio padrão de 0,08127 mm e distância entre apoios igual a 42 mm

O ensaio de flexão a três pontos foi realizado em uma máquina universal de ensaios, utilizando-se uma célula de carga de dois KN e velocidade de carregamento de um mm/min, Os resultados da fratura dos corpos de prova foram obtidos e dispostos em ordem crescente de tensão, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 3 - Resultados das tensões de ruptura de um exemplo de ensaio de flexão à três pontos.

Esmalte virado para cima			Esmalte virado para baixo		
CP's	Força máxima (N)	Tensão (Mpa)	CP's	Força máxima (N)	Tensão (Mpa)
1,00	561,95	32,28	11,00	704,68	40,28
2,00	580,57	34,37	12,00	767,42	43,86
3,00	583,33	34,18	13,00	755,70	44,96
4,00	568,85	32,19	14,00	742,60	42,23
5,00	715,71	41,73	15,00	657,79	38,35
6,00	671,58	38,96	16,00	699,16	40,97
7,00	610,22	35,76	17,00	771,56	47,56
8,00	591,60	34,66	18,00	700,54	40,84
9,00	636,42	38,05	19,00	688,82	40,16
10,00	728,81	43,79	20,00	699,85	41,64

Os dados relativos às tensões de ruptura são ordenados em uma sequência crescente e a cada tensão é associada uma probabilidade cumulativa de ruptura até aquela tensão, definida pela Equação 52:

$$F = \frac{n}{N + 1}$$

Equação 52

Onde n é o numero da amostra e N o numero total de amostras.

Para se associar a menor probabilidade ao menor valor de tensão, mantêm-se os valores das tensões na ordem citada acima, sendo assim, o maior valor de tensão apresentará a maior probabilidade. Obtidos esses valores probabilísticos segue-se com a análise estatística mencionada.

Em seguida, é plotado $\ln \ln[1/(1-F)] \times \ln(\sigma)$. Os gráficos obtidos se encontram na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

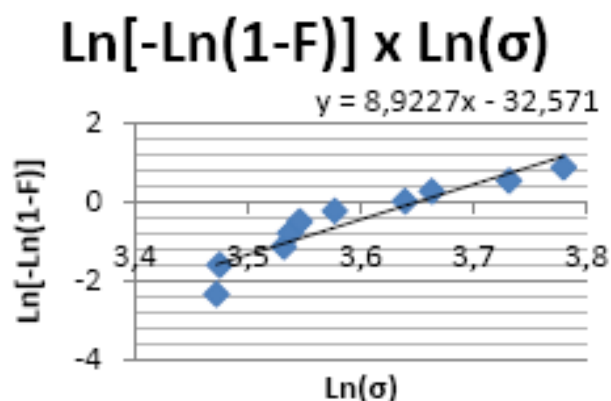


Figura 45 - Distribuição de Weibull com o esmalte voltado para cima.

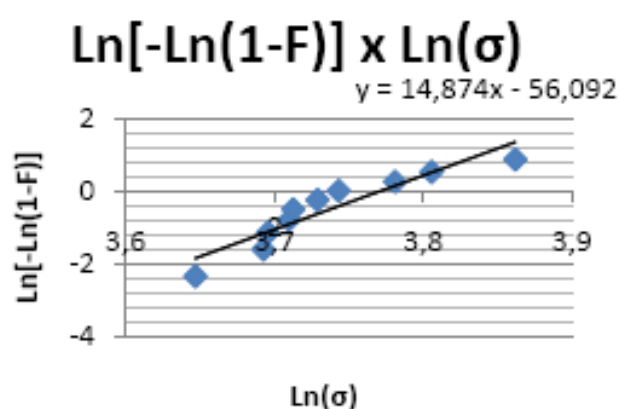


Figura 46 - Distribuição de Weibull com o esmalte voltado para baixo.

Com a adição de uma linha de tendência linear nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode-se determinar m , que é o chamado coeficiente de Weibull, e σ_0 . As equações lineares obtidas são respectivamente:

$$y = 8,9227x - 32,571$$

Equação 53

$$y = 14,874x - 56,092$$

Equação 54

Portanto, o lote de corpos de prova de esmalte voltado para cima apresentou um valor de “ m ” igual a 8,9 sendo que para o lote com o esmalte voltado para baixo apresentou valor de “ m ” igual a 14,9. Analisando o parâmetro de Weibull, conclui-se que quando maior o seu valor, menor é a dispersão nos valores de resistência e conseqüentemente, uma distribuição mais homogênea dos defeitos na microestrutura do corpo de prova.

Pode-se concluir a partir do gráfico da distribuição de Weibull que quanto mais à reta estiver deslocada para direita, mas, mantendo o valor de m , maior é

a resistência do material (tendo a mesma distribuição de defeitos), porém, com um corpo de prova de menor dimensão.

E quanto maior o volume do corpo de prova, maior é a probabilidade de se encontrar defeitos em posições críticas. Desta forma, a tendência é que ocorra uma diminuição na resistência mecânica do corpo de prova, esperando-se um deslocamento da reta para a esquerda (considerando-se que m é constante).

Os lotes de corpos de prova ensaiados foram retirados de um material cerâmico que, conforme o fabricante possui uma resistência à tensão de 40 MPa. Utilizando este valor como uma tensão padrão para este ensaio é possível calcular a carga aproximada para o ensaio de flexão.

Utilizando a Equação 55 da tensão, as dimensões do corpo de prova e a distância entre apoios, obtém-se como resultado, a carga a ser utilizada no ensaio a fim de romper os corpos de prova.

$$\sigma_f = \frac{3 F_f L}{2 b d^2}$$

Equação 55

Onde:

σ_f = tensão padrão = 40 MPa

L = 42 mm

b = 20.10mm

d = 7.85 mm

O valor da carga a ser utilizada no ensaio é de $F_f=786,42$ N.

Comparando-se o valor de F_f com o valor da Célula de Carga utilizada que é de 2000 N, percebe-se que esta é razoavelmente adequada para o ensaio proposto visto que o fundo de escala é aproximadamente 2,5 vezes maior que a cargas a ser aplicada aos corpos de prova. É importante salientar que ao utilizar células de carga de valores próximos ao das cargas aplicadas aos corpos de prova, obtém-se valores de resistências mais precisos.

A tensão característica σ_0 , que corresponde a 63,2% de probabilidade do corpo de prova falhar, como citado anteriormente, corresponde ao valor quando a reta do gráfico $\ln \ln[1/(1-F)]$ X $\ln(\sigma)$ toca o eixo das ordenadas. Para achar o σ_0 , isolar o X da equação da reta e aplicar a função exponencial no resultado. Assim calculando σ_0 para as equações das **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** através da Equação 56:

$$\sigma_0 = \exp\left(\frac{m}{\sigma}\right)$$

Equação 56

Os valores obtidos para este parâmetro foram:

- 38,5 MPa para o esmalte virado para cima (figura 43).
- 43 MPa para o esmalte virado para baixo. (figura 44).

Isso ocorre porque a cerâmica possui uma resistência à compressão maior que a resistência à tração. Quando a amostra é submetida ao esforço de flexão, tensões de compressão atuam na superfície de cima do corpo de prova e tensões de tração atuam na superfície de baixo.

Portanto quando o esmalte está virado para cima, à tensão de tração atua na massa cerâmica, que possui grande quantidade de defeitos, assim a tensão suportada antes de romper pela amostra será menor, quando comparada ao esmalte virado para baixo.

Para conhecer a tensão com 99,99% de probabilidade de falha das peças, aplica-se a equação de probabilidade de falha e isola-se a tensão; já sendo conhecidas a probabilidade, o m (módulo de Weibull) e a tensão na qual 63,2% dos materiais falhariam. Obtém-se então a tensão em que as peças falhariam Figura 47.

$$\sigma_{\text{cima}} = 45,15 \text{ MPa} \text{ e } \sigma_{\text{baixo}} = 48 \text{ MPa}$$

Figura 47- Tensão na qual as amostras falhariam.

Utilizando agora as medidas do dimensionamento do corpo de prova e as fórmulas de tensão de flexão, pode-se encontrar a carga máxima aplicável para as amostras falharem, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$P_{\text{cima}} = 770 \text{ N} \text{ e } P_{\text{baixo}} = 825 \text{ N}$$

Figura 48 - Carga máxima aplicável nas amostras.

3. Impacto

Quando se trata de critérios de projetos na engenharia, um dos deveres do engenheiro é ter conhecimento acerca dos materiais que podem, ou não, serem utilizados em cada situação apresentada. Saber o comportamento dos mesmos é muito importante: de modo geral é preferível a utilização de materiais dúcteis, ou seja, que suportam deformação até sua ruptura, o que pode ser visto como aviso de que este está prestes a colapsar, fraturar. Tal característica, muito importante, não é observada nos materiais frágeis, que embora apresentem maior resistência mecânica, não indicam que estão prestes a falhar.

Em ensaios de tração, as curvas $\sigma \times \epsilon$ (tensão *versus* deformação) obtidas mostram o limite de resistência apresentado pelos materiais. Todavia, enquanto sob solitação, estes podem vir a fraturar sob tensões mais baixas que a explicitada nos gráficos. Este fenômeno acontece pela presença de entalhes e trincas nos componentes de engenharia que vem a fragilizar o material. Ainda, contrariamente aos materiais dúcteis, onde as trincas se propagam apenas sob cargas crescentes, nos frágeis a propagação se dá sob cargas constantes. Existem fatores que podem alterar o comportamento dúctil/frágil: velocidade de carregamento, concentradores de tensão, trincas e condições ambientais são alguns deles.

Por esses motivos, ensaios mais severos do que o de tração, foram desenvolvidos para analisar o comportamento dúctil/frágil dos materiais. Um deles é o ensaio de impacto (Charpy ou Izod), que visa avaliar a tenacidade do material. Um dos resultados do ensaio é o gráfico de energia absorvida $\times$ temperatura com o qual é possível obter um maior conhecimento sobre o comportamento frágil/dúctil, podendo-se analisar a temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) do material.

A partir desses dados, o engenheiro pode determinar qual material é o mais adequado para ser usado em um determinado projeto, principalmente, quando o projeto for exposto a condições extremas, como, por exemplo, a temperaturas criogênicas.

O ensaio de impacto revela o comportamento dos materiais segundo sua tendência de se comportar de uma maneira frágil. Embora seja um ensaio ultrapassado, no sentido de que existem ensaios mais elaborados e mais representativos, o ensaio de impacto é usado devido a sua simplicidade e rapidez. O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico que consiste na aplicação de uma carga instantânea sobre um corpo de prova, com a energia necessária para fraturá-lo.

Existem duas técnicas normalizadas de ensaio de impacto: Izod e Charpy. O Charpy recebeu este nome por causa de seu criador, Georges Charpy. Ele desenvolveu o teste em 1905.

3.1 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto Charpy mostrado nas figuras 49 e 50 é um ensaio com condições mais severas que o ensaio de tração, no qual é medido a energia necessária para romper um corpo de prova com um entalhe (feito por usinagem) padronizado.

A energia absorvida (mensurada por meio da diferença de alturas do martelo antes e depois do impacto) nos serve para comparar diferentes materiais, podendo servir também em testes de controle de qualidade dentro das empresas, certificando que o material provido pelo fornecedor possui a qualidade exigida.

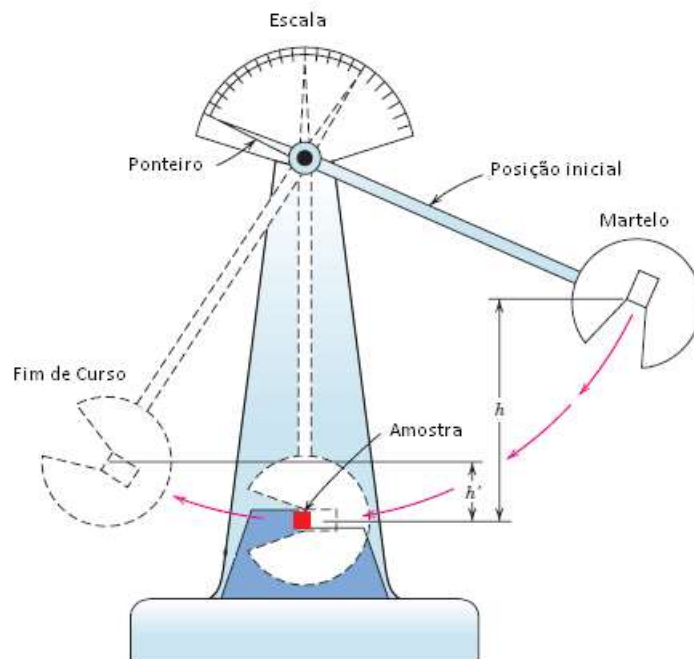


Figura 49 - Máquina de ensaio Charpy.

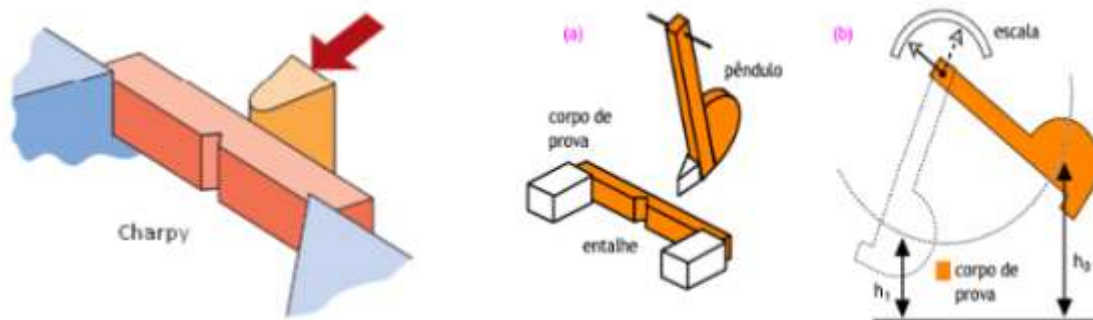


Figura 50 - Esquematização do ensaio Charpy. [3]

O corpo de prova, padronizado, é provido de um entalhe que gera uma triaxialidade de tensões e localiza a ruptura. Geralmente ele é realizado a baixas temperaturas, visando à obtenção de informações sobre a tendência do material romper de maneira frágil.

O ensaio consiste na aplicação de uma flexão do corpo de prova por impacto de um martelo pendular na face oposta aquela em que se localiza o entalhe. A massa do martelo, assim como a altura inicial do mesmo são variáveis. Calculando-se a energia do martelo antes e depois do impacto, é possível descobrir quanta energia o material absorveu durante sua deformação e ruptura. Geralmente, há uma escala nas máquinas de ensaio graduada de acordo com a massa do martelo utilizado.

Os tipos de martelo utilizados no ensaio de impacto são aqueles mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra um martelo de quatro Joules utilizado para ensaio em materiais poliméricos e plásticos.

Tabela 4- Tipos de martelo segundo Norma ASTM E23.

Capacidade	Resolução		Alcance utilizável
um	80 J	0.10 J	2.5 até 64 J
dois	160 J	0.20 J	5.0 até 128 J
três	325 J	0.25 J	6.25 até 260 J
quatro	400 J	0.30 J	7.5 até 320 J
cinco	400 J	0.15 J	3.75 até 320 J
seis	400 J	0.15 J	3.75 até 320 J



Figura 51 - Martelo para ensaio Charpy em corpos de prova de matérias poliméricas e plásticos.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o dispositivo para ensaio de charpy do LPM.



Figura 52- Dispositivo para ensaio Charpy do LPM.

Neste ensaio simulam-se as condições de serviço mais severas em relação ao potencial de ocorrência de fratura, tais como: 1) deformação a uma temperatura relativamente baixa; 2) taxa de deformação elevada (traduzida como alta velocidade de aplicação da carga: impacto) e 3) presença no material de um estado de tensão triaxial (simula-se a presença de uma trinca ao introduzir-se um entalhe no corpo de prova do ensaio de impacto).

Como a energia absorvida pelo material depende de uma série de variáveis, tais como sua forma e dimensão, bem como da temperatura e velocidade de aplicação da carga (energia), entre outras, é necessário:

- a) padronização do tipo de ensaio,
- b) rigoroso controle dimensional,
- c) rigoroso controle das condições ambientais e da temperatura do corpo de prova no momento da aplicação da carga.

3.2 Características do ensaio de impacto

O ensaio de impacto é realizado da seguinte forma: O pêndulo é levado a certa posição, onde adquire uma energia potencial inicial. Ao cair, ele encontra no seu percurso o corpo de prova, que se rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia final. A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia absorvida pelo material. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia adotada é o joule. Em máquinas mais antigas, a unidade de energia pode ser dada em $\text{kgf} \cdot \text{m}$, $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ ou $\text{kgf} \cdot \text{mm}$. A máquina é dotada de uma escala, que indica a posição do pêndulo, e é calibrada de modo a indicar a energia potencial.

A energia potencial do sistema antes da queda do martelo é igual à altura da qual o martelo cai (medida sempre em relação ao seu centro de gravidade), vezes o seu próprio peso, dada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$E_p = mgH$$

Equação 57

Onde, m é a massa do martelo e g é a aceleração da gravidade.

Já a energia potencial depois da queda (quando o martelo atinge seu ponto máximo de ascensão), é dado pela Equação 58.

$$E_p = mgh$$

Equação 58

Sendo assim, temos que a energia absorvida pelo corpo de prova é a diferença das duas energias potenciais. Equação 59:

$$E_{abs} = mg(H - h)$$

Equação 59

Como se observa na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

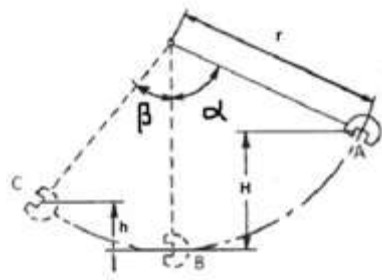


Figura 53- Detalhes do ensaio Charpy. (Não encontrei)

Onde:

H = altura da queda do martelo;

h = altura de ascensão do martelo;

α = ângulo de queda do martelo;

β = ângulo de ascensão do martelo;

r = comprimento do eixo do martelo até seu centro de gravidade.

Por geometria, pode ser visto que:

$$H = r (1 - \cos \alpha)$$

Equação 60

$$h = r (1 - \cos \beta)$$

Equação 61

Aplicando isto na Equação 59 obtém-se:

$$Eabs = mg[r(1 - \cos\alpha) - r(1 - \cos\beta)]$$

Equação 62

$$Eabs = mg[r - r\cos\alpha - r + r\cos\beta]$$

Equação 63

Portanto;

$$Eabs = mgr(\cos\beta - \cos\alpha)$$

Equação 64

Os resultados que podem ser obtidos a partir deste tipo de ensaio são:

- a) energia absorvida;
- b) aspecto da fratura;
- c) temperatura de transição dúctil/frágil.

Os ensaios de impacto foram desenvolvidos ao se considerar que a resistência dos materiais é grandemente afetada pela existência de trincas ou entalhes e pela velocidade de aplicação da carga, condições que não podem ser facilmente aplicadas em um ensaio comum de tração.

Com esse tipo de ensaio também é possível observar que a temperatura exerce significativa influência sobre as propriedades dos materiais. Esse fato tornou-se relevante durante a segunda guerra mundial, quando navios passaram a usar chapas soldadas no lugar da tradicional construção rebitada. Sob impacto, trincas iniciadas em regiões de solda podiam propagar-se pelas chapas.

Contrapondo-se ao ensaio de tração onde as condições as quais o corpo de prova é submetido são pouco severas, o de impacto tenta reproduzir condições mais severas assemelhando-se assim, àquelas a que o material será submetido quando em trabalho. Tais condições são: alta taxa de deformação, deformação à relativamente baixa temperatura e a introdução de um entalhe (concentrador de tensões) gerador de triaxialidade de tensões.

É importante salientar que o ensaio Charpy não serve para projeto, ele é apenas uma ferramenta para comparar os materiais e para controle de qualidade, pois seus resultados só se repetem nas condições dadas (não é possível extrapolar os dados para outras condições). Os resultados podem variar muito, verificando-se uma grande dispersão dos dados, especialmente nas proximidades da temperatura de transição dúctil-frágil.

Isso se deve à dificuldade de preparar corpos de prova com entalhes perfeitamente idênticos, e também as heterogeneidades do material. Esse ensaio não fornece informações como tensão de escoamento, tensão de resistência, módulo de elasticidade e outros obtidos, por exemplo, no ensaio de tração.

Os corpos de prova são padronizados e possuem um entalhe onde ocorre a fratura. São retirados da própria peça, pois assim fornecem as propriedades do material do qual a peça é feita. Os materiais podem ser classificados basicamente como frágeis que apresentam pequena deformação, absorvendo pouca energia antes da ruptura ou dúcteis que apresentam grande deformação, absorvendo muita energia antes da ruptura. Em outras palavras, no ensaio, quanto menor a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material, e vice versa.

Nos ensaios de impacto utilizam-se duas classes de corpos de prova com entalhe: o Charpy e o Izod. A única diferença entre o ensaio Charpy e o Izod é que no Charpy o golpe é desferido na face oposta ao entalhe e no Izod é desferido no mesmo lado do entalhe.

As dimensões do corpo de prova, a forma e o tamanho do entalhe usado determinam um dado estado de tensões que não se distribuem de modo uniforme por todo o corpo de prova, no ensaio. Por isso, esse ensaio não fornece um valor quantitativo da tenacidade do metal. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** podem-se visualizar as diferenças esquemáticas do Ensaio de Charpy e Izod.

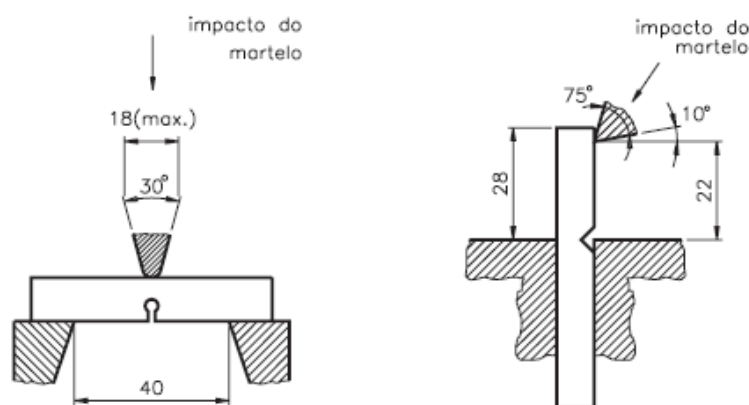


Figura 54- Esquemas de Ensaio de Charpy e Izod. [5]

Os corpos de prova Charpy compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe. A **Figura 55** a seguir mostra as formas e dimensões desses três tipos de corpos de prova de Charpy e dos respectivos entalhes. As diferentes formas de entalhe são necessárias para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis.

Quando a queda do martelo não provoca a ruptura do corpo de prova, o ensaio deve ser repetido com outro tipo de corpo de prova, que apresente entalhe mais severo, de modo a garantir a ruptura. Dos três tipos apresentados, o C é o que apresenta maior área de entalhe, ou seja, o entalhe mais severo.

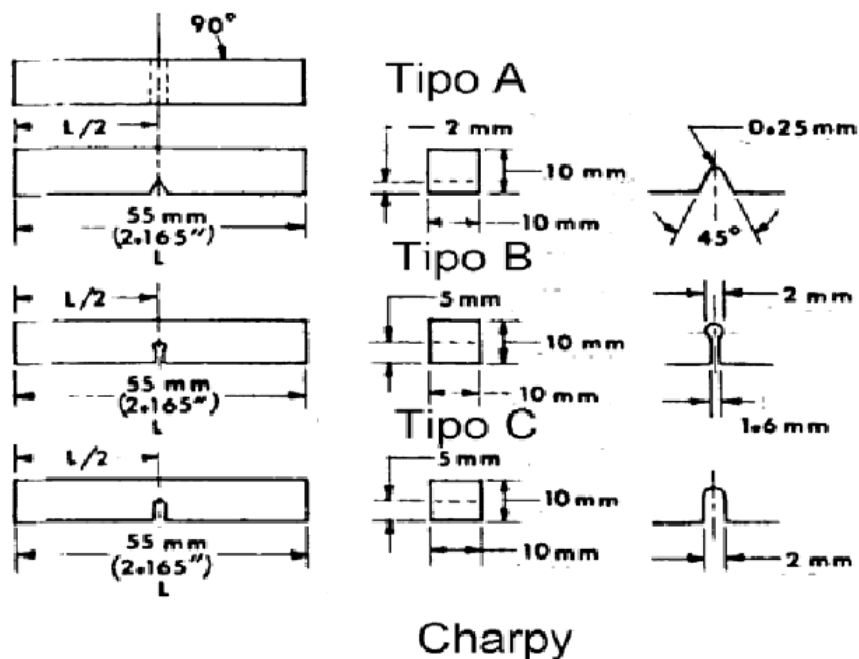


Figura 55 -Corpos de Prova para Ensaio de Impacto do Tipo Charpy. [4]

Em geral, o entalhe tipo A é utilizado quando se trabalha com materiais de caráter mais dúctil ou em velocidades menores de ensaio. Isso propicia uma tendência à fratura frágil, uma vez que se aumentam as tensões radiais em favor das transversais. Em ferro fundido e materiais fundidos sob pressão, não se usam entalhes, de modo geral.

O corpo de prova Izod tem a mesma forma de entalhe do Charpy tipo A, localizada em posição diferente (não centralizada). O corpo de prova Charpy é apoiado na máquina e o Izod é engastado, o que justifica seu maior comprimento.

Na **Figura 56** a seguir tem-se a esquematização do corpo de prova para ensaio de Impacto do Tipo Izod.

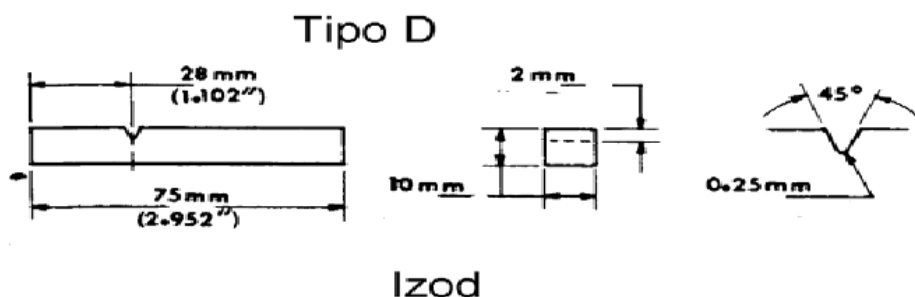


Figura 56 -Corpos de Prova para Ensaio de Impacto do Tipo Izod. [4]

Para chegar a conclusões confiáveis a respeito do material ensaiado, é recomendável fazer o ensaio em pelo menos três corpos de prova.

3.3 Temperatura de transição dúctil-frágil

O principal emprego do ensaio Charpy na engenharia está na seleção de materiais resistentes à fratura frágil, através das curvas de temperatura de transição. A filosofia do projeto é selecionar um material que possua suficiente tenacidade ao entalhe quando sujeito a condições de serviço severas, de maneira que a habilidade do membro estrutural em suportar o carregamento possa ser calculada pelos métodos padrões da resistência dos materiais; sem considerar as propriedades de fratura do material ou os efeitos de concentração de tensão de trincas.

Considera-se, para fins de análise de fratura, que os metais de baixa resistência são aqueles onde $\sigma_0 < E/300$, e metais de alta resistência são os que apresentam $\sigma_0 > E/150$, no intervalo são os materiais de média resistência. As ligas metálicas de alta resistência não apresentam transição dúctil-frágil com a temperatura, juntamente com os metais que se apresentam estrutura cristalina CFC e HC a menos que haja algum ambiente fragilizante. Assim somente os metais que se cristalizam na estrutura CCC e ligas de baixa e médias resistências apresentam comportamento dúctil/frágil.

Em baixas temperaturas a fratura ocorre por clivagem frágil, enquanto que a altas temperaturas ela se processa através da ruptura de baixa energia. É justamente sob estas condições que a análise da mecânica da fratura é útil e apropriada. A tenacidade ao entalhe dos metais CCC de baixa e média resistência, assim como também Be, Zn e materiais cerâmicos, é fortemente dependente da temperatura.

Em baixas temperaturas a fratura ocorre por clivagem, enquanto que para as temperaturas elevadas observa-se uma ruptura dúctil. Assim, existe uma transição no comportamento de fratura de frágil para dúctil com o aumento da temperatura. Nos metais esta transição ocorre no intervalo de 0,1 a 0,2 da temperatura absoluta de fusão, T_m , e entre 0,5 a 0,7 T_m para os materiais cerâmicos. A filosofia do projeto que utiliza as curvas de temperatura de transição tem como intuito determinar uma temperatura acima da qual não ocorrerá fratura frágil para níveis de tensões elásticas. Evidentemente, quanto menor esta temperatura de transição, maior a tenacidade do material. O critério mais conservador para a temperatura de transição é o que define como sendo T_1 , que corresponde ao patamar superior da energia de fratura e à temperatura acima da qual a fratura é 100 % fibrosa (zero por cento de clivagem).

Este critério de temperatura de transição é denominado transição para fratura plástica (do inglês, Fracture Transition Plastic FTP). A FTP é a temperatura na qual a fratura muda de totalmente dúctil para substancialmente frágil. Como mostra a **Figura 57**.

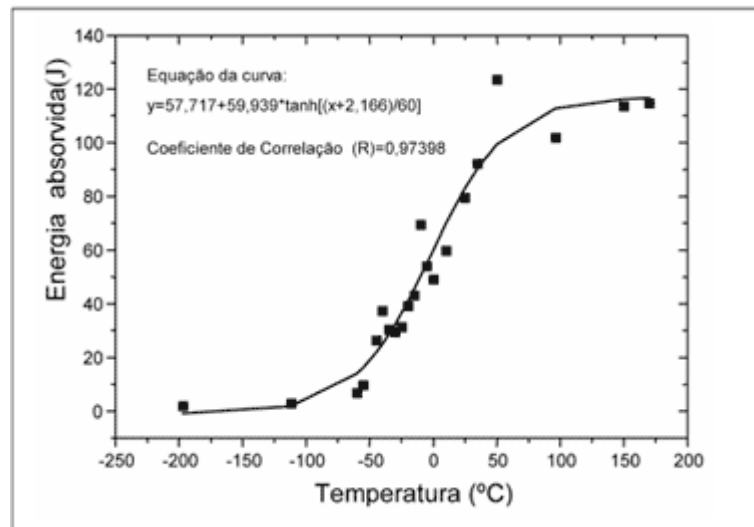


Figura 57 -Influência da temperatura na energia absorvida. [6]

A FTP é um conceito muito conservador (admite uma margem de segurança demasiadamente grande), o que a torna impraticável para muitas aplicações. Um critério arbitrário, porém menos conservador, é o que define a temperatura de transição como sendo aquela para a qual se observam 50% de clivagem e 50% de cisalhamento: T_2 , denominada uma temperatura de transição de aparência da fratura (do inglês, fracture-appearance transition temperature, FATT).

Correlações entre os ensaios de impacto Charpy e falhas observadas em serviço indicam que menos de 70% de fratura por clivagem na amostra Charpy mostra uma elevada probabilidade de que a falha não ocorra a temperaturas iguais ou superiores à FATT, se a tensão não ultrapassa cerca de metade da tensão de escoamento. Resultados grosseiramente análogos são obtidos ao se definir a temperatura de transição como sendo a média entre aquelas dos patamares superior e inferior, T_3 .

Um critério definido é basear a temperatura de transição naquela para a qual a fratura se torna 100 por cento por clivagem (T_s). Este ponto é conhecido como temperatura de ductilidade nula (do inglês, nil ductility temperature, NDT). A NDT é a temperatura na qual a fratura se inicia com essencialmente nenhuma deformação plástica anterior. Abaixo desta temperatura, a probabilidade de ocorrer fratura dúctil é nula.

Como dito anteriormente, a temperatura do ensaio tem forte influência nos resultados. Para os materiais CCC, por exemplo, a TTDF vai determinar se o corpo ensaiado vai responder de maneira dúctil ou frágil. Já nos materiais CFC essa temperatura não existe (esse tipo de material apresenta fratura dúctil a qualquer temperatura) e o teste de impacto não fornece muitos dados sobre este tipo de material. Portanto, para os CCC, a temperatura de realização do ensaio deve ser escolhida e controlada pelo operador do teste de maneira que seja possível a obtenção dos dados desejados.

Os resultados deste ensaio variam sensivelmente em condições de temperatura diversas. A temperatura, especificamente a baixa temperatura, é um fator de extrema importância no comportamento frágil dos metais. Isso pode ser observado na **Figura - 58** abaixo.

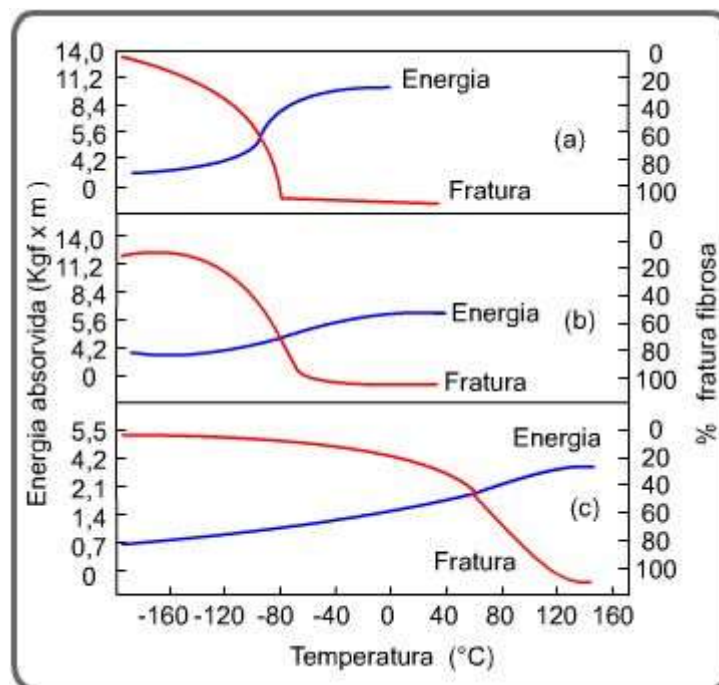


Figura - 58Diagrama TTDF. [7]

Ductilidade e fragilidade são características que não podem ser observadas ao mesmo tempo em um mesmo material a uma determinada temperatura. Quando é analisada a fragilidade/ductilidade do material, deve-se levar em conta não apenas a microestrutura deste, como também a temperatura em que se encontra.

Em relação a materiais com microestrutura cúbica de face centrada (CFC), estas não possuem uma transição entre frágil e dúctil em função da temperatura, pois são encontrados muitos planos de escorregamento em sua microestrutura. Metais com esta microestrutura, não rompem por clivagem, de modo que a absorção de energia independe da temperatura.

O ideal é que sejam realizados diversos testes à mesma temperatura, e em diversas temperaturas, obtendo uma curva traçada no diagrama Energia *versus* Temperatura, como demonstra a **Figura 59**, onde cada curva representa um material e seu comportamento em determinada temperatura.

Pode ser identificado a partir do gráfico um patamar dúctil, no qual o corpo de prova absorve mais energia, um patamar frágil que, por sua vez, é exatamente o contrário, e uma terceira região, chamada de patamar de transição (próximo à região da Temperatura de Transição Dúctil/Frágil, ou TTDF).

Ainda pode ser inferido que quanto mais acima e à direita se situar a curva, maior é a energia absorvida e menor é a temperatura na qual acontece a transição (o material deixa de ser frágil e passa a se comportar de maneira dúctil).

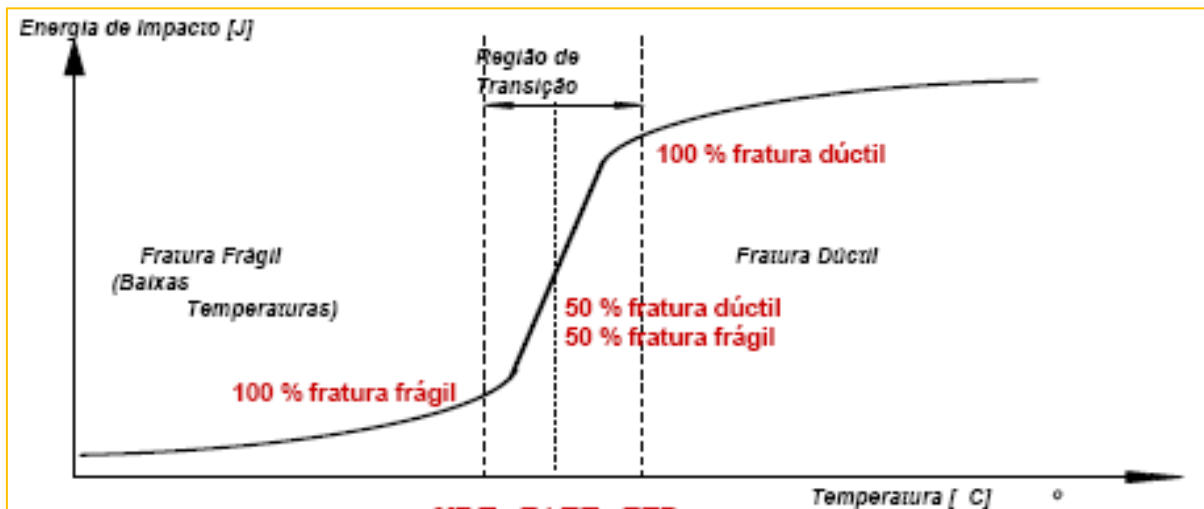


Figura 59 - Região da temperatura de transição.

Na **Figura 59** pode-se observar que:

- O patamar superior é o trecho acima da faixa de dispersão, caracterizado por valores elevados e pouco dispersos da energia absorvida,
- A zona de transição é região de grande dispersão dos valores da energia absorvida. Nesta região a resistência ao impacto pode assumir valores aleatórios,
- O patamar inferior é o trecho do diagrama que se situa abaixo da zona de transição e se caracteriza por apresentar valores baixos, porém pouco dispersos de energia absorvida.

Além disso, é interessante notar que a energia absorvida varia sensivelmente com a temperatura, em especial na faixa da TTDF, em que uma pequena diminuição na temperatura ocasiona uma queda significativa na energia absorvida como se observa na **Figura 59**. A presença do entalhe acentua essa transição.

3.3.1 Influência do trabalho mecânico no corpo de prova

Defeitos internos no metal nucleiam, favorecem a formação de trincas e, assim, favorecem a ruptura. Esses defeitos tendem a alinhar-se quando a peça é submetida a um trabalho mecânico de laminação, por exemplo. A direção de laminação é um fator chave, pois ela determina também o alongamento dos grãos e das discordâncias.

As propriedades de impacto em amostras com entalhe de produtos laminados ou forjados variam com a orientação dos grãos na chapa ou barra.

A **Figura 61** mostra a forma típica das curvas energia-temperatura para corpos de prova retirados em sentido longitudinal e transversal à direção de laminação. As amostras A e B estão orientadas na direção longitudinal na chapa. No corpo de prova A o entalhe é perpendicular à superfície da chapa, enquanto que na amostra B ele é paralelo.

Amostras transversais são utilizadas em casos nos quais a distribuição de tensão é tal que a trinca se propagaria transversalmente à direção de laminação. A **Figura 61** mostra que podem existir grandes diferenças no comportamento dos corpos de prova retirados em diferentes orientações para os níveis de energia mais elevados; entretanto, as curvas se aproximam bastante para níveis de energia inferiores a 20ft.lb.

Sendo assim, observando a **Figura 61** e sabendo que a dobra de impacto é paralela ao eixo X, à chapa teria uma laminação ótima em Y, uma vez que os grãos ficariam alongados de modo perpendicular à trinca, aumentando a resistência à dobra (ver figuras 60 e 61).

Verifica-se que a parte mais afetada da curva é a parte relacionada à ruptura de caráter dúctil.

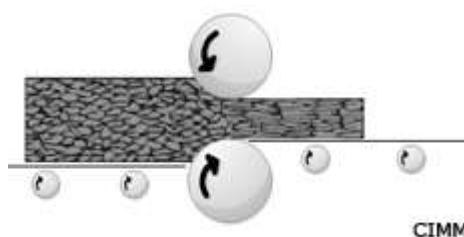


Figura 60- Alongamento dos grãos na laminação. [8]

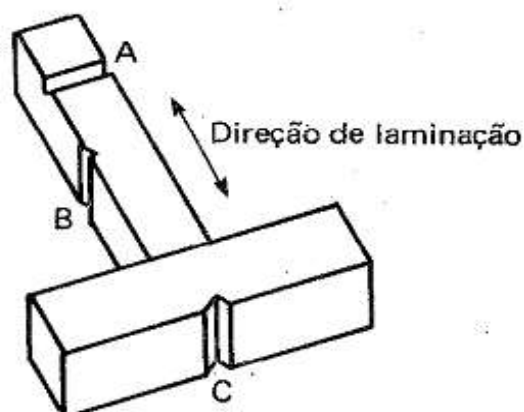
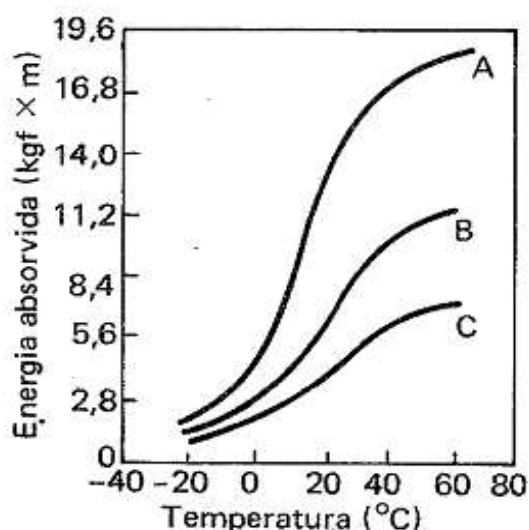


Figura 61- Efeitos da direção de laminação na absorção de energia. [11]

3.3.2 Fatores metalúrgicos que afetam a temperatura de transição

Diferenças na temperatura de transição superiores a 40° C podem ser produzidas por mudanças na composição química ou na microestrutura dos

aços doces. O carbono e o manganês são os principais responsáveis por variações na temperatura de transição.

O fósforo também exerce um forte efeito no acréscimo da temperatura de transição. Apesar de ser difícil avaliar o efeito do nitrogênio devido à sua interação com outros elementos, este elemento é geralmente considerado detrimental à tenacidade ao entalhe. O níquel é geralmente aceito como sendo benéfico à tenacidade ao entalhe quando presente em quantidades até 2% e aparenta ser especialmente efetivo em abaixar a temperatura de transição da ductilidade.

O silício aparentemente aumenta a temperatura de transição quando se apresenta em teores superiores a 0,25 %, enquanto que o molibdênio aumenta esta transição quase tão rapidamente quanto o carbono e o cromo têm pequeno efeito.

A tenacidade ao entalhe é particularmente influenciada pelo oxigênio, que em teor elevado, aumenta a temperatura de transição. Em vista destes resultados, não é surpresa que a prática de desoxidação tenha um efeito importante na temperatura de transição. O alumínio apresenta um efeito benéfico ao se combinar com o nitrogênio e formar nitretos de alumínio insolúveis.

O tamanho de grão exerce um forte efeito sobre a temperatura de transição. O aumento de um número na escala ASTM do tamanho do grão ferrítico (o que na realidade corresponde a um decréscimo no tamanho de grão) pode levar a uma diminuição de 17°C na temperatura de transição do aço doce. A temperatura de transição correspondente a uma energia de 15 J.kg no ensaio Charpy com entalhe em V pode variar de 21 para -51°C ao se diminuir o diâmetro do grão do número ASTM cinco para dez. A taxa de resfriamento do tratamento de normalização e a prática de desoxidação são algumas variáveis que também devem ser consideradas.

O aumento da resistência por dispersão eleva a tensão de escoamento enquanto que ao simultaneamente, retarda o crescimento de grão e melhora a resistência ao impacto.

Para uma dada composição química e um determinado processo de desoxidação, a temperatura de transição será apreciavelmente maior para chapas grossas laminadas a quente do que para chapas finas.

Os aços de baixo-carbono podem exibir dois tipos de fenômenos de envelhecimento que produzem um aumento na temperatura de transição. O envelhecimento por têmpera é causado pela precipitação de carbeto em um aço baixo-carbono que tenha sido temperado desde a temperatura de 740°C, e o envelhecimento por deformação ocorre em um aço baixo-carbono que tenha sido trabalhado a frio.

Somente o trabalho a frio já aumenta a temperatura de transição, mas o envelhecimento por deformação leva a um acréscimo ainda maior, geralmente da ordem de 22 a 33°C. O envelhecimento por têmpera induz a uma menor perda das propriedades de impacto do que a resultante do envelhecimento por deformação. O fenômeno de fragilidade ao azul, no qual ocorre um decréscimo na resistência ao impacto em aquecimento até cerca de 200°C é devido ao envelhecimento por deformação.

Já foi demonstrado diversas vezes que uma estrutura martensítica revenida produz a melhor combinação de resistência à tração e ao impacto do que qualquer outra microestrutura que possa ser produzida em um aço.

Tratamentos de têmpera inadequados, cuja microestrutura resultante consiste em uma mistura de martensita revenida, bainita e perlita, causam diferenças ainda maiores entre os aços-liga e, em geral, aumentam a temperatura de transição.

Estudos realizados sobre este fenômeno de fragilização têm mostrado que ele se deve à precipitação de estrias de cementita a partir de carbonetos e, durante o segundo estágio de revenimento. Estas estrias não têm efeito algum na redução da área de um corpo de prova de tração, porém, reduzem severamente a resistência ao impacto.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão representadas as curvas de transição dúctil-frágil de aços, obtidas a partir do ensaio de impacto de corpos de prova com diferentes temperaturas, desde a faixa sub zero (os corpos de prova são imersos em nitrogênio líquido ou gelo seco para atingir estas temperaturas negativas) até as temperaturas de aquecimento na faixa dos 150-200 °C.

Quanto maior a porcentagem de carbono no aço **menor** a tenacidade ao impacto deste material na faixa de temperatura ambiente de -40 °C a +40 °C (por exemplo, na temperatura de 25 °C: o aço com 0,63 %C fratura com uma energia absorvida de aproximadamente 25 J (frágil), o aço com 0,53 %C fratura com 30 J, aço com 0,43 %C fratura com 40 J (transição), aço com 0,31 %C fratura com 85 J (transição) e o aço com 0,22 %C fratura com 175 J (dúctil).

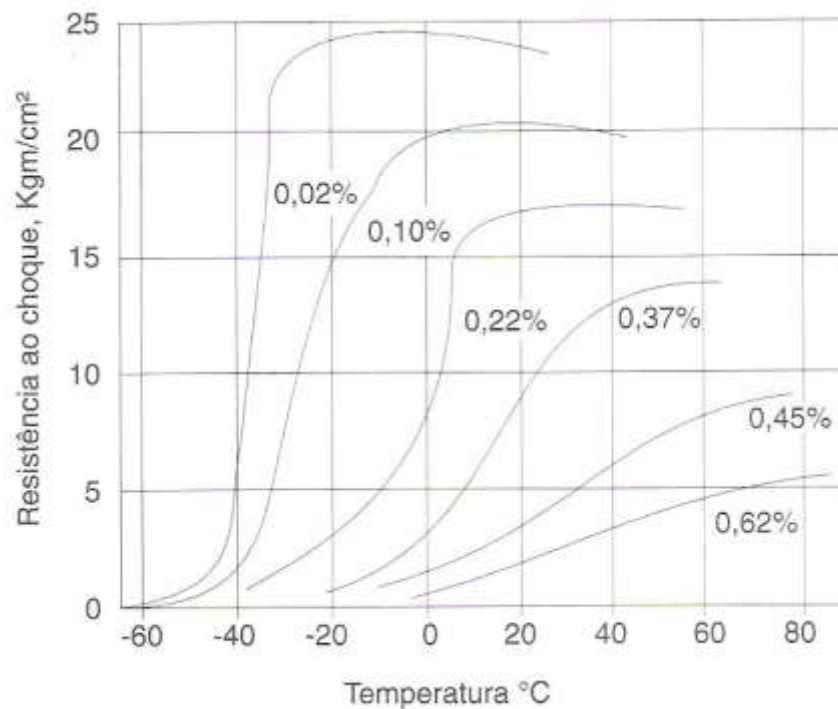


Figura 62- Influência do teor de carbono no comportamento dúctil-frágil determinado no ensaio de impacto Charpy para o aço. [9]

Para casos de aços de alta resistência, a temperatura de transição é sensível tanto à composição da liga como à sua microestrutura. Por exemplo, diminuir o tamanho médio do grão resulta em uma diminuição da temperatura de transição. Assim, o refino do tamanho de grão, tanto fortalece aços, como os endurece. Em contraste, o aumento do teor de carbono, enquanto promove o aumento da resistência do aço, também levanta a transição dúctil-frágil de aços, como visto anteriormente.

3.3.3 Procedimento para execução do ensaio

Para a realização de um ensaio com baixa dispersão é importante:

- Verificar a dissipação da energia pelo atrito. Esta operação deve ser efetuada através da liberação do pêndulo em vazio, ou seja, sem a presença do corpo de prova;
- Medir os corpos de prova, com os aparelhos de medição indicados, registrando e identificando cada um deles;
- Medir a dureza dos corpos de prova com um dos métodos já conhecidos e registrar seus valores. Não devendo ser realizada próximo ao entalhe do corpo de prova;
- Apoiar o martelo pendular no seu encosto superior travando-o nesta posição;
- Apoiar os corpos de prova, cada uma ao seu tempo, na parte inferior do dispositivo de fixação. Observar que o CP deverá estar centralizado no seu apoio;
- Levar o ponteiro da escala da máquina ao zero;

- g) Após assegurar-se que todos os componentes do grupo de trabalho encontra-se em posição de segurança, liberar o pendulo da sua trava;
- h) Após o choque, imobilizar o pêndulo e apanhar o CP rompido;
- i) Determinar a resistência ao impacto do CP e o tipo de fratura que nele ocorreu (% fratura dúctil).
- j) Repetir o procedimento para os corpos de prova restantes para cada temperatura e traçar as **curvas de transição dúctil-frágil A e B** do material, tal como ilustra a **Figura 63** (onde se encontra as curvas de um aço A238) a seguir.

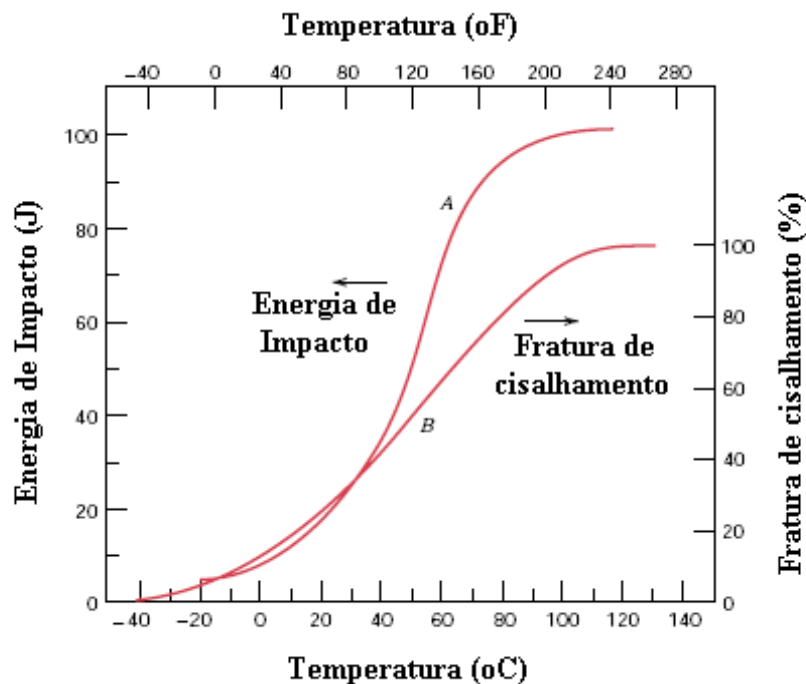


Figura 63 - Curvas de transição dúctil-frágil obtidas a partir do ensaio de impacto Charpy de um aço A238. [11]

A curva **A** ilustra a dependência entre a energia absorvida e a temperatura do corpo de prova, a curva **B** ilustra a dependência entre a temperatura do corpo de prova e o percentual de área de fratura de cisalhamento (lado direito do diagrama).

3.3.4 Determinação da temperatura de transição dúctil - frágil (TTDF)

Existem cinco maneiras diferentes para se determinar a TTDF de um material, sendo elas:

- 1) Usar a temperatura do patamar superior do gráfico;
- 2) Determiná-la no ponto em que a fratura é 50% fibrosa e 50% dúctil;
- 3) Calcular a média entre os patamares (superior e inferior).;

- 4) Definir certa quantidade mínima de energia absorvida para o material como dúctil e obter a temperatura correspondente (em materiais de baixa resistência, a energia absorvida é definida como 20 J);
- 5) Usar a temperatura na qual a ruptura é 100% cristalina.

3.4 Aspecto da fratura de materiais metálicos submetidos a impacto

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável, e pela rápida propagação de trincas. A direção do movimento das trincas é quase perpendicular à direção de aplicação da tração e produz uma superfície de fratura relativamente plana.

Superfícies de fratura em materiais que falharam de forma frágil terão seus próprios padrões distintos, porém sinais de grande deformação plástica sempre estarão ausentes. Em materiais frágeis e cristalinos, a propagação de trincas corresponde à sucessiva e repetida quebra de ligações atômicas ao longo de planos cristalográficos.

Devido ao rompimento súbito dos materiais frágeis, estes não podem ser utilizados em aplicações nas quais estes tipos de esforços sejam comuns, como em eixos de máquinas, bielas, etc. ou ainda, em situações em que a previsão ou identificação de trincas mostre-se necessária, a fim de evitar falhas catastróficas.

Para estas aplicações, são desejáveis materiais que tenham capacidade de absorver energia e dissipar esta, de modo que a ruptura não aconteça, ou seja, materiais que apresentam tenacidade. Esta propriedade está relacionada com a fase plástica dos materiais, e por isso é comum utilizar ligas metálicas dúcteis para os mais diversos tipos de aplicações mecânicas.

Os aços estruturais fragilizados pela temperatura ambiente fraturaram catastroficamente. Isso demonstra a importância da determinação da temperatura de transição entre os comportamentos dúctil e frágil nos materiais metálicos de estrutura CCC.

Esta ruptura sem deformação plástica apreciável, ou seja, de maneira frágil, é de ocorrência comum quando as condições abaixo estiverem presentes:

1. Alta velocidade de aplicação da carga;
2. Trinca ou entalhe no material (concentração de tensões, induzindo um estado triaxial de carregamento);
3. Baixa temperatura de uso do material.

Alguns materiais são mais afetados pela velocidade alta do choque, apresentando uma sensibilidade que é chamada sensibilidade à velocidade.

Quanto à concentração de tensões, uma trinca pode fazer com que a maior parte de energia produzida pela ação do golpe seja concentrada numa região localizada na peça, com a consequente formação da fratura frágil.

Como a velocidade de carregamento é elevada, o movimento das discordâncias no interior do material, fica dificultado ou impedido. A existência de uma trinca, por menor que seja, muda consideravelmente o comportamento do material dúctil. Este comportamento frágil devido à trinca é frequentemente chamado de sensibilidade ao entalhe, ou tenacidade à fratura.

Para que ocorra a fratura frágil, não há necessidade de que estes três fatores se manifestem simultaneamente. Os principais responsáveis pela maioria das falhas do tipo frágil que ocorrem em serviço são a presença de um estado triaxial de tensões, tal como o que existe em um entalhe, e a uma baixa temperatura.

Entretanto, já que estes efeitos são acentuados a uma taxa de carregamento elevada, vários tipos de testes de impacto têm sido utilizados para determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil.

Materiais frágeis apresentam maior resistência mecânica do que os dúcteis, porém estes não sofrem as mesmas deformações apresentadas pelos materiais dúcteis. Pode-se entender melhor tal diferença pela **Figura 64**, que ilustra um ensaio de tração de um material frágil (a) apresentando maior resistência, porém menor deformação e um material dúctil (b) apresentando menor resistência mecânica, porém maior ductilidade.

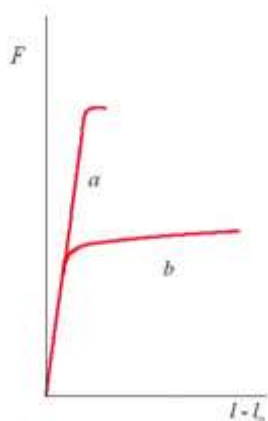


Figura 64 - Comportamento frágil (a) e comportamento dúctil (b). [10]

Aços que possuem propriedades idênticas quando testados em tração ou torção a baixas taxas de deformação podem apresentar diferenças pronunciadas na sua tendência à fratura frágil quando ensaiados em um teste de impacto com corpo de prova entalhado.

O maior sucesso tem sido alcançado pela aplicação dos conceitos da mecânica da fratura a fratura frágil. Consegue-se uma habilidade quantitativa de prognósticos para materiais de alta resistência, com pequena plasticidade. Entretanto, para os aços estruturais mais comuns, que apresentam alguma

plasticidade antes da fratura frágil, são necessárias algumas modificações na análise da mecânica da fratura.

O projeto de uma estrutura soldada é mais crítico do que o de uma estrutura rebitada equivalente, e tem-se realizado muito esforço no desenvolvimento de projetos mais seguros de estruturas soldadas. É muito importante eliminar todos os concentradores de tensão e evitar fazer a estrutura muito rígida.

Após o ensaio de Impacto pode-se observar também qual o comportamento da fratura ocorrida no corpo de prova. Conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode ocorrer três tipos de fratura: dúctil, frágil e mista, que são determinadas de acordo com o valor da energia absorvida ou de acordo com o aspecto da região da fratura.

Fratura Frágil:

absorve pouca energia
baixa tenacidade



Aspecto brilhoso

Fratura Dúctil:

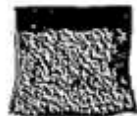
absorve muita energia
alta tenacidade



Aspecto fosco

Faixa de Transição:

fratura mista (dúctil e frágil)



Aspecto brilhoso internamente e fosco externamente

Figura 65 Tipos de fratura.

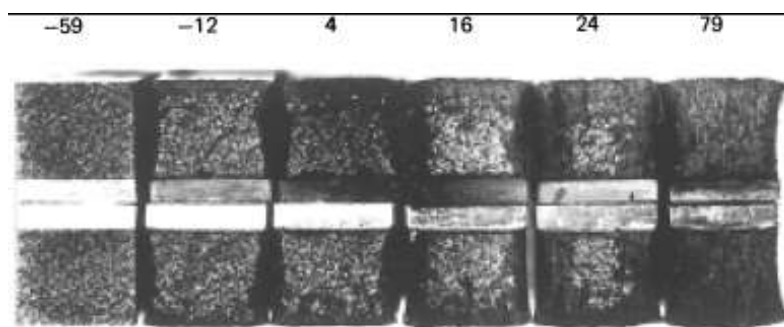


Figura 66 - Aspectos da fratura de seis (seis) corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy em temperaturas diferentes. [11]

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** está de acordo com as análises feitas anteriormente, mostrando que a fratura frágil possui um aspecto brilhoso. Quando as fraturas apresentam maior porcentagem de caráter dúctil, a fratura se mostra mais fosca.

Na engenharia, as propriedades de Tenacidade e Ductilidade são de extrema importância quando se analisa a possibilidade de fratura.

Quanto ao aspecto da fratura, existem basicamente quatro diferentes zonas:

- a) zona fibrosa - perto do entalhe, onde a trinca se inicia;
- b) zona radial - região central;
- c) zona de cisalhamento - em volta da zona radial;
- d) zona fibrosa - do lado oposto ao entalhe.

A porcentagem em área de fratura dúctil consiste na relação entre a área não radial (fibrosa + cisalhante) e a área total. Para analisar a Figura 67 se assume que a temperatura de transição Dúctil/Frágil (TTDF) é a temperatura na qual ocorre fratura com 50% de área fibrosa. Portanto, quanto menor a TTDF, maior a tenacidade do material.

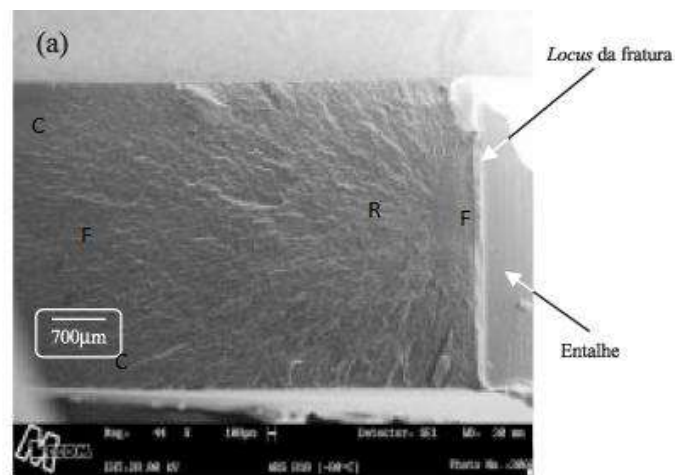


Figura 67 -Superfície Fraturada em ensaio de Impacto. [12]

4. Dureza

Uma propriedade mecânica que pode ser considerada importante é a dureza, que é uma medida da resistência de um material à deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena penetração ou um risco). Os primeiros testes de dureza eram baseados em minerais naturais com uma escala construída somente com base na capacidade de um material riscar outro.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas de dureza quantitativas nas quais um pequeno penetrador é forçado para dentro da superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carregamento e de tempo de aplicação.

Utiliza-se na indústria os métodos quantitativos para o controle da dureza dos materiais, onde um aparelho (durômetro) fornece um número indicando o valor de dureza relacionado ao tamanho de uma impressão produzida na superfície do material.

Os métodos consistem em aplicar uma carga num pequeno penetrador esférico ou pontiagudo posicionado na superfície plana do material; o aparelho mede e indica a profundidade ou as dimensões da impressão produzida. As diferentes escalas dependem do tipo de penetrador (esférico, cônico, piramidal), da pré-carga e da carga principal aplicada.

Um material macio tem uma impressão maior e mais profunda sendo, portanto, menor o índice que determina sua dureza. O ensaio de dureza é muito utilizado na indústria metal-mecânica por ser simples e barato, não inutilizar a peça ensaiada (é um ensaio não destrutivo), e fornecer uma estimativa da resistência à tração do material.

Os principais ensaios de dureza são:

- Dureza Mohs
- Dureza Brinell
- Dureza Rockwell
- Dureza Vickers
- Dureza Janka
- Dureza Shore

4.1 Dureza Mohs

Um esquema de indexação qualitativo e arbitrário de dureza foi idealizado, e denominado de escala de Mohs, no qual a dureza varia desde um, na extremidade macia para o talco, até 10, para o diamante como se apresenta na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Esta escala foi criada em 1812 pelo mineralogista alemão Friedrich Mohs.

A Escala de Mohs quantifica a resistência que um determinado mineral oferece ao risco. O diamante risca o vidro, portanto, este é mais duro que o vidro. Por exemplo, o gesso (2) risca o talco (1), mas não risca o quartzo (7). Portanto, esta é uma escala apenas qualitativa, onde o diamante é o material mais duro (dureza Mohs diamante = 10).

Ao final do teste mede-se a profundidade ou o tamanho da penetração resultante que por sua vez é relacionada ao número de dureza; quanto mais macio o material, tanto maior e mais profunda a penetração e tanto menor o número índice de dureza. As durezas medidas são apenas relativas (ao invés de absolutas) e por isso deve-se tomar cuidado ao comparar determinados valores por diferentes técnicas.



Figura - 68 Escala de Mohs. [13]

Alguns parâmetros úteis para a avaliação da escala de Mohs se encontram na **Tabela 5**.

Tabela 5- Dureza Mohs de alguns materiais.

Dureza	Objeto
2,5	Unha
3,0	Moeda de cobre
5,5	Lâmina do canivete
5,5 a 6	Vidro
7	Porcelana
9,1	Ponta de vídia

Essa classificação é adequada em alguns ramos da engenharia. Entretanto, para problemas de engenharia Civil e Mecânica, onde os metais são matérias primas em diversas situações, à escala de Mohs apresenta pouca resolução, pois a maioria dos metais apresenta durezas Mohs entre quatro e oito.

Desta forma, outras formas de determinação de dureza foram desenvolvidas. As mais usadas são baseadas na correlação entre as dimensões de impressões causadas por penetradores padronizados forçados contra a superfície do material a ser testado. Assim, quanto mais macio for o material, maior e mais profunda será a impressão e menor será o índice de dureza.

4.2 Dureza Brinnell

É um dos tipos de dureza mais utilizado na área de engenharia sendo simbolizada por *HB*. Consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço ou tungstênio de diâmetro $D = 2R$ sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal através de uma carga P , durante um tempo t . Essa compressão provocará uma impressão permanente no metal com formato de uma calota esférica, tendo um diâmetro $d = 2r$, como se observa na Figura 69.

A dureza Brinell é definida em N/mm^2 ou kgf/mm^2 , como o quociente entra a carga aplicada pela área de contato (área superficial) A_c , a qual é relacionada com os valores D e d como se explica na sequencia.

A Figura 69 e a Equação 65 mostram os parâmetros considerados para o cálculo da dureza Brinell.

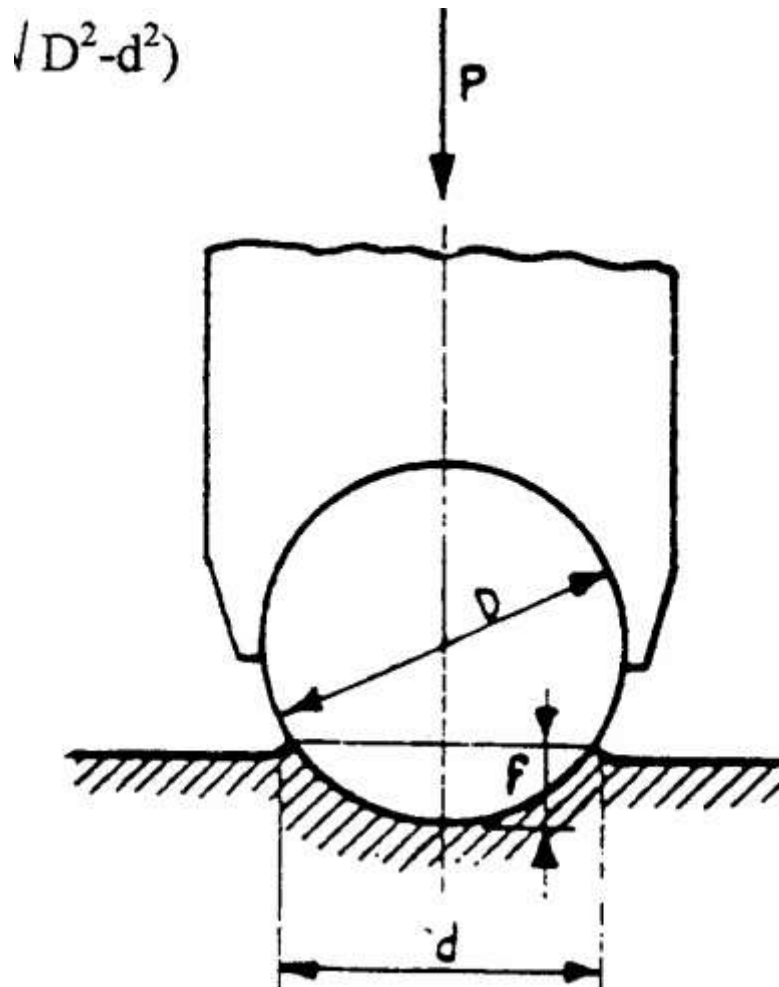


Figura 69- Parâmetros envolvidos para realizar o cálculo da dureza Brinell. [14]

$$HB = \frac{F}{A_c} = \frac{F}{\pi Dp}$$

Equação 65

De todos os termos da equação anterior, apenas o valor de p (a profundidade da impressão) ainda não é conhecida. Aplicando o Teorema de Pitágoras no triângulo retângulo na Figura 69 obtém-se a Equação 66.

$$\begin{aligned} R^2 &= (R - p)^2 + r^2 \\ R^2 &= R^2 - 2Rp + p^2 + r^2 \\ p^2 - 2Rp + r^2 &= 0 \end{aligned}$$

Equação 66

Resolvendo a equação de segundo grau obtém-se a Equação 67:

$$p = \frac{2R \pm \sqrt{(2R)^2 - 4r^2}}{2}$$

$$p = R \pm \sqrt{R^2 - r^2}$$

$$p = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

Equação 67

Que pode ser reescrita em função de D e d como demonstra a **Equação 68**.

$$p = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$p = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Equação 68

Substituindo o valor de p na equação inicial, chega-se finalmente a seguinte expressão matemática:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Equação 69

O ensaio padronizado, proposto por Brinell, é realizado com carga de 3.000 kgf e esfera de 10 mm de diâmetro, de aço temperado ou tungstênio. Porém, usando cargas e esferas diferentes, é possível chegar ao mesmo valor de dureza, desde que se observem as seguintes condições:

- A carga será determinada de tal modo que o diâmetro de impressão d se situe no intervalo de 0,25 a 0,5 do diâmetro da esfera D . A impressão será considerada ideal se o valor de d ficar na média entre os dois valores anteriores, ou seja, 0,375 mm.
- Para obter um diâmetro de impressão dentro do intervalo citado no item anterior, deve-se manter constante a relação entre a carga (F) e o diâmetro ao quadrado da esfera do penetrador (D^2), ou seja, a relação F/D^2 é igual a uma constante chamada fator de carga.

Para padronizar o ensaio, foram fixados valores de fatores de carga de acordo com a faixa de dureza e o tipo de material. A Tabela 6 mostra os principais fatores de carga utilizados e respectivas faixas de dureza e indicações.

Tabela 6- Fatores de carga do ensaio Brinell de acordo com o material. site

$\frac{F}{D^2}$	DUREZA	MATERIAIS
30	90 a 415 HB	Aços e ferros fundidos
10	30 a 140 HB	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	15 a 70 HB	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	até 30 HB	Chumbo, estanho, antimônio e metais-patente

O número de dureza Brinell deve ser seguido pelo símbolo HB, sem qualquer sufixo, sempre que se tratar do ensaio padronizado, com aplicação da carga durante 15 segundos. Em outras condições, o símbolo HB recebe um sufixo formado por números que indicam as condições específicas do teste, na seguinte ordem: diâmetro da esfera, carga e tempo de aplicação da carga.

Exemplificando: Um valor de dureza Brinell 85, medido com uma esfera de 10 mm de diâmetro e uma carga de 1.000 kgf, aplicada por 30 segundos, é representado da seguinte forma: 85HB 10/1000/30. A medida do diâmetro da calota (d) deve ser obtida pela média de duas leituras e de maneira geral não pode haver diferença maior que 0,06 mm entre as duas leituras, para esferas de 10 mm.

O ensaio Brinell é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas. É feito em equipamento de fácil operação. Por outro lado, o uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada.

Usando-se esferas de aço temperado só é possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera. Alguns estudos científicos buscam relacionar valores de dureza à resistência à tração dos materiais. Para aço estrutural, aproxima-se a resistência à tração σ pela Equação 70.

$$\sigma = 3,6HB$$

Equação 70

A localização de uma impressão Brinell deve ser tal que mantenha um afastamento das bordas do corpo de prova de no mínimo duas vezes e meia o diâmetro d obtido. A espessura do corpo de prova, para ser ensaiado deve ser no mínimo igual a dez vezes o diâmetro, d, obtido, para evitar em ambos os casos, degenerações laterais e de profundidade, falseando o resultado. A distância entre duas impressões Brinell deve ser no mínimo igual a 5d.

Superfícies não planas não são propícias para o ensaio Brinell, pois acarreta erro na leitura do diâmetro d. A impressão Brinell abrange uma área de contato maior que os outros tipos de dureza; ela é a única utilizada e aceita

para metais que tenham uma estrutura interna não uniforme, como o caso dos ferros fundidos cinzentos.

As Figura 70 e Figura 71 mostram uma medição de dureza Brinell no durômetro do LPM utilizando um penetrador tipo esfera de diâmetro 2,5mm.



Figura 70Medição de Dureza Brinell.



Figura 71Medição de Dureza Brinell.

A dureza Brinell, fornece dados confiáveis para praticamente todos os aços, sejam eles endurecidos, temperados ou recozidos, entretanto, aços que sofreram cementação não apresentam resultados confiáveis, pois a dureza da superfície não é contemplada da escala Brinell, além disso, a espessura da cementação raramente é espessa o suficiente para proporcionar confiabilidade a medição.

4.3 Dureza Rockwell

Simbolizada por *HR*. Difere fundamentalmente do ensaio de dureza Brinell pelo fato de eliminar o tempo necessário para medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado pode ser lido diretamente na máquina de ensaio. Os penetradores pequenos podem ser cones de diamante com 120° de conicidade ou esferas de aço temperado como se mostra na Figura 72.

O penetrador é em primeiro lugar aplicado à superfície do material de ensaio sob uma carga primária de 10 kgf (pré-carga), sendo o objetivo penetrar nas imperfeições da superfície da peça e vencer as deformações elásticas. Após de a pré-carga de 10 kgf ser aplicada, um braço é acionado para aplicar a carga principal.

Os penetradores podem ser feitos de esferas de aço endurecidas, de diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 0,5 polegadas (1,588 mm, 3,175 mm, 6,350 mm e 12,70 mm) ou de diamante em forma de cone.

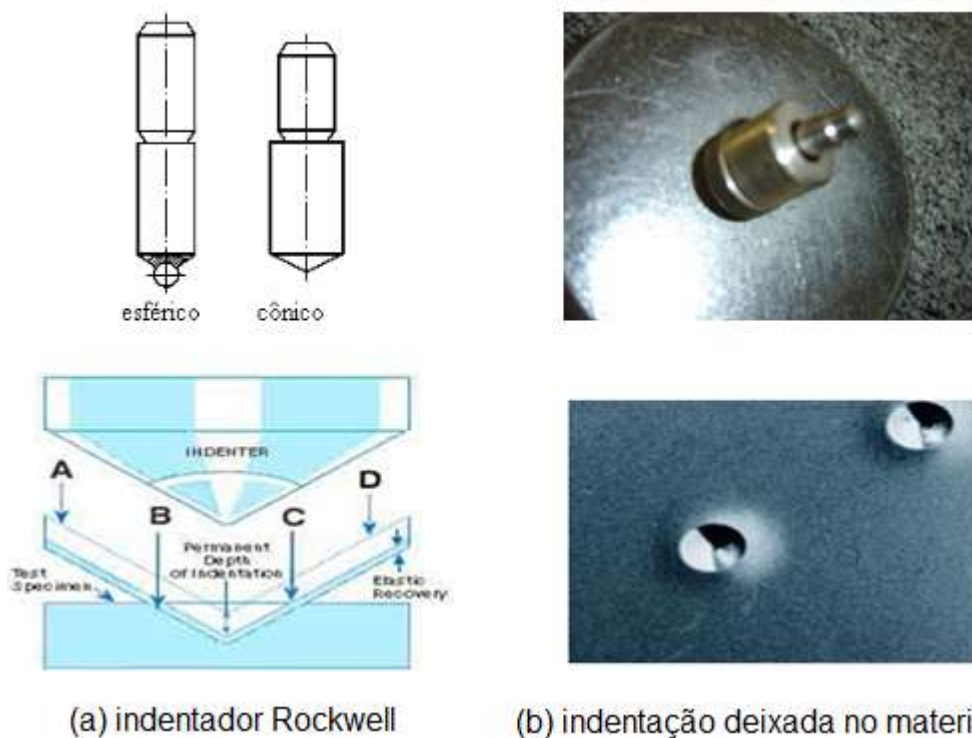


Figura 72 Indentadores de dureza Rockwell. **(não encontrei)**

Depois de aplicada e retirada à carga maior, a profundidade da impressão é dada diretamente no mostrador da máquina, em forma de um número de dureza, após voltar a carga ao valor menor. A leitura deve ser feita numa escala apropriada ao penetrador e à carga utilizada. Algumas máquinas analógicas já vêm providas de escalas justapostas que servem para todos os tipos de dureza Rockwell existentes. A leitura também pode ser feita através do visor digital, caso presente.

O ensaio pode ser realizado em dois tipos de máquina que se diferenciam pela precisão dos componentes, tendo ambas as mesmas técnicas de operação. Têm-se, portanto, a máquina padrão para medida de dureza Rockwell comum e a outra máquina que mede a dureza Rockwell superficial.

A máquina padrão mede a dureza Rockwell normal e, é indicada para avaliação de dureza em geral. A máquina que mede a dureza Rockwell superficial é indicada para avaliação de dureza em folhas finas ou lâminas, ou camadas superficiais de materiais.

Nos ensaios de dureza Rockwell normal utiliza-se uma pré-carga de 10 kgf e a carga maior pode ser de 60, 100 ou 150 kgf. Nos ensaios de dureza Rockwell superficial a pré-carga é de três kgf e a carga maior pode ser de 15, 30 ou 45 kgf. Estas escalas não têm relação entre si. Por isso, não faz sentido comparar a dureza de materiais submetidos a ensaio de dureza Rockwell utilizando escalas diferentes. Ou seja, um material ensaiado numa escala só pode ser comparado a outro material ensaiado na mesma escala.

Quando se estiver especificando durezas Rockwell e superficial, deve ser indicado tanto o número de dureza quanto o símbolo da escala. A escala é designada pelo símbolo HR seguido pela identificação apropriada. Por exemplo, 80 HRB representa uma dureza Rockwell de 80 na escala B, e 60 HR30W indica uma dureza superficial de 60 na escala 30W.

Essas escalas de dureza Rockwell são arbitrárias, porém baseadas na profundidade da penetração e são designadas por letras (A, B, C, etc.) como se mostra nas Tabela 7 e Tabela 8, as quais devem sempre aparecer após a sigla HR para diferenciar e definir a dureza. O número de dureza obtido correspondente a um valor adimensional, ao contrário da dureza Brinell.

Tabela 7 Escala de durezas Rockwell normais. [site](#)

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES				
ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
A	60	diamante cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida
C	150	diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB > 100
D	100	diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
B	100	esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
E	100	esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
F	60	esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
G	150	esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	60	esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
K	150	esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Tabela 8 Escala de durezas Rockwell superficiais.

15 N	15	Cone de diamante	Aço cementado ou temperado
30 N	30		
45 N	45		
15 T	15	Esfera 1/16"	Aço, ferro e outros metais até 240 Brinell, chapas, etc.
30 T	30		
45 T	45		

A máquina analógica contém um pequeno ponteiro auxiliar indicador da profundidade, que registra o momento em que a carga menor (pré-carga) é aplicada na amostra; quando esse ponteiro atingir um ponto existente no mostrador a carga menor estará aplicada integralmente. Simultaneamente, o ponteiro maior gira no sentido horário. Caso a escala do ponteiro maior fique fora do zero, após ser atingida a pré-carga, deve-se acertar o zero nesse momento, conforme a Figura 73.

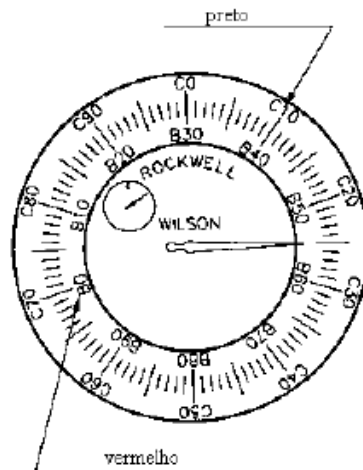


Figura 73 Indicador analógico. [site](#)

A **Figura 74** mostra a medição de dureza Rockwell no durômetro do LPM.



Figura 74 Medição de Dureza Rockwell.

Por meio de um dispositivo da máquina, aciona-se a alavanca que aplica em seguida a carga maior com uma velocidade controlada e constante, aumentando assim a penetração, com o qual o ponteiro se move no sentido horário, acusando a dureza da amostra. Para a retirada da amostra da máquina, gira-se a rosca que apoia o corpo de prova, descarregando completamente a máquina. A **Figura 71** abaixo mostra a sequência de operações esquematicamente.

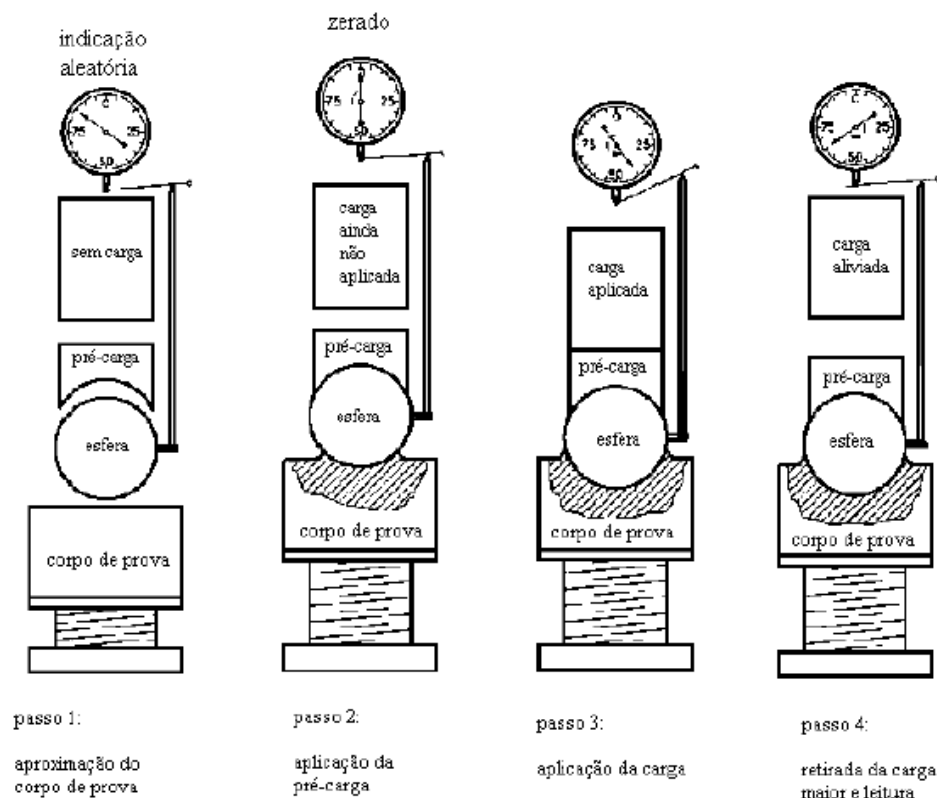


Figura 75 Sequencia de operações para realizar a medição da dureza do material. (não encontrei)

Fatores que provocam imprecisões são a espessura (e) fina do corpo de prova e a distância entre impressões ou entre impressão e aresta do corpo de prova (D). Neste sentido, recomenda-se como mínimo as seguintes relações:

$e > 10 \times p$ onde: p = profundidade de impressão; e = espessura do corpo de prova;

$D = 3 \times d$ D = distância entre impressões ou entre impressão e aresta do cdp; d = diâmetro de impressão.

A profundidade que o penetrador vai atingir durante o ensaio é importante para definir a espessura mínima do corpo de prova. De modo geral, a espessura mínima do corpo de prova deve ser 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador. Entretanto, não há meios de medir a profundidade exata atingida pelo penetrador no ensaio de dureza Rockwell.

Para se saber a profundidade mínima em milímetros do penetrador, pode-se empregar as seguintes fórmulas empíricas:

1) para penetrador de diamante,

HR comum profundidade = $0,002 \times (100 - HR)$,

HR superficial profundidade = $0,001 \times (100 - HR)$;

2) para penetrador esférico,

HR comum profundidade = $0,002 \times (130 - HR)$,

HR superficial profundidade = $0,001 \times (100 - \text{HR})$.

Existe uma relação entre os valores de dureza. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, mostra a relação que existe entre os valores de dureza medidos, é importante ressaltar as amplitudes de dureza que cada escala Rockweel contempla e suas relações com a escala Brinell.

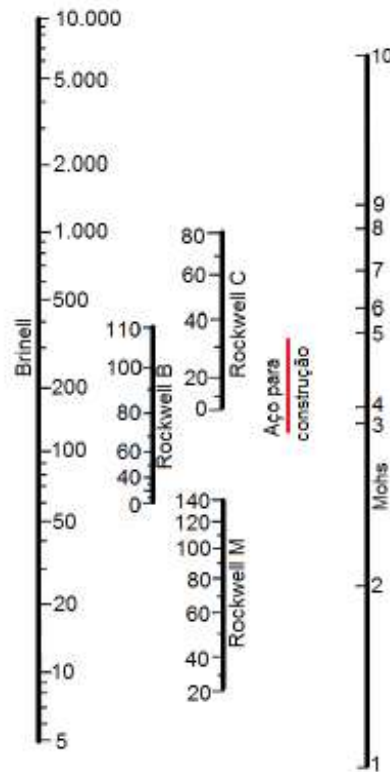


Figura 76 Estimativas de relações entre as durezas Brinell, Rockwell e Mohs. [15]

A resistência de um metal à deformação plástica pode ser estimada tanto pelo limite de resistência à tração como pela dureza. Assim, existe uma relação de proporção entre os valores de dureza e do limite de resistência à tração para materiais metálicos. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão indicadas as relações existentes entre durezas HB e HRC e tensões limite de resistência para o ferro fundido, o aço e o latão.

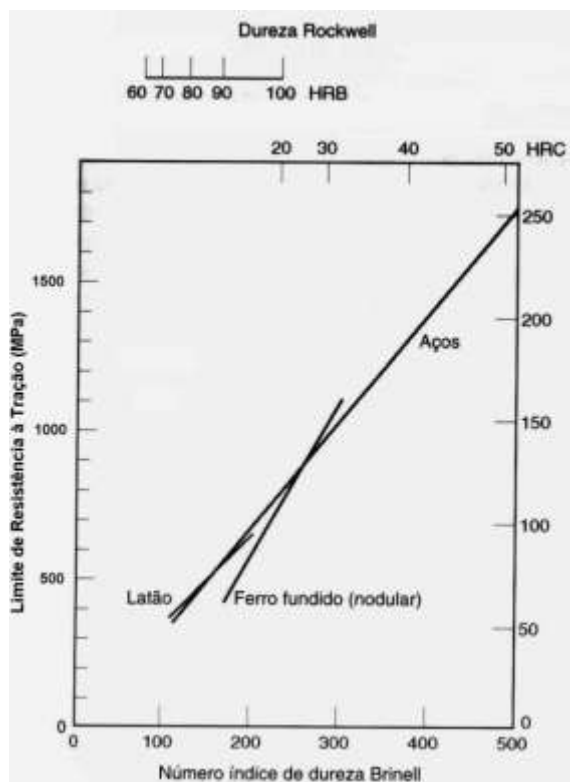


Figura 77 Correlação entre dureza e limite de resistência à tração para diferentes materiais metálicos. **(não encontrei)**

Tabela 9 é apresentada uma relação de normas técnicas brasileiras sobre ensaios de dureza Brinell e Rockwell.

NORMA ABNT	TÍTULO	OBJETIVO
NBRNM187-1	Materiais metálicos - Dureza Brinell - Parte 1: Medição da dureza Brinell	Especifica o método de medição da dureza Brinell para materiais metálicos. Existem normas específicas para materiais ou produtos particulares.
NBR8582	Peças em ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos nodulares
NBR8583	Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos cinzentos

NBRNM171	Tubos de aço - Ensaio de dureza	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em tubos de aço
NBRNM146-1	Materiais metálicos - Dureza Rockwell - Parte 1: Medição da dureza Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H e K) e Rockwell superficial (escalas 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T e 45 T).	Especifica o método para determinação da dureza Rockwell e Rockwell superficial para materiais metálicos (para campos de aplicação e escala). Para materiais específicos e/ou produtos existem norma particulares no sistema internacional.
NBR7407	Folhas-de-flandres - Determinação da dureza Rockwell	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em folhas-de-flandres

4.4 Dureza Vickers

Essa dureza foi introduzida em 1925 por Smith e Standland, levando o nome Vickers, porque a Companhia Vickers-Armstrong Ltda fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com esse tipo de dureza. O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas.

Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza Brinell, porque a relação ideal d/D da dureza Brinell é 0,375. Para obter esta relação ideal na dureza brinell, às tangentes da esfera (partindo dos cantos da impressão) fazem entre si um ângulo de 136°.

Como o penetrador é um diamante, ele se torna praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza Vickers (HV) é independente da carga, isto é, o número de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos.

Para esse tipo de dureza, a carga aplicada pode ser de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120 kgf. A mudança da carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação o visor da máquina; isso depende, naturalmente, da dureza do material que se está ensaiando, como no caso da dureza Brinell. A forma da impressão é um losango regular, ou seja, quadrada, e pela média L das suas diagonais, tem-se, conforme a equações apresentadas a seguir.

$$HV = \frac{F}{A_s}$$

Equação 71

$$HV = \frac{2Q \sin \frac{136}{2}}{L^2}$$

Equação 72

Simplificando a equação 72, obtemos a **Equação 73**.

$$HV = \frac{1,8544Q}{L^2}$$

Equação 73

Onde:

F é a carga

A_s é a área da superfície piramidal.

A Figura 78 mostra a medição de dureza Vickers em durômetro do LPM.



Figura 78 Medição de dureza Vickers.

Como F é dado em kgf ou N e L em mm, a dimensão da dureza Vickers é N/mm² ou kgf/mm². Esse tipo de dureza fornece, assim, uma escala contínua de dureza (de HV = 5 até HV = 1 000 kgf/mm²) para cada carga usada. Entretanto, para cargas muito pequenas, a dureza Vickers pode variar de uma carga para outra, sendo então necessário mencionar a carga usada toda vez que se ensaiar um metal.

A área deve ser medida com precisão, e para esse fim, pode existir um microscópio acoplado à máquina para a determinação das diagonais, L, com

grande precisão, cerca de 1 micron. A carga é aplicada levemente na superfície plana da amostra, por meio de um pistão movido por uma alavanca e é mantida durante cerca de 20 segundos, depois do qual é retirada e o microscópio é movido manualmente até que se focalize a impressão.

As principais vantagens do método Vickers são:

- 1) escala contínua;
- 2) impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça;
- 3) grande precisão de medida;
- 4) deformação nula do penetrador;
- 5) existência de apenas uma escala de dureza;
- 6) aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais;
- 7) aplicação em qualquer espessura de material, podendo, portanto medir também durezas superficiais.

As limitações do ensaio de dureza Vickers são:

Como no caso da dureza Brinell, as impressões Vickers podem ocasionar erros, quando as impressões não apresentam seus lados retos. Pode ocorrer em metais muito moles e é devido ao afundamento do metal em torno das faces do penetrador.

Outro caso é encontrado em metais encruados, nos quais o erro é causado por uma “aderência” do metal em volta das faces do penetrador e a amostra, portanto, um valor de L menor que o real, informando assim, uma dureza maior que a verdadeira. O abaulamento depende da orientação dos grãos cristalinos com relação às diagonais da impressão. As correções necessárias para essas anomalias podem fazer variar a dureza de até 10% em casos especiais.

Em metais com grande anisotropia, obtêm-se impressões de formato de losango irregular, de modo que os valores de L medidos a 90° um do outro diferem mais que o permitido, sendo, portanto necessário tomar a média desses valores, a qual também não deixa de ser um valor aproximado e que deve ser usado com reservas.

A lei de Meyer também pode ser aplicada para o caso de penetrador piramidal. Os mesmos estudos de Tabor e outros para metais “ideais” verificaram que, no caso da dureza Vickers, pode-se aproximar a relação:

$$HV \equiv 3\sigma_e$$

Equação 74

Como a geometria do penetrador é conhecida, pode-se analisar o corte indicado na Figura 79, onde o plano de corte contém a altura da pirâmide e seu apótema, chegando-se a:

$$h \cos \alpha = \frac{a}{2} \rightarrow h = \frac{a}{2 \cos \alpha} = \frac{d}{2\sqrt{2} \cos \alpha}$$

Equação 75

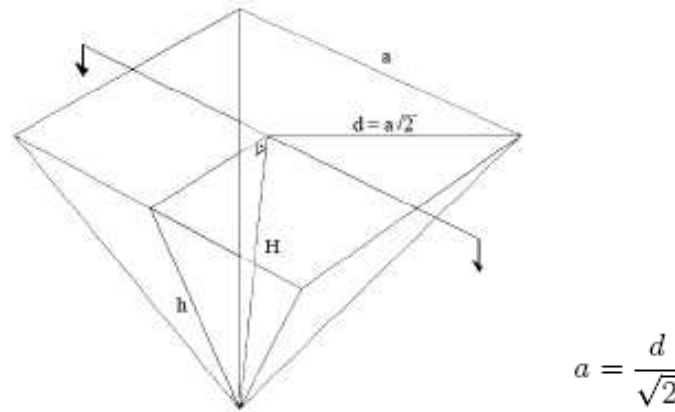


Figura 79 Geometria da região penetrada no corpo de prova. (não encontrei)

A área de contato (A_s) do penetrador com o corpo de prova coincide com a área lateral como se mostra na Figura 80.

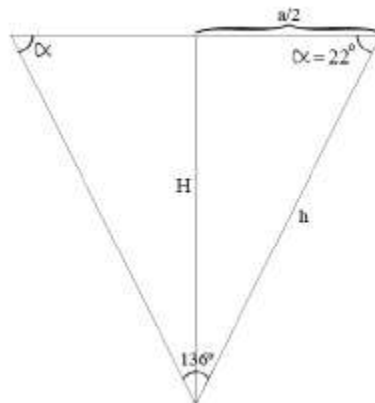


Figura 80- Corte na região penetrada no corpo de prova contendo o apótema (h) e a altura da pirâmide (H).

Da pirâmide têm-se:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{4ah}{2} = \frac{4d^2}{4\sqrt{2}\sqrt{2} \cos \alpha} \\ A_s &= 2 \frac{d^2}{4 \cos \alpha} = \frac{d^2}{2 \cos \alpha} \\ A_s &= \frac{d^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{1,8544} \end{aligned}$$

Equação 76

Logo se obtém a expressão:

$$HV = \frac{F}{A_s} = \frac{1,8544F}{d^2}$$

Equação 77

Neste método, ao contrário do que ocorre no Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material. Para cargas muito altas (acima de 120 kgf), em vez do penetrador de pirâmide de diamante pode-se também usar esferas de aço temperado de 1 ou 2 mm de diâmetro na mesma máquina.

Por ser dependente da área a escala Vickers varia rapidamente quando comparada com a Rockwell, por exemplo: 68 HRC 940 HV e 60 HRC 697 HV como se observa na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O ensaio Vickers fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala. As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas. O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável.

As escalas de dureza utilizadas para materiais cerâmicos e metais endurecidos são a Knoop (este tipo de dureza será explicado em item posterior) e a Vickers. Uma das características importantes das ferramentas de cerâmica para usinagem é a sua dureza à quente com se observa na Figura 81.

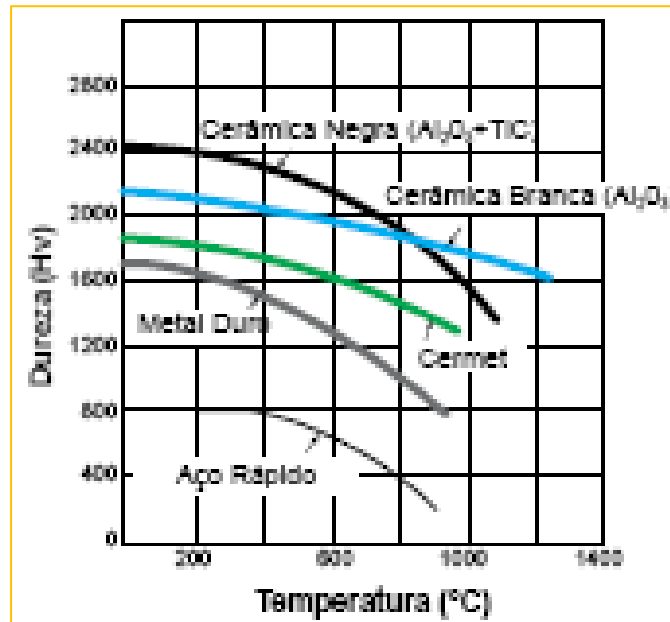


Figura 81 Variação da dureza a quente de ferramentas de usinagem.

Tabela 10 Escalas das diferentes durezas. [site](#)

DUREZA ROCKWELL ESCALA C 150G CONE DE DIAMANTE	DUREZA VICKERS PRAMIDE DE DIAMANTE	DUREZA BRINELL			DUREZA ROCKWELL			DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL			(HS) NUMERO DE DUREZA SHORE	RESISTÊNCIA APROXIMADA N/mm²	DUREZA ROCKWELL ESCALA C 150kg CONE DE DIAMANTE
		ESFERA PADRÃO 10mm	ESFERA HULTGREN 10mm	ESFERA DE METAL DURO 10mm	(HRA) ESCALA A 60kg CONE DE DIAMANTE	(HRB) ESCALA B 100kg ESFERA DE 1/16 POL.	(HRD) ESCALA D 100kg CONE DE DIAMANTE	15N	30N	45N			
68	940				85.6		76.9	93.2	84.4	75.4	97		68
67	900				85.0		76.1	92.9	83.6	74.2	95		67
66	865				84.5		75.4	92.5	82.8	73.3	92		66
65	832			739	83.9		74.5	92.2	81.9	72.0	91		65
64	800			722	83.4		73.8	91.8	81.1	71.0	88		64
63	772			705	82.8		73.0	91.4	80.1	69.9	87		63
62	746			688	82.3		72.2	91.1	79.3	68.8	85		62
61	720			670	81.8		71.5	90.7	78.4	67.7	83		61
60	697		613	654	81.2		70.7	90.2	77.5	66.6	81		60
59	674		599	634	80.7		69.9	89.8	76.6	65.5	80		59
58	653		587	615	80.1		69.2	89.3	75.7	64.3	78		58
57	633		575	595	79.6		68.5	88.9	74.8	63.2	76		57
56	613		561	577	79.0		67.7	88.3	73.9	62.0	75		56
55	595		546	560	78.5		66.9	87.9	73.0	60.9	74	2079	55
54	577		534	543	78.0		66.1	87.4	72.0	59.8	72	2010	54
53	560		519	525	77.4		65.4	86.9	71.2	58.6	71	1952	53
52	544	500	508	512	76.8		64.6	86.4	70.2	57.4	69	1883	52
51	528	487	494	496	76.3		63.8	85.9	69.4	56.1	68	1824	51
50	513	475	481	481	75.9		63.1	85.5	68.5	55.0	67	1755	50
49	498	464	469	469	75.2		62.1	85.0	67.6	53.8	66	1687	49
48	484	451	455	455	74.7		61.4	84.5	66.7	52.5	64	1638	48
47	471	442	443	443	74.1		60.8	83.9	65.8	51.4	63	1579	47
46	458	432	432	432	73.6		60.0	83.5	64.8	50.3	62	1530	46
45	446	421	421	421	73.1		59.2	83.0	64.0	49.0	60	1481	45
44	434	409	409	409	72.5		58.5	82.5	63.1	47.8	58	1432	44
43	423	400	400	400	72.0		57.7	82.0	62.2	46.7	57	1383	43
42	412	390	390	390	71.5		56.9	81.5	61.3	45.5	56	1334	42
41	402	381	381	381	70.9		56.2	80.9	60.4	44.3	55	1294	41
40	392	371	371	371	70.4		55.4	80.4	59.5	43.1	54	1245	40
39	382	362	362	362	69.9		54.6	79.9	58.6	41.9	52	1216	39
38	372	353	353	353	69.4		53.8	79.4	57.7	40.8	51	1177	38
37	363	344	344	344	68.9		53.1	78.8	56.8	39.6	50	1157	37
36	354	336	336	336	68.4	(109.0)	52.3	78.3	55.9	38.4	49	1118	36
35	345	327	327	327	67.9	(108.5)	51.5	77.7	55.0	37.2	48	1079	35
34	336	319	319	319	67.4	(108.0)	50.8	77.2	54.2	36.1	47	1059	34
33	327	311	311	311	66.8	(107.5)	50.0	76.6	53.3	34.9	46	1030	33
32	318	301	301	301	66.3	(107.0)	49.2	76.1	52.1	33.7	44	1000	32
31	310	294	294	294	65.8	(106.0)	48.4	75.6	51.3	32.5	43	981	31
30	302	286	286	286	65.3	(105.5)	47.7	75.0	50.4	31.3	42	951	30
29	294	279	279	279	64.7	(104.5)	47.0	74.5	49.5	30.1	41	932	29
28	286	271	271	271	64.3	(104.0)	46.1	73.9	48.6	28.9	41	912	28
27	279	264	264	264	63.8	(103.0)	45.2	73.3	47.7	27.8	40	883	27
26	272	258	258	258	63.3	(102.5)	44.6	72.8	46.8	26.7	38	863	26
25	266	253	253	253	62.8	(101.5)	43.8	72.2	45.9	25.5	38	843	25
24	260	247	247	247	62.4	(101.0)	43.1	71.6	45.0	24.3	37	824	24
23	254	243	243	243	62.0	100.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36	804	23
22	248	237	237	237	61.5	99.0	41.6	70.5	43.2	22.0	35	785	22
21	243	231	231	231	61.0	98.5	40.9	69.9	42.3	20.7	35	775	21
20	238	226	226	226	60.5	97.8	40.1	69.4	41.5	19.6	34	755	20
(18)	230	219	219	219		96.7					33	736	(18)
(16)	222	212	212	212		95.5					32	706	(16)
(14)	213	203	203	203		93.9					31	677	(14)
(12)	204	194	194	194		92.3					29	647	(12)
(10)	196	187	187	187		90.7					28	618	(10)
(8)	188	179	179	179		89.5					27	598	(8)
(6)	180	171	171	171		87.1					26	579	(6)
(4)	173	165	165	165		85.5					25	549	(4)
(2)	166	158	158	158		83.5					24	530	(2)
(0)	160	152	152	152		81.7					24	520	(0)

Na tabela acima, valores entre parenteses não são comumente usados.
Escalas Rockwell A, C e D são usados com penetrador de diamante.

4.5 Dureza Shore

Em 1907, Shore propôs uma medida de dureza por choque que mede a altura do ressalto (rebote) de um peso que cai livremente até bater na superfície lisa e plana de um corpo de prova. Essa altura de ressalto mede a perda da energia cinética do peso, absorvida pelo corpo de prova. Esse método é conhecido por dureza escleroscópica ou dureza de Shore.

A dureza Shore foi introduzida para ensaios em aços endurecidos, onde o método Brinell não podia ser usado por danificar a esfera penetradora. Ele utiliza um martelo de aço em forma de uma barra com uma ponta arredondada de diamante, que cai de certa altura dentro de um tubo de vidro graduado de 0 a 140. A altura de ressalto após o choque é tomada como a dureza do material, sendo medida por um ponteiro que indica essa altura de queda e o diâmetro da ponta de diamante dependem de cada fabricante, mas todos os aparelhos Shore indicam sempre a mesma dureza para um mesmo material.

O número de dureza lido é um número relativo e serve somente para comparação de materiais. Entretanto, verificou-se que um valor de dureza Shore de 75 corresponde aproximadamente a uma dureza Brinell de 440, segundo outros autores, para uma dureza Brinell de 440, a dureza Shore é de aproximadamente 63. A impressão Shore é pequena e serve para medir durezas de peças já acabadas ou usinadas.

A máquina Shore é leve, portátil e pode, portanto, ser adaptada em qualquer lugar, podendo com isso, medir a dureza de peças muito grandes, impossíveis de serem colocadas nas máquinas de dureza por penetração, como por exemplo, cilindros de laminação. Se a fixação do corpo de prova é bem feita, a variação de dureza Shore é pequena.

O tubo graduado deve ser colocado bem na vertical. É de praxe fazer-se pelo menos cinco medidas de dureza em pontos diversos do material para garantir bem o resultado. A dureza Shore não pode ser efetuada em peças muito finas, que possam mascarar a medida da altura do rebote, porque nesse caso o próprio apoio da peça a ser medida age como absorvedor de energia. Superfícies não lisas de corpos de prova dão leituras falsas, menores que as reais.

A escala de dureza Shore é contínua, cobrindo toda a gama de variação de dureza dos metais. O método E-448 da ASTM é uma das normas existentes para a dureza escleroscópica. A dureza escleroscópica é mais empregada para materiais metálicos duros como, por exemplo, os aços. Para esses materiais, existem duas escalas de dureza escleroscópica: escala C e escala D.

Conforme o método E-448 da ASTM, o equipamento para medida de dureza na escala D possui um dispositivo para prender o martelo na maior altura do ressalto, permitindo assim fazer-se a leitura com o martelo parado.

Para isso, o martelo do equipamento para a escala D é mais longo e mais pesado que o martelo do equipamento para a escala C.

Para que haja a mesma energia durante o ressalto, o martelo D se desloca 18 mm, enquanto que o martelo C se desloca 250 mm (cerca de catorze vezes maior). O martelo D é aproximadamente cinco vezes mais longo e quinze vezes mais pesados que o martelo C. Existem ainda dois tipos de dureza escleroscópica definidos pela ASTM:

Dureza escleroscópica No. 1, onde a aferição é feita por meio do ressalto médio, produzido pelo martelo que cai sobre um bloco de aço AISI W-5 de alto carbono, temperado, até se obter máxima dureza, sem sofrer processo de revenido.

Dureza escleroscópica No. 2, onde a aferição é feita em um cilindro de laminação de aço forjado. O segundo caso produz números de dureza mais altos que o primeiro.

4.5.1 Durômetro Shore

A Figura 82 mostra o Durômetro Shore do LPM com o sistema de indentação digital, realizando uma medição de dureza Shore D.

O durômetro Shore é uma evolução do escleroscópio como mostra a Figura 83, no qual o princípio de medição de queda de peso foi substituído por um sistema de medição por mola. O durômetro é um instrumento popular para medir a dureza de endentação de borrachas, plásticos e materiais com comportamento similar. Os tipos mais comuns de instrumentos são o Modelo A para materiais mais moles e o modelo D para materiais mais duros.

A operação do instrumento é bastante simples. O material é submetido a uma pressão definida aplicada através de uma mola calibrada que atua sobre o indentador, que pode ser esférico ou cônico. Um dispositivo de indicação fornece a profundidade de indentação. O valor da dureza é dado pela profundidade da penetração no material sob teste. Por causa da resiliência de algumas borrachas e plásticos, a leitura da dureza pode mudar ao longo do tempo, por isso o tempo de endentação às vezes acompanha o valor medido da dureza.

As escalas Shore A e Shore D como mostra a Figura 84 são indicadas para a medição de dureza de borrachas/elastômeros e usadas também para plásticos “moles” como poli olefinas, fluoro polímeros e vinis. A escala A é usada para borrachas “moles” enquanto que a escala D é usada para borrachas mais “duras”.

O Durômetro Shore A é específico para medição da dureza relativa em borrachas e plásticos moles. Se o endentador penetra completamente no material, a leitura obtida é zero. Se não ocorrer penetração, a leitura é 100. As leituras são adimensionais. As diferentes escalas Shore A, B, C, D, DO, M, O,

OO, OOO, OOO-S e R foram criadas utilizando 7 formas diferentes de identadores, 5 diferentes molas, 2 diferentes extensões do identador e duas diferentes especificações dos suportes.

As escalas A e D são as mais utilizadas. A escala M usa uma mola de pouca força e foi desenvolvida para permitir o teste de pequenas peças como anéis O que não podem ser testados na escala A normal. Como os materiais respondem de forma diferente às diferentes escalas, não há correlação entre escalas.



Figura 82 Medição de Dureza Shore D.

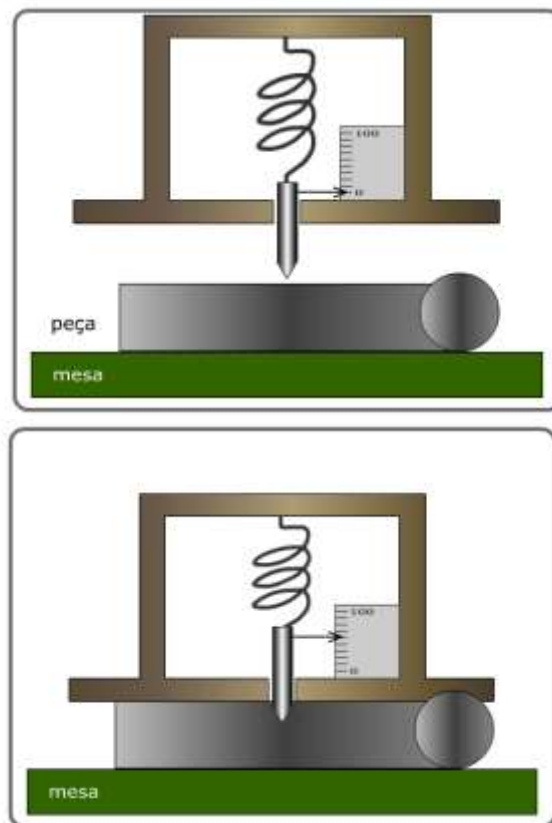


Figura 83 Princípio de Funcionamento do Durômetro Shore. (não achei)

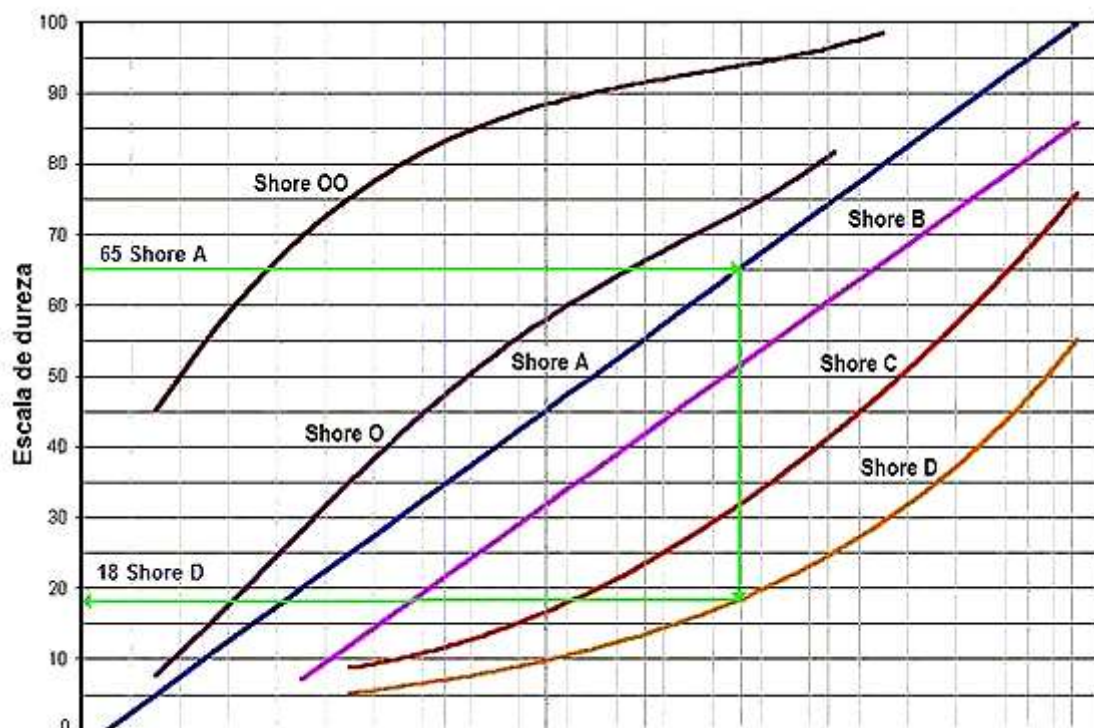


Figura 84 Comparativo entre vários tipos de dureza Shore. [16]

4.6 Microdureza

Muitos problemas metalúrgicos requerem a determinação da dureza em pequenas áreas. A medida do gradiente de dureza em superfícies carbonizadas, a determinação da dureza individual dos constituintes de uma microestrutura, ou a verificação da dureza em delicadas engrenagens de relógio podem ser problemas típicos.

As baixas cargas usadas nos testes de microdureza requerem um cuidado extremo em todos os estágios do ensaio. A superfície deve ser cuidadosamente preparada, sendo normalmente necessário o polimento com qualidade metalográfica. Deve-se cuidar da amostra ao fazer o polimento já que o encruamento da superfície pode influenciar os resultados.

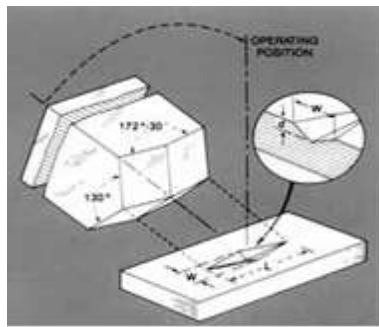
4.6.1 Microdureza por penetração

Muitas das aplicações da dureza Vickers estão atualmente voltadas para o ensaio de microdureza. Assim, o problema da determinação das profundidades de superfície carbonetada, de têmpera, etc., além da determinação de dureza de constituintes individuais de uma microestrutura, de materiais frágeis, de peças pequeníssimas ou extremamente finas, é geralmente solucionado pelo uso da microdureza.

Como o próprio nome diz, a microdureza produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que um kgf, com penetrador de diamante. A carga pode chegar a até 20 gf (vinte gramas força) somente e a superfície do corpo de prova também deve ser plana. Quanto ao penetrador usado, há dois tipos de microdureza: Vickers(**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e Knoop (Figura 85).

Para cada teste um penetrador, de diamante muito pequeno com geometria piramidal (ângulo entre faces de 136°) é forçado para dentro da superfície da amostra. As cargas aplicadas são muito menores do que para os testes Rockwell e Brinell, variando entre um e 2000 g. A impressão resultante é observada sob um microscópio e medida. Esta medição é então convertida a em um número de dureza.

Ambos são bem adequados para medição de dureza de regiões pequenas selecionadas. Além disso, a dureza Knoop é usada para testar materiais frágeis tais como cerâmica como mostra a Figura 85 (b).

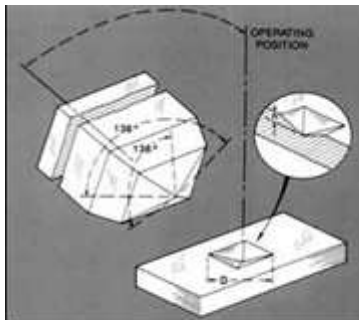


(a) indentador Knoop

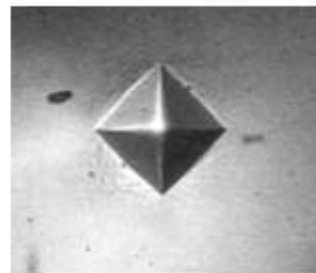


(b) indentação deixada no material

Figura 85 Dureza Knoop. (não encontrei)



(a) indentador Vickers;



(b) e (c) microdurezas deixadas em materiais

Figura 86 Microdureza Vickers. (não encontrei)

A **Figura 87** mostra o Microdurômetro do LPM realizando medições em uma peça embutida em baquelite.

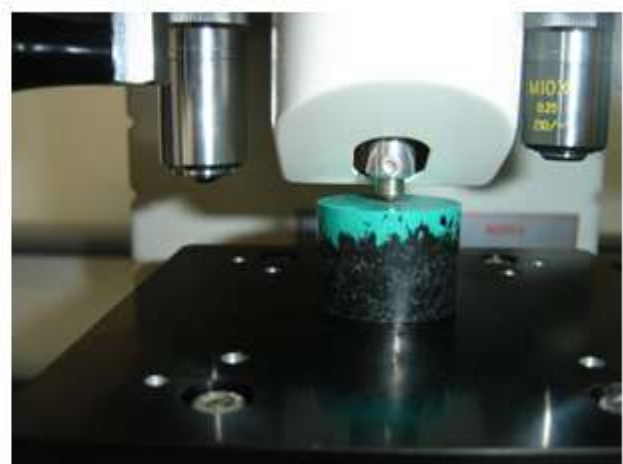


Figura 87 Medição de Microdureza Vickers.

A microdureza Vickers usa a mesma técnica descrita para a microdureza Knoop, utiliza um penetrador em forma de uma pirâmide alongada, que produz uma impressão, com uma relação comprimento-largura-profundidade de aproximadamente 30:4:1. A relação entre a diagonal maior (L_m) e a diagonal menor da impressão é de 7:1.

A expressão para calcular a microdureza Knoop, (HK), é obtida usando-se a área projetada da impressão e é a equação que se encontra a seguir:

$$HK = \frac{Q}{A_p} = \frac{Q}{L_m^2} = \frac{1}{0,070281 L_m^2}$$

Equação 78

Onde A_p é a área projetada, Q é a carga dada em gramas-força (gf), L_m é a diagonal maior da impressão dada em micron. e c (0,070281) é uma constante do penetrador relacionando a área projetada da impressão com L_m^2 .

A dureza Knoop, é sempre fornecida em kgf/mm². O valor de c indicado acima é o adotado pela ASTM (método E-384) ou pela ABNT (método MB-359), mas pode variar conforme a máquina usada.

A possibilidade de erro de leitura das diagonais da impressão Knoop é muito maior que os do ensaio de microdureza Vickers, por isso este método de ensaio está em desuso, mas em casos especiais como na determinação de, por exemplo, finas regiões de camada eletro depositadas ou endurecidas ainda é utilizada.

L_m é cerca de três vezes maior que L , para uma mesma carga, sendo, portanto, de medição mais precisa e não sofre muito o fenômeno da recuperação elástica (principalmente para cargas maiores que 300 gf), que afeta mais a diagonal menor da impressão Knoop ou as diagonais, L , da impressão Vickers.

A profundidade da impressão Knoop é menor que a metade da profundidade causada pela impressão Vickers com a mesma carga, sendo possível a dureza Knoop medir a dureza de materiais extremamente frágeis como o vidro ou certas tintas.

A preparação do corpo de prova deve ser feita metalograficamente, em vista da pequena carga a ser aplicada. Polimento eletrolítico deve ser usado preferivelmente para evitar encruamento do metal na superfície, que afetaria o resultado. O polimento eletrolítico torna também mais nítida a impressão para a medida das diagonais.

Caso seja necessário usar um polimento mecânico prévio, devem-se remover algum micrometro da camada superficial. Um método bom, empregado para corpos de prova muito pequenos, é o de embuti-lo em baquelite, por exemplo, a fim de fixá-lo firmemente e de tornar a sua superfície perpendicular ao penetrador.

Usando-se cargas muito baixas (menores que 300 gf), pode haver uma pequena recuperação elástica, além de produzirem impressões muito pequenas, que, principalmente no caso da microdureza Knoop, podem prejudicar a medida da diagonal maior da impressão, devido à dificuldade de se localizar as pontas da diagonal. Esses fatores provocam erros no ensaio, resultando em valores de dureza maiores que o verdadeiro.

Em virtude disso, verifica-se que a dureza Knoop aumenta quando a carga diminui abaixo de 200 gf até cerca de 20 gf, para depois decrescer com carga ainda menores. No caso da impressão Vickers, a dureza cai com a aplicação de cargas muito baixas. Na determinação da macro dureza (HB e HV) também ocorrem os problemas do “afundamento” e “aderência” vistos nas micro durezas. A dureza Knoop é ainda muito sensível à orientação da superfície da amostra (anisotropia), principalmente quando se mede a microdureza de um grão cristalino, por ter a diagonal maior mais alongada que a Vickers.

O tempo de manutenção da carga deve ser aproximadamente 20 segundos e a velocidade de aplicação da carga deve estar entre 1 e 20 $\mu\text{m}/\text{segundo}$; velocidades maiores dão valores mais baixos de dureza. A calibração das máquinas deve ser frequente, principalmente porque o erro na aplicação da carga altera muito o valor da dureza, mesmo com variações de 1 gf, para cargas menores que 50 gf.

A letra M antes da escala é indicador de **microdureza**. Ex.: HMV – Dureza Micro vickers.

4.7 Dureza Janka

A dureza Janka (fH) é uma variação do método Brinell, usada em geral para madeiras. A dureza Janka é definida pela força necessária para penetrar, até a metade do diâmetro, uma esfera de aço de diâmetro 11,28 mm (área de contato da penetração de 1 cm^2).

O carregamento deve ser monotônico e crescente aplicado até que a esfera penetre a uma profundidade igual ao seu raio (5,64 mm), em um período de pelo menos um minuto (1 mm a cada 10 segundos).

A Dureza Janka é dada pela equação:

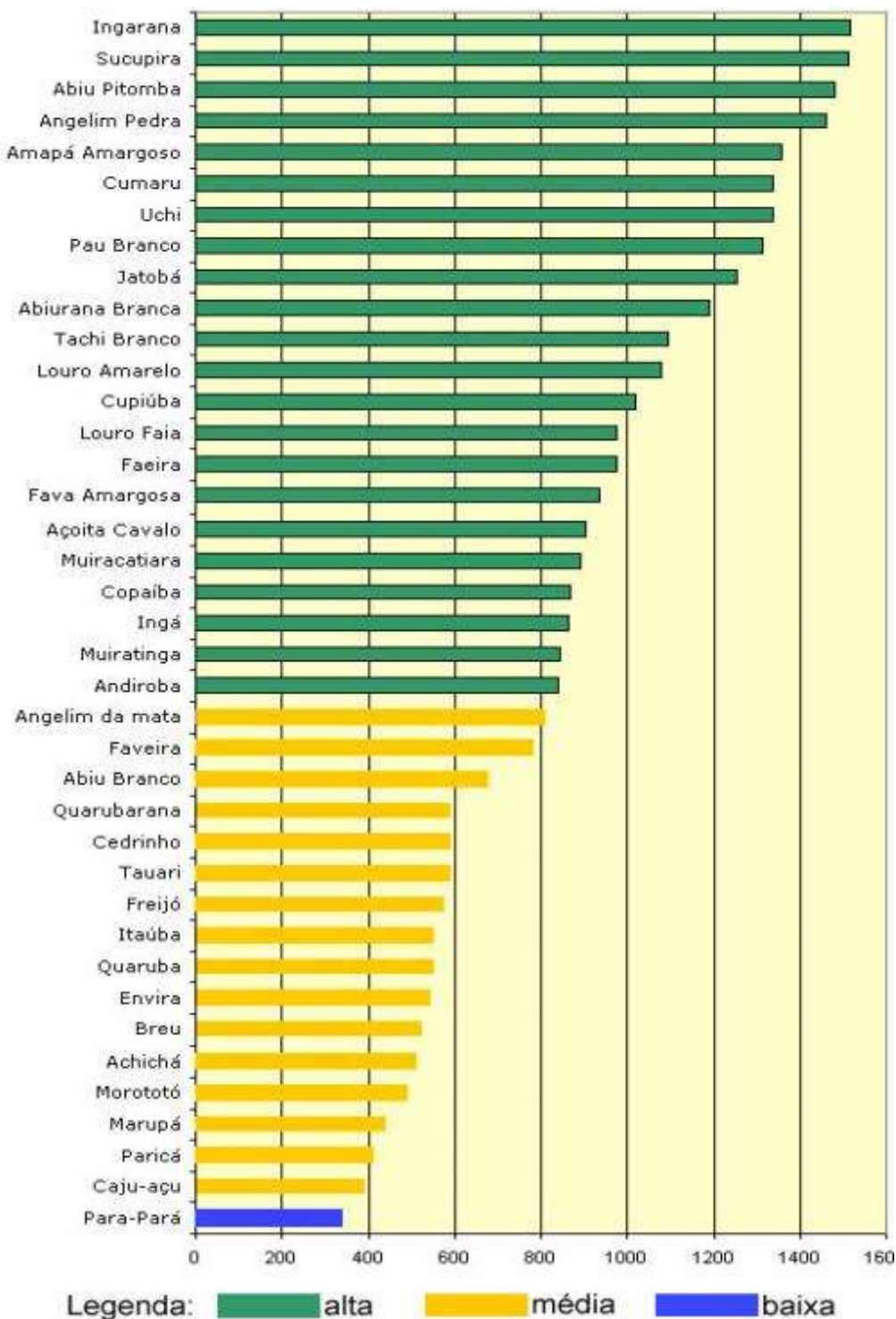
$$fH = \frac{F_{max}}{A_{sd}}$$

Equação 79

Observações:

1. O corpo-de-prova deve ter forma prismática de secção quadrada de 5,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 15,0 cm e deve ser fabricado com seus lados menores perpendiculares às direções preferenciais da madeira.
2. A dureza da madeira é medida na direção paralela às fibras ($fH0$) e/ou na direção normal às fibras ($fH90$).

Para se ter uma noção da magnitude de dureza Janka, é reproduzido na Figura 88 uma comparação entre diversas espécies de madeiras.



4.8 Considerações sobre os ensaios de dureza

Embora o ensaio de dureza possa, em princípio, ser feito em quase todos os produtos metálicos, existem alguns produtos em que o ensaio de dureza é o único possível sem causar a destruição da peça, ou em que o ensaio de dureza desempenha função importante na especificação do produto. Assim, além de peças fundidas, onde se deve fundir um tarugo em separado quando se deseja medir a dureza, alguns dos produtos acabados que estão nos casos acima mencionados são dados a seguir.

- *Engrenagens.* O único ensaio mecânico que se faz costumeiramente é a medida da dureza Rockwell nos dentes da engrenagem.

- *Esferas e rolamentos.* Normalmente utiliza-se o método de Dureza Rockwell.

- *Parafusos.* Quando não se dispõe de máquina de tração, o ensaio de dureza em parafusos é geralmente realizado como substitutivo. Pode-se medir a dureza na escala Brinell ou Rockwell, tanto no topo como no lado da cabeça do parafuso.

- *Porcas.* Além da prova de carga por tração ou compressão, as especificações também pedem ensaio de dureza Brinell ou Rockwell. As impressões de dureza Brinell são feitas na face lateral da porca e as impressões Rockwell no topo. Às vezes, a impressão Brinell pode provocar uma deformação na porca; nesse caso, é preferível optar pela dureza Rockwell ou usar uma carga menor na dureza Brinell.

- *Arruelas.* As especificações desse produto exigem somente ensaio de dureza Rockwell.

- *Rodas de avião.* O ensaio de rotina mais empregado é o ensaio de dureza escleroscópica Shore em vários locais da peça.

- *Ferramentas.* A ferramenta é controlada pelo ensaio de dureza Rockwell (ou, em certos casos, Brinell) como aceitação ou rejeição da ferramenta, conforme exigem as especificações. Geralmente as impressões são feitas na região de utilização da ferramenta como por exemplo, o gume de uma pá ou a ponta de uma picareta.

- *Peças soldadas.* Muitas vezes deseja-se verificar a alteração estrutural causada pela soldagem de uma peça (chapa, tubo, etc.). Essa verificação é feita por meio de ensaio de dureza Vickers ou Rockwell ao longo de uma linha que passa pelo material-base de um lado, pela solda até o outro lado do material-base.

- *Bloco-padrão.* Uma máquina de dureza é aferida por meio do bloco-padrão, que é uma peça fabricada de modo a obter-se uma dureza

praticamente constante em toda a sua superfície. Quando uma máquina está aferida com um bloco-padrão de dureza conhecida, essa máquina pode ser usada para efetuar ensaio em outro bloco-padrão, do qual se quer conhecer o valor de dureza.

- *Controle de tratamento térmico.* O ensaio de dureza é largamente empregado para se saber se um tratamento térmico efetuado numa peça ferrosa ou não ferrosa foi realizado a contento. Se a peça não atingir ou se ultrapassar em muito uma determinada dureza, a peça não foi tratada corretamente. Os exemplos são vários: têmpera e revenimento de aços, tratamentos térmicos de recozimento, solubilização ou envelhecimento de ligas de alumínio, ensaio Jominy de temperabilidade, tratamentos térmicos em ligas de cobre, magnésio, etc.

-*As normas técnicas ABNT que descrevem os ensaios de dureza para materiais metálicos se encontram na tabela 11.*

Tabela 11 - Normas técnicas da ABNT relacionadas ao ensaio de dureza de materiais metálicos.

NORMA ABNT	TÍTULO	OBJETIVO
NBRNM187-1	Materiais metálicos - Dureza Brinell - Parte 1: Medição da dureza Brinell	Especifica o método de medição da dureza Brinell para materiais metálicos. Existem normas específicas para materiais ou produtos particulares.
NBR8582	Peças em ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos nodulares
NBR8583	Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a dureza Brinell	Apresenta os índices de dureza Brinell dos ferros fundidos cinzentos
NBRNM171	Tubos de aço - Ensaio de dureza	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em tubos de aço
NBRNM146-1	Materiais metálicos - Dureza Rockwell - Parte 1: Medição da	Especifica o método para determinação da dureza Rockwell e Rockwell superficial

	dureza Rockwell (escalas A, B, C, D, E, F, G, H e K) e Rockwell superficial (escalas 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T e 45 T)	para materiais metálicos (para campos de aplicação e escala). Para materiais específicos e/ou produtos existem norma particulares no sistema internacional.
NBR7407	Folhas-de-flandres - Determinação da dureza Rockwell	Descreve o procedimento de ensaio de dureza em folhas-de-flandres

5. Tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura K_{IC} de um material caracteriza sua resistência ao crescimento de uma trinca, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver até o momento da falha. Essa propriedade é uma maneira quantitativa de expressar a resistência à fratura frágil de um material quando uma trinca está presente. A fratura irá ocorrer quando o valor de K (fator de intensidade de tensões) superar o valor de K_{IC} . Valores baixos de tenacidade à fratura costumam ocorrer em materiais frágeis, enquanto que valores altos de tenacidade à fratura ocorrerem em materiais dúcteis.

O valor de K_{IC} também é conhecido como tenacidade à fratura sob condições do estado plano de deformações. Um mesmo valor de K_{IC} pode ser obtido testando corpos de prova de um mesmo material, porém, com diferentes geometrias e sob combinações críticas de tamanhos e formas de trinca. Isto porque K_{IC} é uma propriedade do material. A equação que quantifica esta propriedade é:

$$K_{IC} = Y \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}$$

Equação 80

Onde Y é um fator de forma. A dedução desta equação é explicada nos itens posteriores.

O campo de tensões na ponta de uma trinca é de grande interesse para a MFLE (Mecânica da Fratura Linear Elástica). A superposição da ação das cargas estáticas permite considerar os campos de tensão e de deformação de uma trinca, sob um carregamento qualquer. Existem três modos básicos de carregamento, modos I, II e III de crescimento de trincas. A Figura 89 apresenta esquematicamente esses três modos possíveis de carregamento de uma trinca sob a ação de forças.

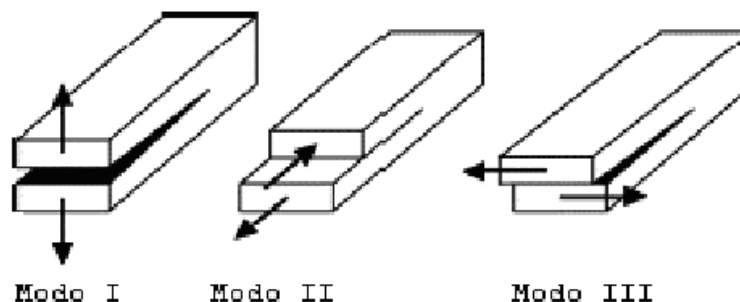


Figura 89 Diferentes modos de carregamento em uma trinca. [1]

- Modo I: carregamento em tração, com abertura da ponta da trinca.
- Modo II: cisalhamento puro, com deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendiculares à frente de propagação.

- c) Modo III: rasgamento com deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesma.

Para cada modo de carregamento existe um fator de intensidade de tensão associado, de tal forma que os fatores de intensidade de tensão K_I , K_{II} e K_{III} estão associados aos modos I, II e III. O Modo I é encontrado na maioria dos casos práticos da engenharia. É comum, também, que a propagação de trincas ocorra por combinação de alguns dos modos de carregamento, principalmente dos modos I e II.

5.1 Fator de intensidade de tensão

O fator de intensidade de tensão K constitui uma medida fundamental para a determinação da estabilidade de uma trinca à fratura, e para estimar a propagação de trincas. Dessa maneira, o fator de intensidade de tensões tem sido compilado em diversos manuais para diversas situações de geometria e carregamento. Entretanto, em muitas situações a geometria é tão complexa que uma expressão para K pode não ser encontrada em tais referências.

Um sistema de coordenadas para descrever o campo de tensões na vizinhança da trinca é ilustrado na Figura 90. Esse sistema de coordenadas polar r e θ é usado no plano x - y , que é normal ao plano da trinca. Para qualquer caso de carregamento em tração (modo I), as tensões próximas à ponta da trinca são funções tanto da distância radial r como do ângulo θ , de acordo como se segue:

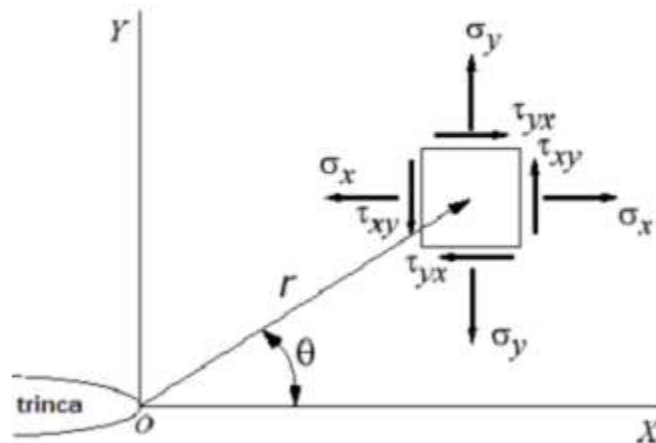


Figura 90 Coordenadas na ponta da trinca.

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots$$

Equação 81

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots$$

Equação 82

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} + \dots$$

Equação 83

$$\sigma_z = 0 \quad EPT \text{ (Estado Plano de Tensões)}$$

Equação 84

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad EPD \text{ (Estado Plano de Deformações)}$$

Equação 85

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Equação 86

Essas equações são baseadas na Teoria da Elasticidade e descrevem o campo de tensões nas proximidades da ponta da trinca. Tais soluções foram propostas por Westergaard em 1939. A partir dessas equações pode-se inferir que as tensões aumentam rapidamente nas proximidades da trinca.

As componentes não-nulas se aproximam de infinito à medida que r se aproxima de zero, como ilustra a Figura 91. Isso é causado especificamente se as tensões forem proporcionais ao inverso de r . Portanto, existe uma singularidade matemática no modelo que define a ponta da trinca, logo nenhum valor de tensão na ponta da trinca pode ser previsto por estas equações. Verifica-se também que todas as componentes não nulas são proporcionais à quantidade K_I , e os fatores restantes simplesmente fornecem a variação com r e θ . Assim, a magnitude do campo de tensões próximo à ponta da trinca pode ser caracterizada pelo valor do fator K_I .

Esse fator é uma medida da severidade da trinca, e sua definição é dada pela seguinte equação:

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r})$$

Equação 87

Ou:

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot (\pi a)^{1/2}$$

Equação 88

Onde Y é um fator de forma.

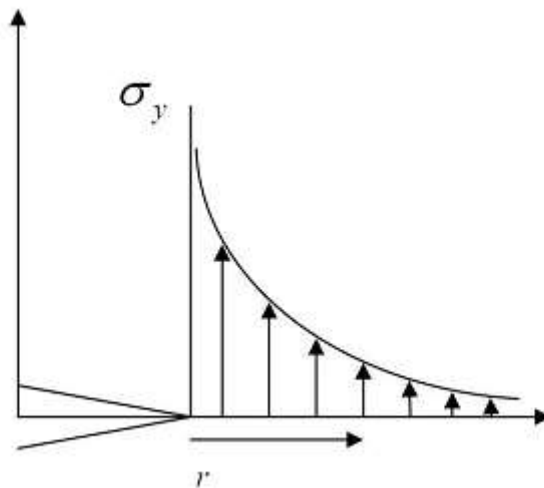


Figura 91 Distribuição elástica da tensão na região da trinca.

Porém, na prática os materiais (principalmente os metais) possuem uma tensão de escoamento acima da qual eles se deformam plasticamente. Isso significa que sempre haverá uma região ao redor da ponta da trinca onde a deformação plástica ocorrerá, implicando que a singularidade no campo de tensões não se observa para materiais reais. Essa singularidade é uma característica do modelo matemático.

5.2 Zona plástica na região da trinca

Peças que já tenham uma trinca, ao serem submetidas a uma tensão, sempre terão uma região próxima da ponta da trinca onde o material se deformará plasticamente e a tensão nunca alcançará o infinito. O caso de tensões infinitas na ponta da trinca é válido apenas do ponto de vista da teoria da elasticidade, pois a Lei de Hook não impõe limitações para tensões e deformações.

Sob estado plano de deformação, a tensão σ_z não é nula, isso faz com que as tensões $\sigma_x = \sigma_y$ necessárias para causar escoamento sejam aumentadas. Em contrapartida o tamanho da zona plástica é diminuído em relação ao estado plano de tensão. Esse aumento na resistência ao escoamento é causado por uma restrição geométrica e resulta em um estado hidrostático de tensões na região da trinca.

Considerando o interior de uma geometria onde se observa o estado plano de deformação, sempre haverá o caso de estado plano de tensões em sua superfície. Com a existência do estado plano de deformações no interior da geometria, a tensão σ_z aumentará gradualmente de zero (na superfície) até o valor do estado plano de deformações no interior como ilustrado na Figura 92. Consequentemente, a zona plástica diminui gradualmente do tamanho do

estado plano de tensões na superfície até o tamanho do estado plano de deformações no interior da geometria.

O estado de tensões influencia o tamanho da zona plástica, por outro lado, o tamanho da zona plástica influencia o estado de tensões. A ocorrência do estado plano de deformação implica que a deformação plástica só vai ocorrer quando o nível das tensões principais estejam à cima da tensão de escoamento.

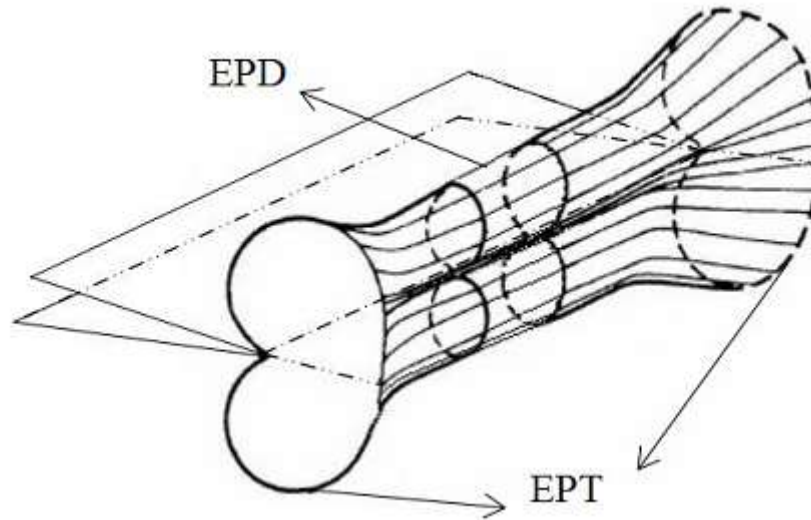


Figura 92 Esquema tridimensional da região da zona plástica.

Para uma abordagem mais apurada a respeito do formato da zona de plastificação na ponta da trinca deve-se impor um critério de escoamento do material, podendo ser o critério de Von Mises ou de Tresca. Adotando-se o critério de Von Mises, tem-se a Equação 89.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \leq 2\sigma_{esc}^2$$

Equação 89

Onde σ_{esc} é a tensão de escoamento no caso uniaxial. No plano onde $\theta = 0^\circ$ e as tensões principais σ_1 e σ_2 são iguais e atuam nas direções X e Y. Assim, a fronteira que define a zona plástica como função de θ é obtida substituindo-se as equações que definem o campo de tensões na ponta da trinca na equação de Von Mises. Assim, temos as equações que seguem.

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) \right] = 2\sigma_{esc}^2 \quad EPD$$

Equação 90

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left[1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right] = 2\sigma_{esc}^2 \quad EPT$$

Equação 91

Portanto, o raio da zona plástica em função de θ pode ser escrita como a Equação 92 e a Equação 93 demonstram.

$$r_p(\theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_{esc}^2} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \theta + (1-2\nu)^2 (1 + \cos \theta) \right] \quad EPD$$

Equação 92

$$r_p(\theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_{esc}^2} \left[1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right] \quad EPT$$

Equação 93

A região que define as zonas plásticas para o estado plano de tensões e estado plano de deformações pode então ser representada graficamente partindo-se das equações e assim define-se o tamanho da zona plástica para o caso em questão.

5.3 Validade do campo da mecânica da fratura linear elástica (MFLE)

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é responsável por averiguar os problemas relacionados à fratura de materiais predominantemente em regime elástico ou cujo comportamento inelástico seja supostamente desprezível ou com atuação muito localizada.

Devido à característica inerente da fratura ocorrer em materiais frágeis, a MFLE também pode ser chamada de Mecânica da Fratura Frágil. Tais materiais são, entre outros, os materiais de alta resistência utilizados largamente na indústria aeronáutica, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e aços inoxidáveis trabalhados a frio.

A MFLE normalmente é utilizada em situações em que a fratura ocorre ainda no regime linear-elástico. Isto pode ocorrer para ligas de altíssima resistência mecânica ou mesmo em ligas com resistência moderada desde que empregadas em uma espessura de dimensão razoável. Como visto, é a espessura que ditará se o regime é o estado plano de deformação (estado triaxial de tensões) em que a mecânica da fratura linear-elástica é aplicável, ou o estado plano de tensão (estado biaxial de tensões) em que a mecânica da fratura elasto-plástica é aplicável.

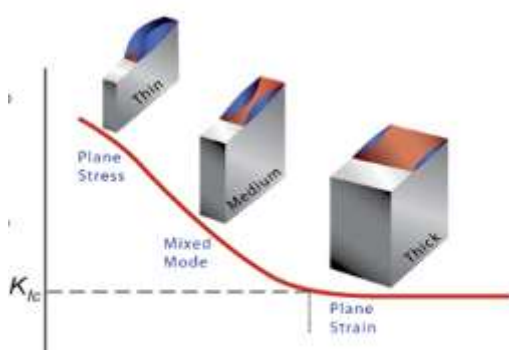


Figura 93 Plano de tensões, o estado misto e o plano de deformação. [1]

A Erro! Fonte de referência não encontrada. ilustra o plano de tensões no corpo de prova de pequena espessura e conforme a espessura aumenta, o estado plano de deformação aumenta até atingir

uma espessura em que a mecânica da fratura linear-elástica é aplicável.

A MFLE pode ser empregada com sucesso à medida que a zona plástica for pequena em relação ao tamanho da trinca e das dimensões da estrutura que a contém. O sucesso da MFLE em estabelecer um tamanho de trinca crítico, desenvolvido teoricamente e comprovado na prática, fica restrito para casos em que não há uma deformação plástica apreciável acompanhando a fratura. É importante ressaltar ainda que tanto a espessura como o comprimento da trinca deve obedecer a uma relação para que o estado plano de deformações seja considerado (ASTM E399). Tal relação é apresentada na equação 94.

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{esc}} \right)^2$$

Equação 94

Onde B é a espessura, **a** é o comprimento da trinca, W é a largura do espécime, K_{IC} é o valor de tenacidade à fratura do material e σ_{esc} é o valor da tensão de escoamento do mesmo.

Ao ocorrer à fratura de um corpo, para alguns tipos de materiais, sempre há uma região plastificada na ponta da fissura. Apesar disso, em muitas vezes a existência desta plastificação pode ser negligenciada sem prejudicar a simulação do comportamento da fissura, quando esta tem dimensão pequena em relação à região K dominante. Nesses casos, é possível aplicar a mecânica da fratura linear elástica. Nos casos em que estas condições não se verificam, é preciso considerar a plastificação, aplicando-se então os conceitos da mecânica da fratura elasto-plástica.

5.4 Critério energético de Griffith

Uma das equações básicas da Mecânica da Fratura foi proposta por Griffith por volta de 1920. Considerando uma placa infinita com uma trinca central de tamanho 2a e espessura unitária, como ilustrado na Figura 94. Essa placa é submetida a uma tensão σ nas extremidades.

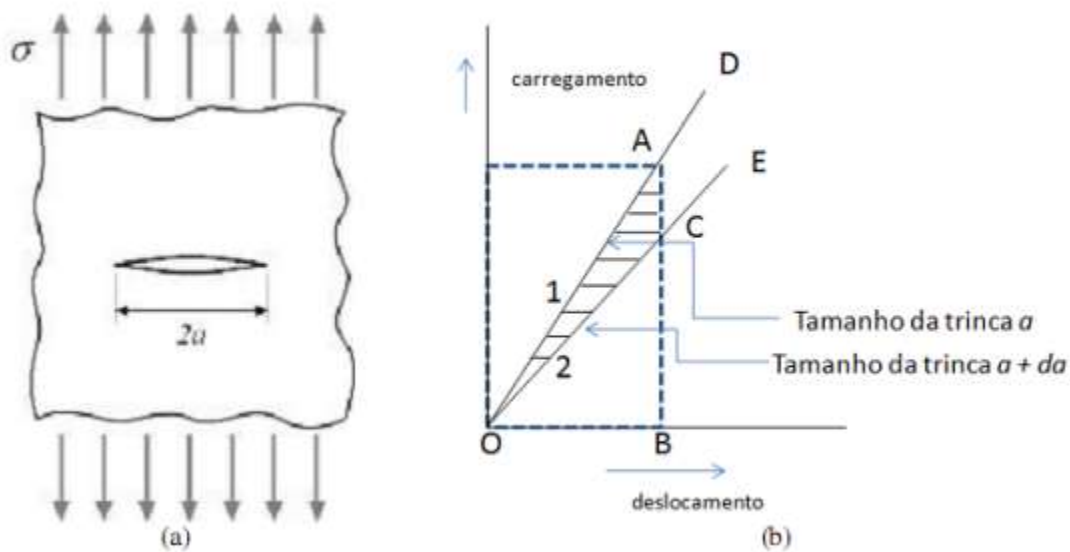


Figura 94 Critério de Griffith, (a) Placa plana com trinca central e (b) Diagrama carregamento-deslocamento. [18]

A energia elástica da placa é representada pelo diagrama carregamento-deslocamento da Figura 94(b). Se a placa for prolongada a sua rigidez diminuirá (linha OC). Por conseguinte, a energia contida cairá para uma magnitude representada pela área OCB.

A propagação da trinca de a para $a+da$ resultará em uma liberação de energia igual em magnitude à área OAC.

Se a placa for submetida a uma tensão maior, haverá uma maior liberação de energia. Se a trinca crescer além de uma quantidade da , Griffith determinou que a propagação de trinca instável ocorrerá caso a liberação de energia seja suficiente para prover a energia necessária para o crescimento da trinca. A condição para o crescimento da trinca é dada pela equação 95.

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da}$$

Equação 95

Onde U é a energia elástica e W é a energia necessária para trinca crescer. De acordo com as condições para o campo de tensões de uma trinca elíptica, Griffith determinou dU/da como:

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E}$$

Equação 96

Por unidade de espessura da placa, onde E é o módulo de Young. Geralmente dU/da é representado pela Equação 97.

$$G = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E}$$

Equação 97

O fator G é conhecido como taxa de liberação de energia, ou também como força condutora da trinca. A energia consumida na propagação da trinca é denotada por dW/da que também é conhecida como resistência de crescimento da trinca. Mesmo que ocorra uma quantidade de energia suficiente para a propagação da trinca, esta não propagará a menos que a ponta da trinca esteja pronta para falhar. Dessa maneira, o próximo critério é equivalente ao critério energético, considerando a característica do material, apresentando pela equação 98.

$$\frac{K^2}{E} = G$$

Equação 98

1.1. Norma ASTM E399

A norma ASTM E-399 foi editada pela American Society for Testing and Materials e tem como objetivo principal a determinação da tenacidade à fratura de materiais metálicos em vários corpos de prova pré-trincados por fadiga.

Ao realizar o ensaio os dispositivos construídos para o mesmo, devem produzir uma distribuição de tensão uniforme através da espessura do corpo de prova. Do contrario, ocorre crescimento de trinca diferenciado ao longo da espessura e o ensaio não é valido.

A medida de deslocamento é feita por um medidor composto por duas pinças e um bloco espaçador. Aliado a isto, medidores elétricos conectados a uma ponte de wheatstone de deformação também são instalados a superfícies de compressão, como se observa na Figura 95.

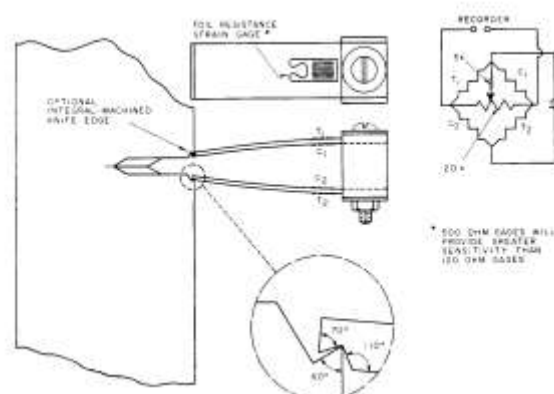


Figura 95 Esquema de medição da abertura da trinca. (Norma astm e399)

Para a preparação dos corpos de prova é necessário à configuração de um entalhe e trincas de fadiga, conforme Figura 96.

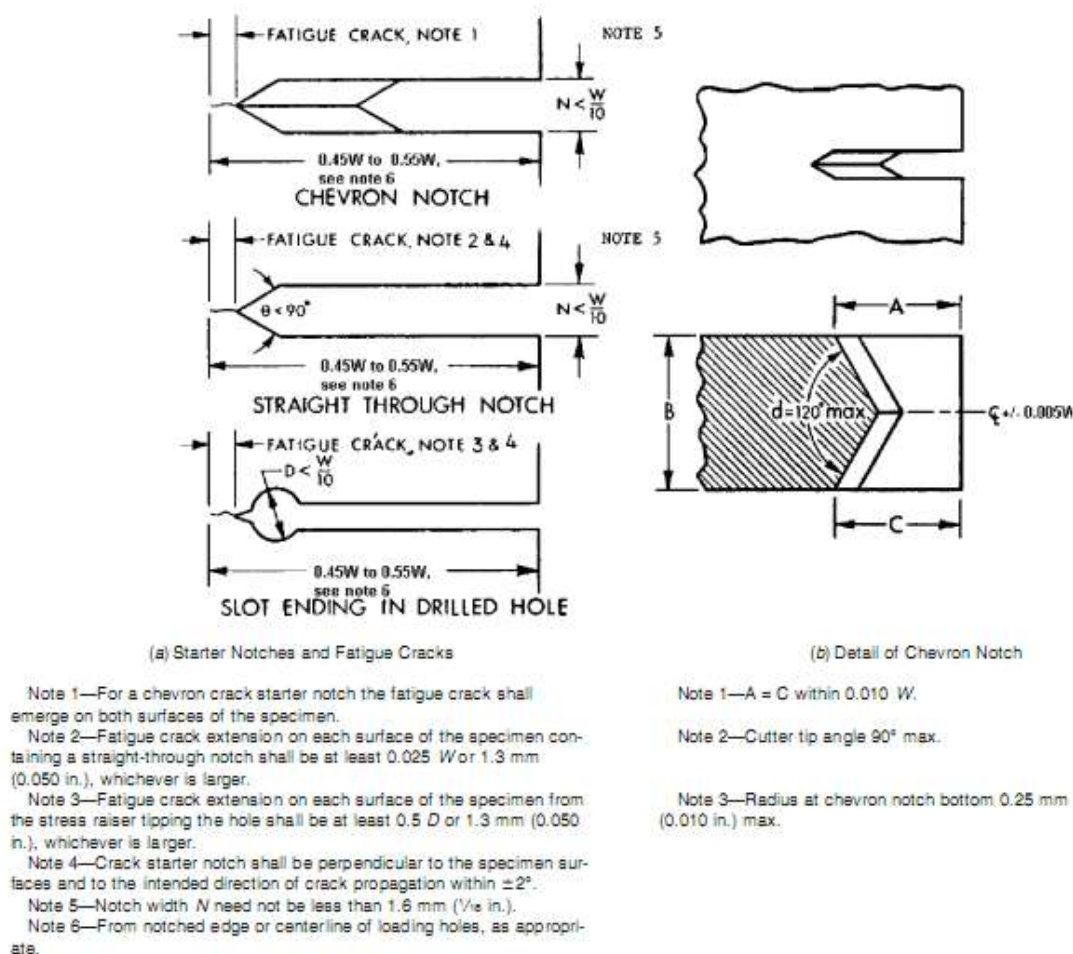


Figura 96 Entalhes e trincas de fadiga. (Norma astm e399)

Três configurações de trinca inicial por fadiga são mostradas na Figura 96. O tamanho da trinca é geralmente de 0,45 a 0,55 vezes a largura. Para facilitar a pré trinca a tensões de baixa intensidade, o raio da raiz sugerido para um entalhe direto é de 0,008 mm ou menos. Para a forma Chevron é de 0,25 mm ou menos e para a configuração buraco de fechadura, onde a ranhura termina num orifício perfurado, é necessário prover um concentrador de tensão acentuado no final do furo. A pré-trinca deve ser produzida por carregamento cíclico com razão de carga (r) entre -1.0 e 0.1, em um numero de ciclos (N) entre 10^4 e 10^6 ciclos, dependendo do tamanho do corpo de prova, do raio do entalhe e do nível de intensidade de tensão aplicado.

De acordo com a norma, o procedimento deve ser reproduzido no mínimo três vezes para cada condição do material, a largura e espessura da amostra devem ser medidas com aproximação de 0,03 milímetros ou 0,1%. O tamanho da trinca deverá ser medido em cada superfície, após a fratura com uma aproximação de 0,5%. Não deve haver evidências de trincas múltiplas. Para testes convencionais (quase estáticos), as amostras devem ser

carregadas de modo que a intensidade aumente de um fator entre 0,55 e 2,75 $\text{Mpa m}^{1/2}/\text{s}$ durante o deslocamento inicial elástico. No final do ensaio se obtêm um gráfico: carga versus deslocamento da trinca como mostra a Figura 97.

O registro do teste deverá ser feito pelos dados de saída do transdutor de força versus os dados de saída do extensômetro, mediante um sistema computacional que permite o armazenamento dos dados das forças empregadas ao corpo de prova e do deslocamento captado pelo extensômetro na trinca pelo método CMOD.

É necessário alinhar com cuidado dos corpos de prova para que as trincas obtidas sejam retas e a distribuição de tensões seja uniforme

As informações relacionadas ao ensaio que devem ser relatadas para cada amostra testada são:

- Caracterização do material;
- Forma do produto;
- Condições da pré-trinca de fadiga, fator de tensão máxima, a variação do fator de intensidade, e o número de ciclos para 2,5% do tamanho final da trinca;
- Medidas do tamanho da trinca após a fratura;
- Temperatura e umidade relativa;
- Medidas de força versus abertura da trinca e cálculos associados;
- Limite de escoamento do material (σ_E);
- Valor de K_{IC} .

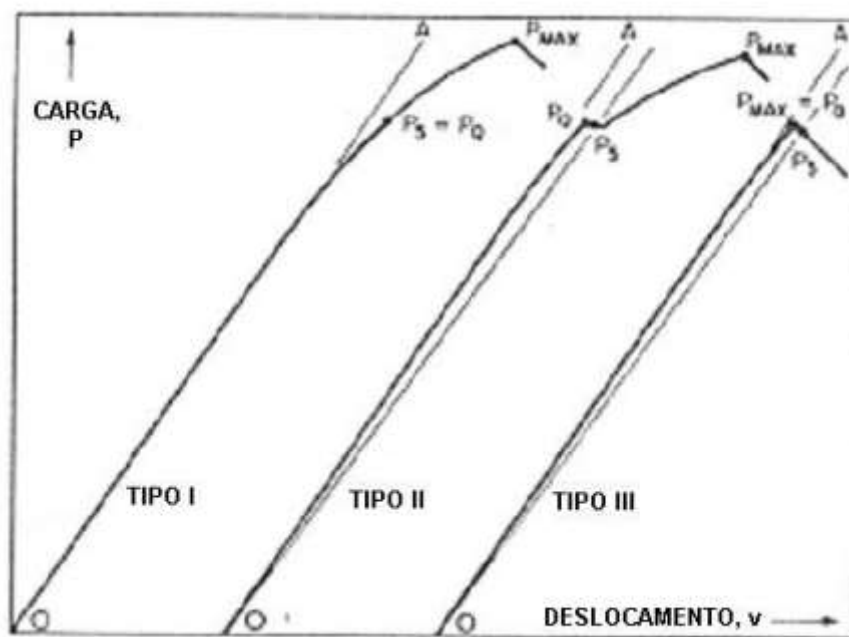


Figura 97 Curvas carga-deslocamento em um ensaio de tenacidade à fratura com carregamentos do tipo I, II e III. (Norma astm e399)

Percebe-se ao analisar a norma E-399, que a fabricação e o preparo do corpo de prova são bem complexos, já que a pré-trinca deve ser feita por fadiga, o que dificulta muito o ensaio. A propagação da trinca deve ser estável e dentro de um regime linear-elástico, o que é de difícil controle.

Como o ensaio será repetido no mínimo três vezes nas mesmas condições com os mesmos materiais, pode haver um custo muito grande na obtenção dos corpos de prova, os quais se tornarão inutilizáveis após o ensaio. É muito difícil também repetir exatamente as mesmas condições e garantir que os corpos de prova eram iguais, tornando baixa a confiabilidade nos resultados.

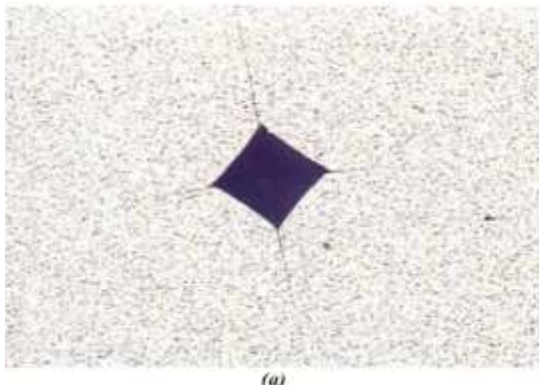
A Figura 98 mostra um corpo de prova sendo ensaiado.



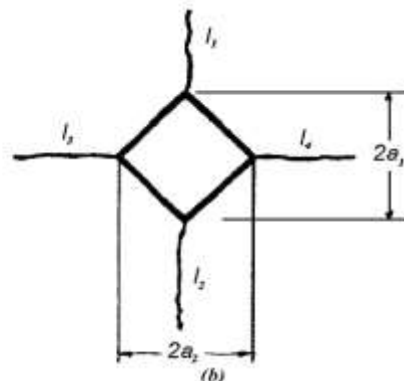
Figura 98 Corpo de prova sendo ensaiado.

5.6 Medição do K_{IC} através da dureza Vickers em materiais cerâmicos - ICL

A impressão Vickers em superfícies polidas é acompanhada pela formação de trincas em cada vértice da impressão, como mostra a Figura 99(a) e (b) primeiramente foi considerado que as trincas eram devido à medida de dureza. A primeira hipótese de que essas trincas pudessem dar uma indicação da tenacidade do material foi proposta por Palmqvist em 1957, enquanto trabalhava com cermets.



(a)



(b)

Figura 99 (a) mostrando as trincas nos vértices da impressão de dureza e (b) esquema das trincas.

A determinação da tenacidade à fratura, em materiais cerâmicos, pela medida do comprimento das trincas é largamente utilizada. Uma diversidade de trincas pode ser gerada nos materiais frágeis pelo contato com um indentador. Estudos revelam que existem 5 tipos principais de trincas, ilustrados na Figura 100.

Trinca Cônica (A): normalmente gerada por tensão elástica de indentadores esféricos ou pontiagudos. Ela se propaga da superfície para o interior com um ângulo característico em relação ao eixo de aplicação da carga, após a nucleação de uma trinca circular na periferia do contato;

Trinca Radial (B): é formada, em geral, pelo uso de indentadores agudos (como Vickers e Knoop) ou por carga excessiva de indentadores esféricos. Este perfil conduz a formação de uma zona elásto-plástico de onde se formam as trincas, paralelas ao eixo de aplicação de carga;

Trincas Medianas (C) : também se propagam paralelamente ao eixo de aplicação da carga e podem ser geradas abaixo da zona de deformação plástica, em forma de círculos ou segmentos circulares truncados pelo contorno da zona de deformação ou superfície do material;

Trincas Half-Penny (D): são trincas resultantes de indentadores Vickers. Durante o carregamento há a presença de uma componente elástica, responsável pelo crescimento da trinca e durante o descarregamento uma componente plástica responsável pela propagação superficial da trinca;

Trincas Laterais (E): são também geradas em baixo da zona de deformação. Correm paralelas à superfície ou muito próximas e tem formato circular.

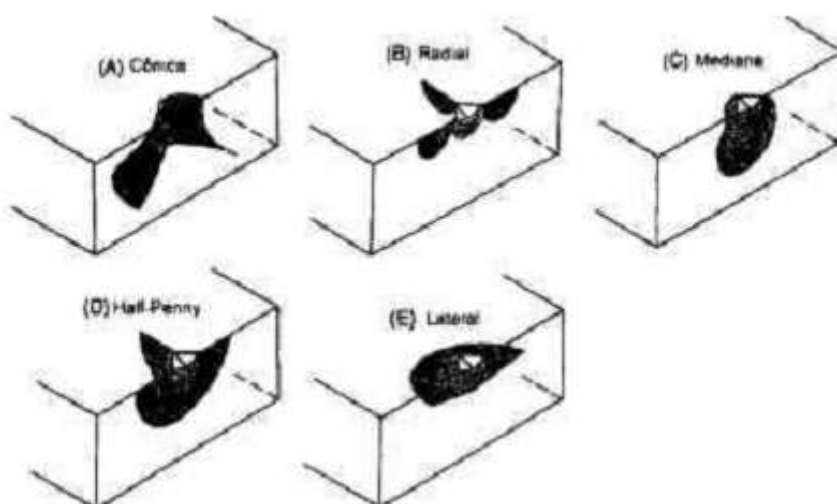


Figura 100 Diferentes tipos de trincas produzidas por endentação Vickers em materiais cerâmicos.

Quando se usa penetradores de contato agudo, como Vickers ou Knoop, o tipo de trinca formado pode ser: radial/mediana (ou half-penny) ou Radial

(Palmqvist), onde há a formação de um campo elasto/plástica que governa as propriedades do material.

As trincas produzidas por deformação elasto/plástica por impressão Vickers podem ser classificadas em dois sistemas principais: aqueles que se formam no plano mediano que contém o eixo de aplicação de carga e aqueles que se formam lateralmente em planos quase paralelos à superfície do material. No primeiro sistema estão as trincas do tipo radial/mediana e no segundo as trincas radiais (ou Palmqvist). A **Figura 101** apresenta a geometria das trincas formadas radial/mediana e Palmqvist formada por impressão Vickers.

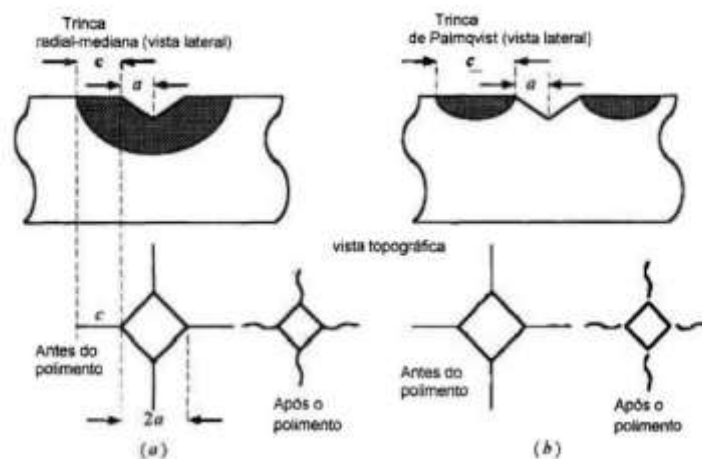


Figura 101 Vista lateral das trincas mediana e Palmqvist.

Obs. Nesta figura c faz referência a l a largura da trinca especificada nas equações da tabela 10.

Um grande número de equações para determinar a tenacidade à fratura de materiais frágeis através de impressão Vickers é proposto pela literatura como se mostra na Tabela 12.

Essa variedade dificulta a obtenção de valores confiáveis. Há uma divergência significativa nos resultados de tenacidade à fratura dependendo da escolha.

Tabela 12– Equações para calcular a tenacidade à fratura proposta por diferentes autores a partir de 1976.

Referência Bibliográfica	Equação Proposta de tenacidade à fratura (K_{IC}).
ANTIS <i>et al.</i> , 1981	$K_{IC} = 0,016(E/H)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}}$
CASSELAS <i>et al.</i> , 1997	$K_{IC} = 0,024(E/H)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}}$
NIIHARA, 1983 a e b.	$K_{IC} = 0,129 (c/a)^{3/2} (E\sigma/H)^{2/5} (Ha^{0.5}/\sigma)$ para $c/a \geq 2,5$
	$K_{IC} = 0,035(l/a)^{1/2} (E\sigma/H)^{2/5} a(Ha^{0.5}/\sigma)$ para $0,25 \leq l/a \leq 2,5$
Equação UNIVERSAL (EVANS CHARLES, 1976)	$K_{IC} = 0,0732 \left(\frac{E}{H} \right)^{0.4} Ha^{0.2} \left[\left(\frac{c}{a} \right)^{-1.5} \right]$

Onde:

K_{IC} = tenacidade à fratura do material (MPa $\sqrt{m}$);

P = carga aplicada (N);

E = módulo de elasticidade do material (GPa);

A = semi-diagonal da impressão Vickers (m);

l = comprimento da trinca (m);

c = l+ a (m);

H = dureza Vickers do material (Gpa)

A obtenção da tenacidade à fratura por impressão Vickers possui grandes vantagens, como: o uso de amostras de pequenas dimensões onde outros testes não seriam possíveis de serem realizados; a preparação é simples, sendo apenas necessária uma superfície plana e polida. A pirâmide de diamante para a impressão Vickers é a mesma usada para testes de dureza; a medida da trinca pode ser feita em microscópio óptico sem grandes dificuldades, além da rapidez e baixo custo.

Apesar dessas vantagens, existem várias desvantagens: a precisão com que a trinca é medida; todas as teorias propostas na literatura assumem que as trincas são formadas durante o ensaio de dureza, o que pode não ser verdadeiro para todos os materiais; a quantidade de equações propostas pela literatura e a discrepância de resultados obtidos a partir de impressões Vickers e por outros métodos convencionais.

6. Fadiga

Dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é devida à fadiga do material. Do número total de falhas, as provocadas por fadiga perfazem de 50% a 90%, sendo na maioria das vezes falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas.

O limite de resistência determinado pelo ensaio de tração é função da carga máxima atingida durante o teste, após a qual ocorre ruptura do material. Fica então estabelecido que o material não se rompa quando solicitado por carga menor que aquela máxima, quando submetido a esforços estáticos.

Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes em um material metálico, o mesmo pode se romper com uma carga bem inferior à carga máxima atingida na tração (ou na compressão). Nesse caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material.

A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões.

Um metal rompe-se por fadiga, quando a tensão cíclica, aplicada nele tem uma flutuação suficientemente grande e é maior que um valor característico de cada metal, denominado limite de fadiga, o qual pode ser determinado mediante ensaio. A ruptura geralmente ocorre quando o número de ciclos de tensão aplicada é também suficientemente grande. É de se notar, porém que nem todos os materiais metálicos apresentam um limite de fadiga definido.

A determinação do limite de fadiga é frequentemente realizada em corpos de prova usinados. Devemos, no entanto, observar que os resultados obtidos em laboratório, ensaiando-se corpos de prova usinados, não podem ser diretamente aplicados às condições na prática.

O número de ciclos de tensões suportados pelo corpo de prova até a fratura é designado por N . Esse número é contado na própria máquina de fadiga e representa a soma do número de ciclos para iniciar uma trinca de fadiga mais o número de ciclos para propagar a trinca através do material.

O limite de fadiga é definido como o valor limite da tensão, abaixo da qual o material pode suportar um número infinito de ciclos de tensões regulares sem romper. Geralmente, essas tensões são aplicadas pelas máquinas sob a forma de flexão rotativa, torção ou tração-compressão.

A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma função senoidal, onde os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são

representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta três tipos de ciclos de tensão.

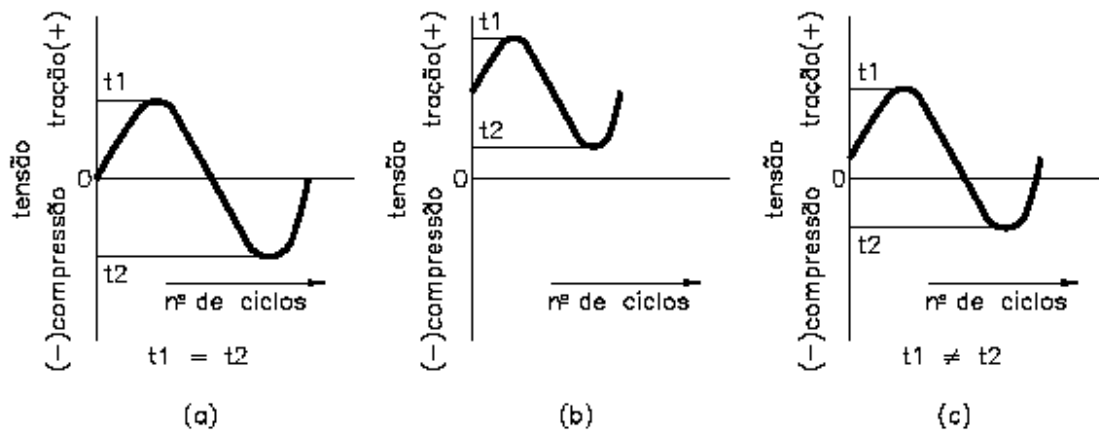


Figura 102 Ciclos regulares de tensão: (a) tensão reversa; (b) tensão repetida (campo de tração); (c) tensão repetida (campos de tração e compressão). [19]

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(a) mostra um gráfico de tensão reversa, assim chamado porque as tensões de tração têm valor igual às tensões de compressão.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b), todas as tensões são positivas, ou seja, o corpo de prova está sempre submetido a uma tensão de tração, que oscila entre um valor máximo e um mínimo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(c) representa tensões positivas e negativas, como no primeiro caso, só que as tensões de compressão têm valores diferentes das tensões de tração.

A característica principal desse tipo de falha é o surgimento de uma trinca que se propaga através da secção normal à sollicitação.

Essa trinca continua se propagando com a variação da carga, até que a área resistente à tração não seja mais suficiente para conter a fratura súbita. Devido à progressão da trinca, esse tipo de falha é chamado também de *fratura progressiva*.

Existem diferentes estágios de dano (deformação) por fadiga em componentes onde defeitos podem “nuclear” em uma seção inicial ileso e propagar de uma maneira estável até resultar em fraturas catastróficas. Para este tipo de situação, uma sequência de danos por fadiga pode ser dividida nos seguintes estágios:

- 1) Mudanças subestrutural e microestrutural que causam nucleação nos danos permanentes;
- 2) Criação de fissuras microscópicas;

- 3) O crescimento e a coalescência de defeitos microscópicos para formar fissuras “dominantes”, que podem eventualmente inclinar para uma falha catastrófica;
- 4) Propagação estável da microfissura dominante;
- 5) Instabilidade estrutural ou fratura completa.

Na grande maioria das vezes, não é possível prever o surgimento de trincas com exatidão. Elas podem surgir a partir de uma inclusão, ou de uma irregularidade superficial, ou ainda de uma falha na rede cristalina do material.

O tempo para o surgimento da trinca não pode ser facilmente estimado, já que a trinca só é acompanhada a partir do momento em que começa a se propagar. O tempo de ruptura também não é suficientemente longo para que possa ser computado na vida do elemento. O tempo de propagação da trinca é o período que se convencionou relacionar à vida sob carregamento variável.

6.1 Caracterização do processo de fadiga

Um exemplo de fadiga está mostrado na Figura 103, onde uma barra está submetida a um esforço de flexão alternado que pode apresentar pequenas trincas em lados opostos A e B. Com a continuidade do esforço alternado, as trincas aumentam, reduzindo a área resistente da seção.

A ruptura se dá quando esta área se torna suficientemente pequena para não mais resistir à sollicitação aplicada (C). A fratura por fadiga é facilmente identificável. A área de ruptura C tem um aspecto distinto da restante, que se forma gradualmente.

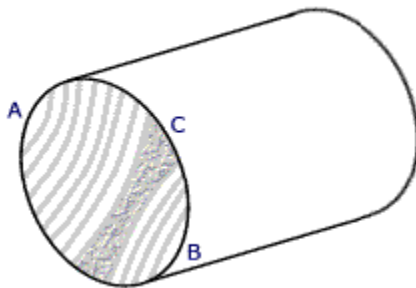


Figura 103 Uma barra submetida a esforço de flexão. [20]

A grande maioria das estruturas de engenharia está sujeita a cargas que são de um modo geral variáveis no tempo, embora muitas vezes o carregamento seja estático, em uma primeira observação. Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de 10^8 ciclos.

É evidente que o número de ciclos que o componente resiste depende do nível da sollicitação, pois com uma carga dinâmica maior tem-se uma vida baixa, sensivelmente reduzida quando comparada com uma situação onde a sollicitação cíclica é menor, o que leva a uma maior vida.

Várias são as situações práticas do número de ciclos esperados ao longo da vida do componente. Por exemplo, um reservatório pressurizado, usado para armazenar um fluido sob pressão, é um modelo de carregamento estático. Porém, quando o fluido é drenado, a pressão baixa ao valor atmosférico.

Com uma drenagem a cada dois meses, ao longo da vida útil do reservatório, usualmente de 10 a 20 anos, o número de ciclos de pressurização e despressurização serão de 60 a 120 ciclos. Este é, portanto, um problema de fadiga, embora com um pequeno número de ciclos esperados ao longo da vida.

Outro exemplo é uma mola de suspensão de automóvel. A vida de fadiga para uma mola de suspensão de um automóvel é considerada para projeto como sendo da ordem de $2 \cdot 10^5$ ciclos. Esta vida considera que a carga atuante seja a carga máxima esperada em serviço. Isto implica em aproximadamente 50 ciclos por dia para uma vida de 10 anos.

Em componentes estruturais formados por materiais isentos de defeitos, no caso de existirem pontos com elevado nível de tensões, nestes irá desenvolver-se o processo de nucleação de trincas de fadiga, que pode levar à falha. Para que o processo de nucleação inicie é necessário (ao menos para os materiais dúcteis) que ocorram deformações plásticas, quer sejam estas generalizadas, quer sejam confinadas a um pequeno volume de material.

Nas estruturas e máquinas bem projetadas, as tensões nominais devidas ao carregamento externo ficam dentro do regime elástico. No entanto, quer devido a descontinuidades geométricas, descontinuidades metalúrgicas ou ainda devido a sobrecargas quando em operação, o material não estará necessariamente respondendo, como um todo, de uma maneira elástica.

Assim, uma análise plástica no estudo de fadiga torna-se necessária, ao menos para regiões do material próximas aos pontos onde se tem concentração de tensão, pois nestes se desenvolve uma plastificação confinada, com o restante do material tendo ainda uma resposta elástica. Nestes pontos com escoamento localizado é que inicia o processo de nucleação das trincas de fadiga.

Em muitos casos a fissura, que leva à falha, não passa pelo período de nucleação, pois a peça possui trincas previamente existentes, na forma de defeitos oriundos do processo de fabricação, ou mesmo pelo uso do equipamento.

Os defeitos provenientes de processos como soldagem, fundição, forjamento, retífica, ou devidos a um tratamento térmico inadequado, muito severo, ou ainda devido a um ataque do meio ambiente agressivo, que leva a uma corrosão na superfície do material.

Observa-se que certos materiais resistem indeterminadamente às solicitações se estas forem inferiores a certo limite. Isto é, pode-se aplicar um

número infinito de solicitações e o material não atinge a fadiga. Nos metais, este limite de resistência à fadiga existe para solicitações com amplitude de 0,3 a 0,6 da resistência de ruptura.

6.2 Falha por fadiga

O processo de falha por fadiga é caracterizado por três etapas distintas: 1- iniciação da trinca, onde uma pequena trinca se forma em algum ponto de alta concentração de tensões; 2- propagação da trinca, durante a qual essa trinca avança, sendo incrementada a cada ciclo de tensões e 3- a falha final, que ocorre muito rapidamente, uma vez que a trinca alcança um tamanho crítico. As trincas associadas a falhas por fadiga geralmente se nucleiam ou iniciam na superfície ou em algum ponto onde existe algum concentrador de tensões.

Os sítios de nucleação de trincas incluem riscos superficiais, ângulos vivos, rasgos de chaveta, fios de roscas ou qualquer pequena descontinuidade na superfície. As cargas cíclicas podem produzir descontinuidades microscópicas na superfície que resultam em degraus de escorregamento de discordâncias, as quais também podem atuar como concentradores de tensões e portanto são sítios nucleadores de trincas.

A região de uma superfície de fratura que se formou durante a etapa de propagação de uma trinca pode ser caracterizada por dois tipos de marcas: marcas de praia e estrias. Essas duas marcas características indicam a posição da extremidade da trinca em um dado instante de tempo e aparecem como nervuras concêntricas que se expandem para longe dos sítios de iniciação das trincas, com frequência adquirem um padrão circular ou semi circular. As marcas de praia ou marcas de conchas possuem dimensões macroscópicas e podem ser observadas a olho nu, como na Figura 104.

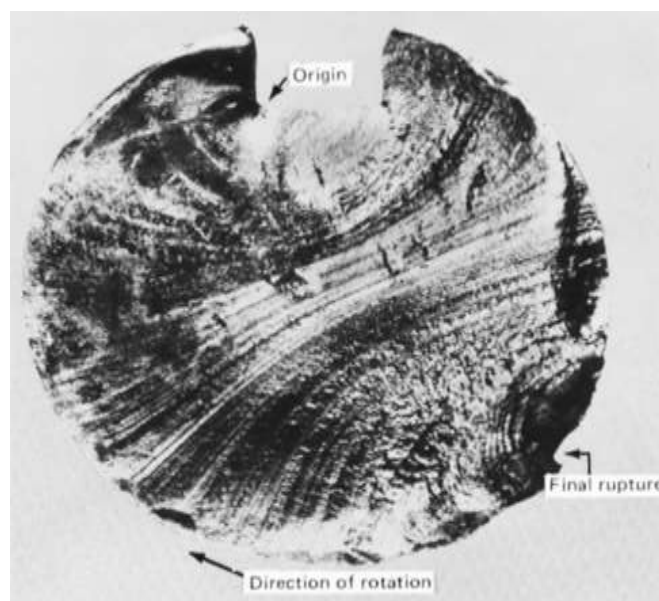


Figura 104 Superfície de fratura de um eixo rotativo de aço que sofreu falha por fadiga. As nervuras de marcas de praia são visíveis na fotografia. [1]

Já as estrias de fadiga apresentam dimensões microscópicas, e somente são sujeitas a observação através de microscopia eletrônica como mostra a Figura 105. Cada estria é considerada como representando a distancia de avanço de uma frente de trinca durante cada ciclo de aplicação da carga. A largura das estrias depende, e aumenta em função do aumento do intervalo de tensões.



Figura 105 Fractografia eletrônica por transmissão mostrando estrias de fadiga no alumínio. [1]

A presença de marcas de praia e estrias em uma superfície de fratura confirma que a causa da falha foi fadiga. As marcas de praia e estrias não irão aparecer na região onde houve propagação catastrófica da trinca, como demonstra a Figura 106.

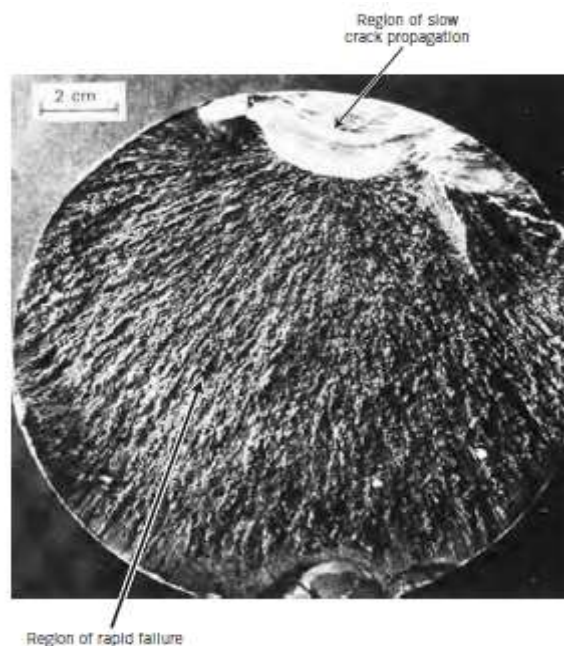


Figura 106 Superfície de falha por fadiga. Uma trinca se formou na borda superior e propagou lentamente. A rápida propagação da trinca ocorreu na região fibrosa. [1]

6.3 Características do ensaio de fadiga

O ensaio é realizado de diversas maneiras, de acordo com o tipo de solicitação que se deseja aplicar: torção, tração-compressão, flexão e flexão rotativa.

O ensaio mais usual, realizado em corpos de prova extraídos de barras ou perfis metálicos, é o de flexão rotativa. Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto o mesmo é girado em torno de um eixo, por um sistema motriz com conta giros, numa rotação determinada e constante, conforme esquematizado na Figura 107.

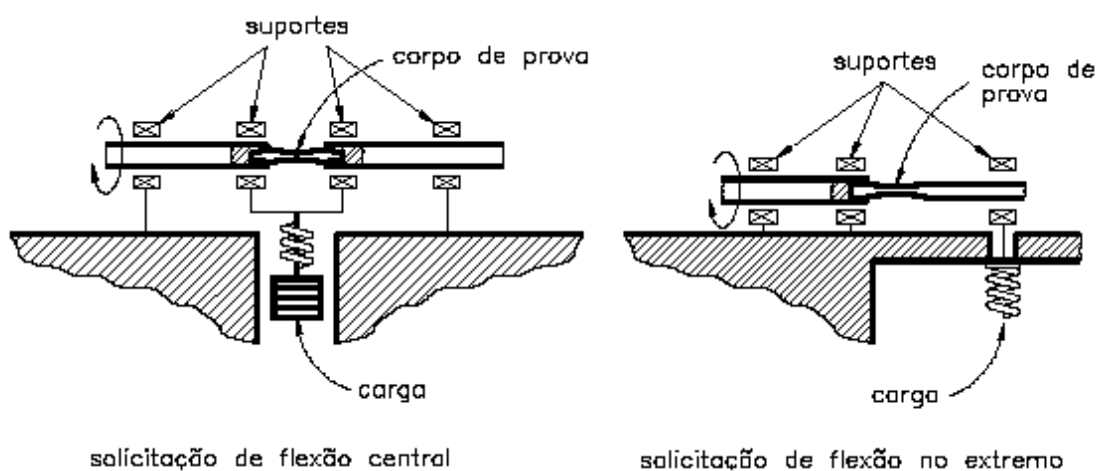


Figura 107 Ensaio por flexão rotativa: (a) Solicitação de flexão central e (b) solicitação de flexão externa.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados com três espécies diferentes de corpos de prova. 1) a própria peça ou um modelo ou protótipo podem ser usados como corpos de prova para determinar a vida da peça a uma determinada tensão ou a um determinado número de ciclos, desde que se possua uma máquina apropriada; 2) produtos acabados tais como barras, chapas, tubos, arames, etc., que podem ser colocados diretamente em máquinas apropriadas, são usados como corpos de prova; 3) corpos de prova usinados para ensaios. Esses corpos de prova podem ser planos (lisos) ou com entalhe. Para o estudo prático da fadiga, as duas primeiras espécies são preferíveis, porque reproduzem as condições da prática, mas exigem máquinas mais caras e quase específicas para cada tipo de peça.

A forma do corpo de prova plano varia muito de acordo com o tipo de solicitação e com as diversas normas propostas para o ensaio de fadiga. Em geral, os corpos de prova são de secção circular ou retangular, dependendo do produto, tendo na parte útil uma biconicidade ao longo do seu comprimento, com um raio grande e contínuo, ficando o centro dessa parte útil com uma

dimensão mínima (diâmetro ou os lados do retângulo). O grande raio usado evita a concentração de tensões pela ausência de mudança brusca de secção. A tensão aplicada ao corpo de prova deve ser calculada pela dimensão mínima. Também podem ser usinados corpos de prova igualmente já normalizados, que não possuam conicidade, ficando a parte útil paralela com o ensaio de tração. A Figura 108 mostra os diferentes tipos de corpos de prova.

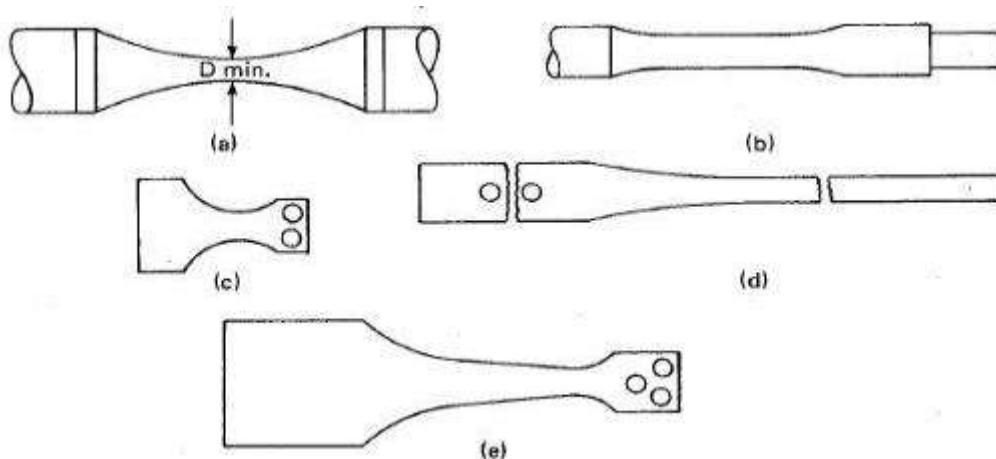


Figura 108 Desenhos esquemáticos de alguns tipos de corpos de prova: (a) para ensaio de fadiga por flexão rotativa ou qualquer outro carregamento axial; (b) tipo paralelo, para flexão rotativa; (c) retirado de lâminas; (d) retirado de chapas finas; (e) retirado de chapas grossas. O esquema (b) também serve para fadiga por torção e os esquemas (c), (d), e (e) podem ser usados para fadiga por tração-compressão. [11]

A parte útil do corpo de prova deve ter um acabamento na superfície perfeito com polimento do tipo espelhado. Em geral, os métodos para ensaio de fadiga existente nas normas técnicas indicam como deve ser feita a preparação do corpo de prova.

Pequenas variações nas dimensões dos corpos de prova quase não alteram os resultados dos ensaio, não importando o tipo de sollicitação. Entretanto caso a variação do diâmetro dos corpos de prova seja muito grande ocorre variação nos resultados para aço carbono, como mostra a Tabela 13. O mesmo acontece para outros aços, ferros fundidos, aços ligas, todos com variados tratamentos térmicos.

Tabela 13 Limite de fadiga de um aço-carbono normalizado (0,45% C) ensaiado por flexão rotativa.

Diâmetro do corpo de prova (mm)	S_e (N/mm ²)
7,62	247,13
38,10	199,07
152,40	144,16

Em corpos de prova com entalhes, havendo mudança brusca da secção transversal tem grande significado no ensaio, devido à modificação do gradiente de tensões no entalhe.

6.4 Curva: tensão x número de ciclos (Curva S x N)

A curva tensão x número de ciclos, também chamada curva de Wöhler ou simplesmente curva S-N mostrada na Figura 109, é o modo mais rápido para a apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga. Nessa curva, o número N (ou log N) é colocado no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas vai à tensão máxima $S_{\max}$, que também pode vir expressa por meio de logaritmo.

Assim, há três modos de construir o diagrama da curva S-N variando as escalas dos eixos cartesianos, a saber, S x N, S x log N (Figura 110) e log S x log N. A escala logarítmica facilita a comparação de dados, pois fornece curvas de diversos materiais com a mesma forma, além de facilitar e diminuir a escala de N.

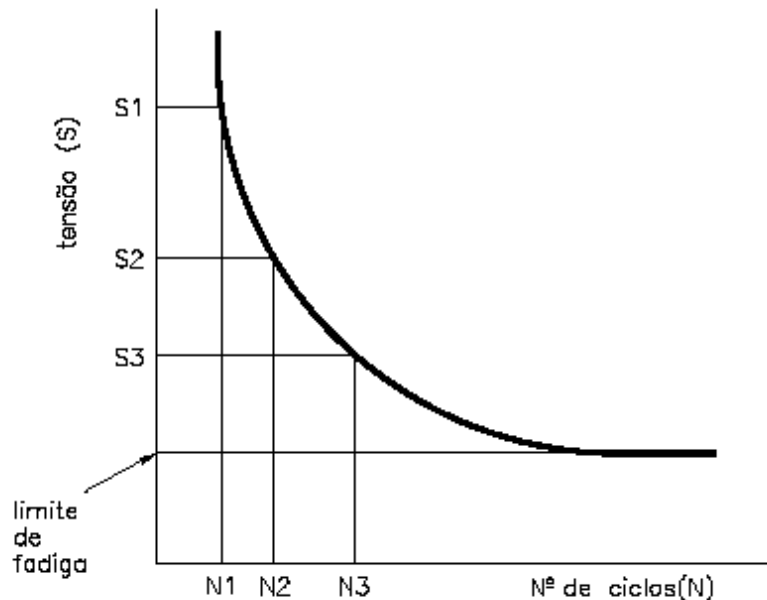


Figura 109 Curva S x N.

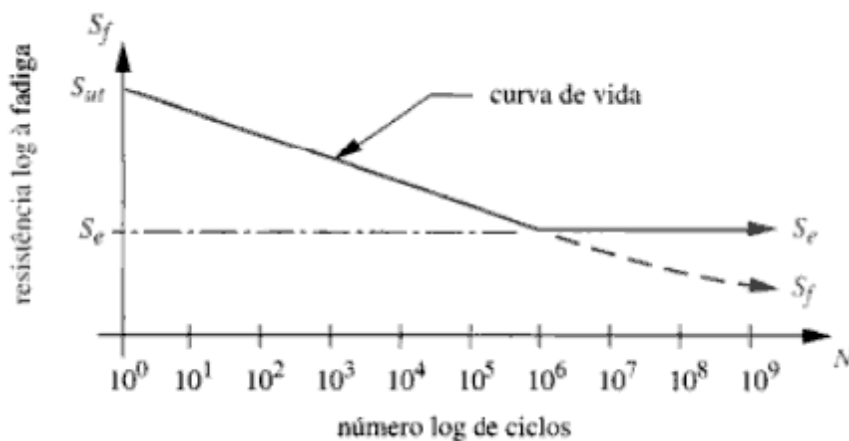


Figura 110 Diagrama $S \times \log N$. (não encontrei)

Geralmente, as tensões aplicadas pelas máquinas mais encontradas na prática são do tipo flexão rotativa, torção ou tração-compressão. Além disso, todas as máquinas de fadiga interrompem o seu funcionamento no mesmo instante em que ocorre a ruptura do corpo de prova.

Verifica-se que para aços, a curva apresenta um patamar que corresponde justamente ao limite de fadiga do material, mas as ligas não-ferrosas em geral, como, por exemplo uma liga de alumínio, não apresentam esse patamar.

Para o caso de existir o patamar, constata-se que basta ensaiar o corpo de prova até 10 milhões de ciclos de tensão e se até esse número não houver ruptura, a tensão correspondente será o limite de fadiga. Para o caso do metal não apresentar esse patamar, deve-se levar o ensaio até 50 milhões ou até mesmo em certos casos até 500 milhões de ciclos, dependendo do material, fixando-se a tensão correspondente a esse valor de N ensaiado, como o limite de fadiga desse material (ou mais precisamente, como a sua resistência à fadiga).

Como uma ruptura por fadiga depende de inúmeros fatores e para se traçar um diagrama $S-N$ é necessário uma quantidade muito grande de corpos de prova, a curva $S-N$ deve ser traçada como uma faixa que englobe todos os pontos espalhados.

Inicialmente, escolhe-se uma tensão aproximadamente igual a $2/3$ do limite de resistência do material à tração. Diminui-se gradativamente a tensão máxima, usando de preferência a mesma rotação, até atingir uma tensão para a qual não ocorra ruptura. A partir daí aumenta-se lentamente a tensão máxima até conseguir a máxima tensão correspondente ao patamar, que será o limite de fadiga do material.

6.5 Efeito da velocidade de ensaio

Verificam-se por diversos autores nas mais variadas experiências, que a velocidade do ensaio (em ciclos por unidade de tempo) não tem grande influência na resistência à fadiga dos aços para o mesmo tipo de solicitação, quando se empregam frequências usuais comuns de laboratório (até 10^4 ciclos por minuto) com frequências mais altas, acontece um pequeno aumento no limite de fadiga.

6.6 Efeito do meio ambiente

A influência da atmosfera na ruptura por fadiga é considerável, geralmente provocando grande redução no limite de fadiga do material. A ação corrosiva superposta à tensão cíclica ocasiona uma redução pronunciada nas propriedades de fadiga dos metais que é maior que a causada pela corrosão isoladamente.

Essa redução é devida ao fato de que o ataque químico acelera a velocidade de propagação da trinca de fadiga e a tensão cíclica acelera a corrosão no metal. Podemos dizer que a trinca se forma quando os pits de corrosão chegam a produzir uma alta concentração localizada de tensões no metal e a sua propagação é rápida.

Os resultados dos ensaios efetuados em ambientes corrosivos, ao contrário dos ensaios ao ar, dependem bastante da velocidade do ensaio, sendo que quanto mais alta for essa velocidade, menor será a redução do limite de fadiga devido à corrosão.

6.7 Efeito da variação da tensão máxima

Verifica-se que no ensaio de fadiga a tensão máxima ou amplitude de tensões permanece constante. Quando essa tensão é alterada subitamente ou por etapas no decorrer do teste, verificam-se alterações no comportamento do metal quanto à fadiga. Estas alterações são conhecidas por sobretensão e subtensão (overstress e understress).

6.7.1 Sobretensão

Se um corpo de prova for ensaiado com uma tensão, S_1 (máxima), superior ao seu limite de fadiga, S_e , durante um número de ciclos, N_1 , menor que o necessário para rompê-lo, indicado pela sua curva S-N, e depois essa tensão for abaixada a um valor S_2 inferior, porém maior ainda que S_e , ele se romperá após atingir um número de ciclos, N_2 , menor que o previsto pela curva S-N.

Conforme experiências feitas por diversos autores, quanto maior a queda de S_1 para S_2 , maior será a porcentagem do decréscimo da vida do corpo de prova. No caso inverso, se no lugar de decréscimo de tensão for feito um aumento, isto é, $S_2 > S_1 > S_e$, a porcentagem de decréscimo da vida do corpo de prova será menor.

6.7.2 Subtensão

A subtensão é aquela onde, o material é ensaiado a uma tensão abaixo do seu limite de fadiga durante um longo número de ciclos e depois a tensão é elevada a um valor mais alto (maior que S_e). A subtensão frequentemente aumenta a resistência à fadiga do material, isto é, ele romperá com um número de ciclos maior que o indicado pela curva S - N do material.

Esse fenômeno é provavelmente causado pelo encruamento localizado nos lugares de possível nucleação de trincas.

6.8 Método estatístico para o cálculo do limite de fadiga – método escada

É perceptível que para a determinação específica e precisa do limite de fadiga, é um trabalho de custo elevado em função do número de horas de máquina necessário para obter os enésimos ciclos até a ruptura por fadiga dos

materiais submetidos ao ensaio de fadiga. Além do que o método tradicional conduz à grande espalhamento e que esse limite é uma quantidade estatística que exige uma técnica especial.

A fim de simplificar a obtenção da tensão limite de fadiga, foi desenvolvido um método estatístico mais simples e barato que, despreza o lado esquerdo da curva S – N (vida finita), porém utiliza um número pequeno de amostras durante os ensaios de Fadiga. Este método é conhecido como escada e não requer um número muito grande de corpos de prova. Normalmente o número de corpos de prova a ser ensaiado é da ordem de 25 espécimes (vinte e cinco).

O método consiste em se ensaiar um corpo de prova a um valor da tensão próximo do valor estimado do limite de fadiga para economia de tempo. Este valor estimado depende dos critérios adotados pelo projetista mecânico que estará dando um “valor inicial” que deve ser o mais próximo possível da tensão limite de fadiga.

Um corpo de prova é ensaiado à fadiga, onde o número de ciclos utilizados é da ordem de 10^7 e a carga utilizada é aquela definida anteriormente através da “previvão” do projetista. Caso o corpo de prova venha a se romper antes do número de ciclos definido, o ensaio é finalizado e um novo corpo de prova será ensaiado nas mesmas condições sendo que a carga agora deverá ser diminuída de um valor chamado “degrau”. Este degrau será definido novamente por critérios adotados pelo projetista.

Verifica-se novamente se o corpo de prova resiste ou não até a finalização do número de ciclos. Em caso negativo, a carga será novamente decrescida de um valor igual ao degrau definido pelo projetista, para ser aplicada no próximo corpo de prova a ser ensaiado. Em caso positivo, ou seja, se o corpo de prova resistir à carga aplicada durante o número de ciclos (10^7) então, o próximo corpo de prova será ensaiado nas mesmas condições, porém a carga agora sofrerá um acréscimo igual ao valor do degrau.

O ensaio prosseguirá conforme o procedimento descrito anteriormente, ou seja, quando o corpo de prova resiste à carga aplicada durante os 10^7 ciclos, haverá um incremento no valor desta carga de um valor igual ao degrau para o ensaio do próximo corpo de prova. Em caso contrário, se o corpo de prova não suportar a carga e romper-se antes dos 10^7 , o próximo corpo de prova será ensaiado a uma carga decrescida do valor do degrau.

Ao final ter-se-á uma quantidade de corpos de prova rompidos às determinadas cargas e outros não rompidos a outras determinadas cargas. A partir de então os resultados serão submetidos a um tratamento estatístico a fim de obter-se a tensão média limite de fadiga. A seguir, é apresentado um exemplo do procedimento relativo ao método escada onde é possível verificar o tratamento de dados proposto para a obtenção da tensão requerida.

No caso ilustrado a seguir, tem-se 18 corpos de prova de aço e deseja-se obter a Tensão Média Limite de Fadiga. Os corpos de prova são ensaiados então conforme descrito anteriormente, em uma máquina de fadiga sendo que o número de ciclos é constante e igual a 10^7 e neste caso a tensão de fadiga inicial definida pelo projetista é 340 N/mm^2 . O degrau a ser utilizado para elevar ou decrescer a tensão no próximo ensaio, também definido pelo projetista é de 10 N/mm^2 . A Figura 111 mostra o desempenho dos corpos de prova durante o ensaio de fadiga.

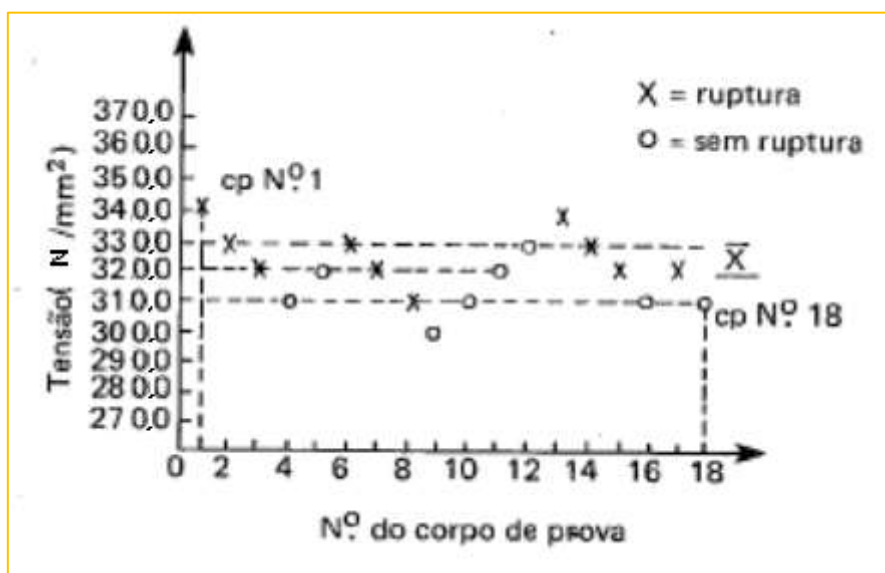


Figura 111 Desempenho dos corpos de prova durante o ensaio de fadiga (In: Souza, 1982) [11].

Observando-se a Figura 111 percebe-se o desempenho dos corpos de prova durante o ensaio de fadiga e nota-se que aqueles que não resistiram ao patamar de carga até o final dos ciclos, são indicados pela letra "X" e os que resistiram são indicados pelo símbolo "O".

Analisando o corpo de prova 1, percebe-se que o mesmo rompeu com o patamar de carga de 340 N/mm^2 antes de se completarem 10^7 ciclos. Assim, o corpo de prova 2 foi ensaiado em um patamar de carga decrescido de 10 N/mm^2 , o qual também se rompeu antes da finalização do número de ciclos. Verifica-se o mesmo comportamento para o corpo de prova 3.

O corpo de prova 4 não se rompeu ao final da ciclagem; assim, para o corpo de prova 5, a carga foi elevada de 10 N/mm^2 . O restante dos corpos de prova é submetido ao mesmo procedimento e ao final tem-se o comportamento indicado na Figura 111.

A partir daí tem-se o tratamento estatístico dos resultados obtidos no ensaio, o que é mostrado na Tabela 14; este é realizado ora com os resultados do conjunto de corpos de prova rompidos, ora com o de corpos de prova não rompidos, sendo que se inicia pelo conjunto que tem o menor número de eventos.

Tabela 14 Tratamento de Dados dos Corpos de Prova.

Tensão (N /mm ²)	<i>i</i>	<i>n_i</i> (sem ruptura)	<i>in_i</i>	<i>i</i> ² <i>n_i</i>
330.0	3	1	3	9
320.0	2	2	4	8
310.0	1	4	4	4
300.0	0	1	0	0
Total	—	<i>N</i> = 8	<i>A</i> = 11	<i>B</i> = 21

A tabela foi montada com os dados obtidos do conjunto de corpos de prova que apresentam menor número de eventos, neste caso, os corpos de prova não rompidos. Nesta tabela, “*i*=0” significa a menor tensão ensaiada onde não ocorreu ruptura (300N/mm²); o valor seguinte onde não ocorreu ruptura é “*i*=1”, ou seja, 310N/mm² e assim por diante.

Na coluna seguinte têm-se os valores de *n_i* que significa o número de corpos de prova que não se romperam nos referidos níveis de tensão; *in_i* significa a multiplicação entre os valores da primeira e segunda coluna e *i*² *n_i* significa a multiplicação entre os valores da primeira coluna elevados à segunda potência e os valores da segunda coluna.

As letras *N*, *A* e *B* representam a somatória dos valores das respectivas colunas e são utilizadas nas expressões indicadas a seguir, a fim de obter-se a Tensão Limite Média de Fadiga e o seu respectivo desvio padrão, como demonstra a Equação 99 e Equação 100.

$$\bar{S}_e = S_e + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right);$$

Equação 99

$$\delta = 1,620d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right)$$

Equação 100

Nas expressões anteriores, o valor *d* representa o incremento fixo crescente ou decrescente da escada ou degrau e neste caso é igual a 10N/mm². Na primeira expressão, *S_e* é o valor da tensão para *i*=0, isto é, o degrau inferior da escada, no caso igual a 300N/mm². Também nesta expressão tem-se que o sinal “+” é usado quando se consideram os corpos de prova não rompidos e, portanto, o sinal “-” é utilizado para a análise quando se consideram os corpos de prova rompidos.

No entanto, antes da resolução das expressões anteriores é necessário verificar-se a consistência dos dados utilizados. Para validar os dados utiliza-se a parcela da expressão do desvio padrão indicada na equação 101, onde os dados utilizados serão válidos (o número de corpos de prova do conjunto utilizado é representativo) para obter-se a tensão média limite de fadiga. Portanto, para efetuarem-se os cálculos da tensão é do desvio a padrão, o valor da expressão da equação 101 deve ser maior do que 0,3.

$$\frac{NB - A^2}{N^2} > 0,3$$

Equação 101

Caso a parcela seja inferior a 0,3 tem-se que o conjunto de dados não é suficiente para obter-se a tensão limite média de fadiga. Deve-se então lançar mão do outro conjunto de dados, neste caso, os corpos de prova rompidos. O procedimento será idêntico, construindo-se uma nova tabela e o teste da parcela será repetido.

Caso, o valor da parcela continue menor do 0,3 tem-se que é necessário continuar o ensaio de fadiga, aumentando o número de corpos de prova até que a parcela venha a tornar-se maior do que 0,3.

No presente caso, utilizando-se os corpos de prova não rompidos, obteve-se os seguintes valores para Tensão Média Limite de Fadiga e o seu respectivo desvio padrão. Assim o resultado fica:

$$\begin{aligned} \bar{S}_r &= 30,00 + 1 \left(\frac{11}{8} + \frac{1}{2} \right) = 318,7 \text{ N/mm}^2 \\ \delta &= (1,620 \times 1) \left(\frac{8 \times 21 - 11^2}{8^2} + 0,029 \right) = 1236 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Equação 102

6.9 Propagação da trinca em fadiga

Numerosos esforços têm sido realizados para determinar a fenomenologia da propagação e crescimento de trincas. Relações confiáveis que determinam a propagação das trincas permite a implementação de uma filosofia de falha segura, reconhecendo a impossibilidade da engenharia de construir estruturas isentas de falha. Assim é possível determinar um carregamento e tamanho de trinca em que não ocorrerá falha e propor uma estimativa conservadora de vida em serviço.

O crescimento de trinca pode ser plotado num gráfico de taxa de crescimento da trinca (da/dN) por intervalo de intensidade de estresse aplicado (ΔK) como demonstra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

O intervalo de intensidade de estresse aplicado é definido pelas Equação 103 e Equação 104.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

Equação 103

$$\Delta K = \sigma_{max}\sqrt{\pi a} - \sigma_{min}\sqrt{\pi a} = \sigma_r\sqrt{\pi a}$$

Equação 104

Quando a tensão aplicada for de compressão, Kmin é zero.

A relação entre taxa de crescimento da trinca por fadiga e ΔK é mostrada na figura X. A curva é dividida em três regiões. A região um é delimitada até onde não é observado qualquer crescimento de trinca por fadiga. (a taxa de crescimento fica abaixo de 2.5×10^{-10} m/ciclo)

A região dois é representada pela relação linear entre da/dN e ΔK , dada pela Equação 105.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^p$$

Equação 105

A equação acima é conhecida como lei de Paris, onde o parâmetro A corresponde a extensão da reta e o parâmetro p é a inclinação da curva. O parâmetro p tem um valor em torno de três para aços e três até quatro para ligas de alumínio.

A região três corresponde à região onde ocorre a aceleração do crescimento da trinca, onde K_{max} se aproxima de K_{IC} e a fratura ocorre no material.

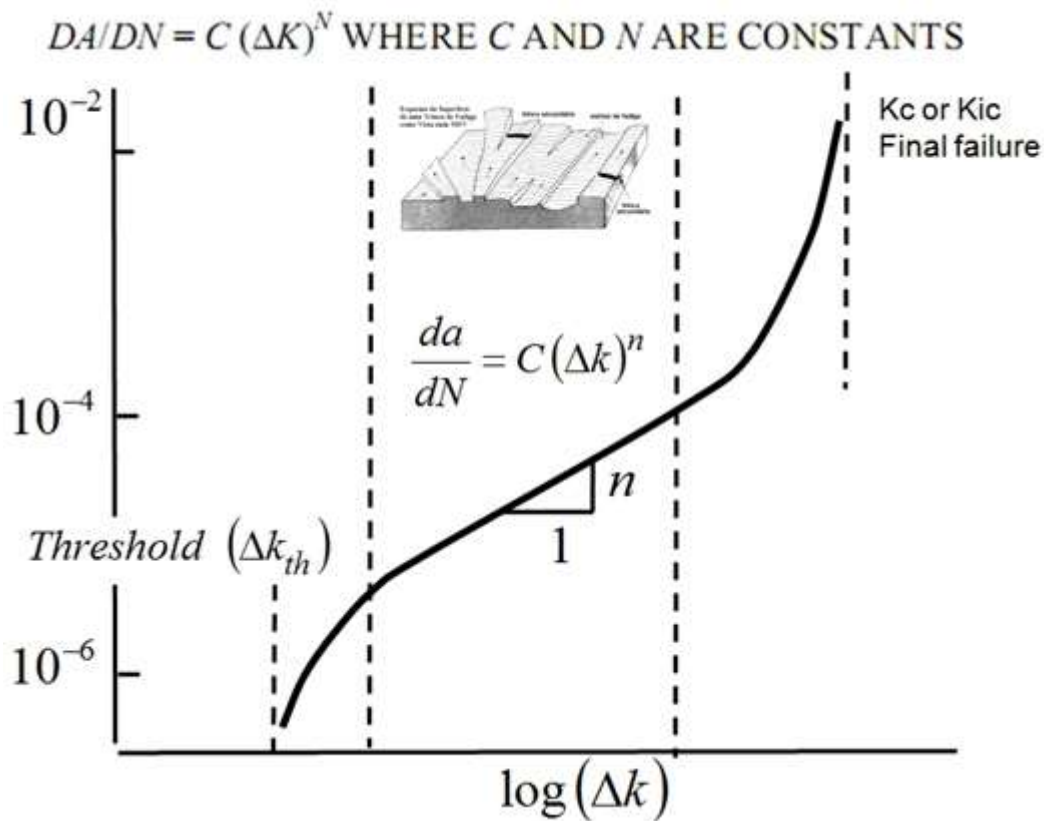


Figura 112 Esquema representando o comportamento do crescimento de trinca em fadiga [21]

Aumentando as tensões médias dos ciclos de fadiga, ocorre uma tendência de aumento das taxas de crescimento das trincas, assim com o aumento da tensão média, a equação de Paris fica:

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K)^p}{(1-R)K_c - \Delta K}$$

Equação 106

Onde: $R = (\sigma_{min}/\sigma_{max} = K_{min}/K_{max})$, K_c = resistência à fratura.

Quando os ciclos de tensão e compressão são simétricos, ou seja, com a mesma tensão aplicada, $R=-1$.

Quando os testes são realizados em tração alternante, então $r=0$.

Integrando a equação de Paris, obtém-se uma equação que relaciona o componente e suas peculiaridades em serviço com o número de ciclos até a ruptura, demonstrado na **Equação 107**.

$$Nf = \frac{a_f^{-(p/2)+1} - a_i^{-(p/2)+1}}{(-(p/2) + 1)A\sigma_r^p \pi^{p/2} \alpha^p}$$

Equação 107

Onde: para aços ferríticos e perlíticos $\alpha=1,12$

A_f : comprimento final da trinca; A_i : comprimento inicial da trinca.

6.10 Exemplo de projeto

Especificação de material para um tanque esférico pressurizado.

Considere um tanque esférico com paredes finas de raio r e espessura t que pode ser usado como um vaso de pressão, conforme ilustra a Figura 113.

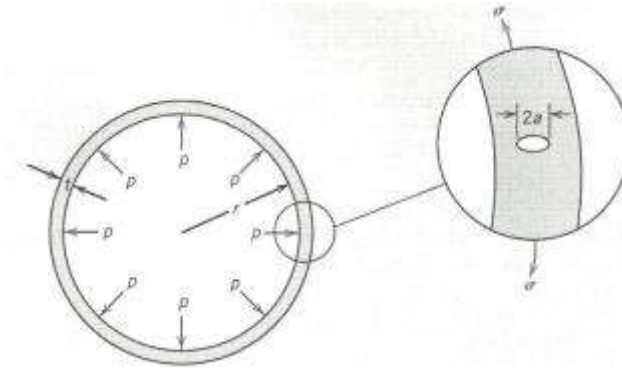


Figura 113 Seção transversal de um tanque esférico que está submetido a uma pressão interna p e que possui uma trinca radial com comprimento de $2a$ em sua parede.

- 1) Um projeto para esse tanque exige que haja escoamento do material da parede antes de ocorrer uma falha decorrente da formação de uma trinca com tamanho crítico e da sua subsequente propagação rápida. Dessa forma, a distorção plástica da parede poderá ser observada e a pressão no interior do tanque poderá ser liberada antes de ocorrer falha catastrófica. Consequentemente são desejáveis materiais que possuam grandes comprimentos críticos de trinca. Com base nesse critério, vamos classificar as ligas metálicas listadas da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** em função do seu tamanho crítico de trinca, do maior comprimento para o menor.

Tabela 15 Valores de tenacidade à fratura em deformação plana.

Valores da Tenacidade à Fratura em Deformação Plana e da Resistência à Temperatura Ambiente para Vários Materiais de Engenharia			
Material	Tenacidade à Fratura		Resistência* (MPa)
	MPa√m	ksi√in	
METAIS E LIGAS METÁLICAS			
Aços-carbono e Aços de Baixa Liga			
Liga de aço 1040	54,0	49,0	260
Liga de aço 4140			
• Revenida a 370°C	55–65	50–59	1375–1585
• Revenida a 482°C	75–93	68,3–84,6	1100–1200
Liga de aço 4340			
• Revenida a 260°C	50,0	45,8	1640
• Revenida a 425°C	87,4	80,0	1420
Aços Inoxidáveis			
Liga inoxidável 17-7PH			
• Endurecida por precipitação a 510°C	76	69	1310
Ligas de Alumínio			
Liga 2024-T3	44	40	345
Liga 7075-T651	24	22	495
Ligas de Magnésio			
Liga AZ31B			
• Extrudada	28,0	25,5	200
Ligas de Titânio			
Liga Ti-5Al-2,5Sn			
• Resfriada a ar	71,4	65,0	876
Liga Ti-6Al-4V			
• Grãos equiaxiais	44–66	40–60	910

2) Uma alternativa de projeto que também é usado com frequência para vasos de pressão é denominada “vazar antes de quebrar”. Usando princípios da mecânica da fratura, é permitido o crescimento de uma trinca através da espessura da parede do vaso antes que ocorra propagação rápida da trinca. Dessa forma, a trinca irá penetrar completamente a parede sem causar uma falha catastrófica, permitindo sua detecção pelo vazamento do fluido que está pressurizado. Com esse critério, o comprimento crítico da trinca A_c (metade do comprimento total de uma trinca interna) é tomado como sendo igual à espessura do vaso de pressão t . A utilização de $A_c=t$, em vez de $a_c=t/2$, assegura que o vazamento do fluido irá ocorrer antes que haja acúmulo de pressões perigosamente altas. Usando esse critério, classifique as ligas metálicas da tabela, em função da pressão máxima admissível.

Para esse vaso de pressão esférico, a tensão circunferencial na parede σ é função da pressão no vaso p , do raio r e da espessura da parede t , de acordo com a **Equação 108**.

$$\sigma = \frac{pr}{2t}$$

Equação 108

Para o primeiro critério, deseja-se que a tensão circunferencial na parede seja inferior ao limite de escoamento do material. A substituição de σ

por σ na equação $K_{IC} = Y \sigma (\pi a)^{1/2}$ e a incorporação de um fator de segurança N levam à **Equação 109**

$$K_{IC} = Y \left(\frac{\sigma_l}{N} \right) \sqrt{\pi a_c}$$

Equação 109

Onde a_c é o comprimento crítico da trinca. Resolvendo a equação para a_c , a seguinte expressão é obtida:

$$a_c = \frac{N^2}{Y^2 \pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_l} \right)^2$$

Equação 110

Portanto, o comprimento crítico da trinca é proporcional ao quadrado da razão (K_{IC}/σ_l) que se torna a base para a classificação das ligas metálicas na Tabela 16.

Tabela 16 Classificação de ligas metálicas em relação ao comprimento crítico de trinca.

Classificação de Várias Ligas Metálicas em Relação ao Comprimento Crítico da Trinca (Critério de Escoamento) para um Vaso de Pressão Esférico com Paredes Finas	
Material	$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_l} \right)^2 (mm)$
Aço com médio teor de carbono (1040)	43,1
Magnésio AZ31B	19,6
Alumínio 2024 (T3)	16,3
Titânio Ti-5Al-2,5Sn	6,6
Aço 4140 (revenido a 482°C)	5,3
Aço 4340 (revenido a 425°C)	3,8
Titânio Ti-6Al-4V	3,7
Aço 17-7PH	3,4
Alumínio 7075 (T651)	2,4
Aço 4140 (revenido a 370°C)	1,6
Aço 4340 (revenido a 260°C)	0,93

A classificação está apresenta na Tabela 16, onde pode ser observado que o aço com médio teor de carbono (1040), tem o comprimento de trinca mais longo e é, portanto o material mais desejável com base nesse critério.

Como observado anteriormente, o critério de “vazar antes de quebrar” é atendido exatamente quando a metade do comprimento de uma trinca interna for igual à espessura da parede do vaso de pressão, ou seja, quando $a=t$, a substituição de $a=t$ na equação $K_{IC} = Y \sigma (\pi a)^{1/2}$ fornece a Equação 111.

$$K_{IC} = Y \sigma \sqrt{\pi t}$$

Equação 111

E também:

$$t = \frac{pr}{2\sigma}$$

Equação 112

A tensão é substituída pelo limite de escoamento, já que o tanque deve ser projetado para conter a pressão sem que haja escoamento, além disso, a união das duas equações citadas anteriormente, nos fornece a seguinte expressão:

$$p = \frac{2}{Y^2 \pi r} \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_l}$$

Equação 113

Assim, para um dado vaso esférico com raio r , a pressão máxima admissível, consistente com o critério de “vazar antes de quebrar” é proporcional a (K_{Ic}^2/σ_l) assim temos uma classificação do material de acordo com a pressão suportada. Como mostra a **Tabela 17**. Por esse motivo é que muitos vasos de pressão são construídos com aço médio carbono quando temperaturas extremas e corrosão não precisam ser consideradas.

Tabela 17 Classificação de ligas metálicas em relação à pressão admissível.

Material	$\frac{K_{Ic}^2}{\sigma_l}$ (MPa-m)
Aço com médio teor de carbono (1040)	11,2
Aço 4140 (revenido a 482°C)	6,1
Titânio Ti-5Al-2,5Sn	5,8
Alumínio 2024 (T3)	5,6
Aço 4340 (revenido a 425°C)	5,4
Aço 17-7PH	4,4
Magnésio AZ31B	3,9
Titânio Ti-6Al-4V	3,3
Aço 4140 (revenido a 370°C)	2,4
Aço 4340 (revenido a 260°C)	1,5
Alumínio 7075 (T651)	1,2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTIS, G.R., Chantikul, P., Lawn, B.R., A critical Evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I Direct Crack Measurements., Journal American Ceramic Society, 1981.

ASTM International, E-399: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Frature Toughness K_{Ic} of Metallic Materials, 2010.

CALLISTER, Wiliam D. Jr. Materials Science and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc. 1994.

COUTINHO, A. C, Estudos de Sinterização e Caracterização de Si_3N_4 , dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Nucleares, São Paulo, 2000.

DIETER, G. E. Metalurgia mecânica. 2ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

D256-05a Standard Test Methods for Determining the IZOD Pendulum Impact Resistance of Plastics.

E23-05 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (2005), cobre Charpy e Izod.

GARCIA, Amauri; **SPIM**, Jaime Álvares, **DOS SANTOS**, Carlos Alexandre. Ensaio dos materiais. Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro, 2000.

HIBBELER, R.C., Resistência dos materiais, 7ª ed., Pearson, São Paulo, 2010.

KANNINEN, M.F, **POPELAR**, C, H. Advanced Fracture Mechanics. Oxford University Press. 1985.

LIMA, HERMES G., Influência da velocidade do ensaio de tração nos seus resultados, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MANDAI, J.T., Determinação de parâmetros para crescimento de trinca em ligas metálica: modelagem e experimentação, dissertação de mestrado, departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2010.

MEDEIROS, E., Simulação numérica dos ensaios de endentação vickers, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, 2006.

MOURA, Branco. 'Fadiga em Estruturas Soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian, Ag 1986, Lisboa.

NORTON, R. Machine Design. Prentice Hall 1997. -E,E, Gdoutos . Fracture Mechanics, An Introduction, Kluwer Academic Publishers (1993).

Normas ABNT:NBR 6157, ASTM A-370, ASTM E-23.

NBR 8425 MB1694Plásticos rígidos - Determinação da resistência ao impacto Izod.

PADILHA, Ângelo F. Materiais de Engenharia. Hemus Ed. Ltda. 1997.

RICHERSON, David W. Modern Ceramic Engineering. 2nd. Edição. Ed. Marcel Dekker. New York, NY, 1992.

SOUZA, S. A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 4 Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1982.

SURESH, S. Fatigue of Materials, Cambridge University Press. (1998).

REFERÊNCIAS DIGITAIS

http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico

<http://www.guiametal.com.br>

<http://www.matweb.com.br>

<http://resources.metapress.com/pdf->

[Preview.axd?code=tk40x441m6t1774j&size=largest](http://resources.metapress.com/pdf-Preview.axd?code=tk40x441m6t1774j&size=largest)

http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7379-ensaio-charpy-medea-resistencia-dos-materiais

<http://www.carbidedepot.com/formulas-hardness.htm>

<http://www.metalharte.com.br/site/tabela-dureza.htm>

<http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/0723.PDF>

http://pt.wikipedia.org/wiki/Teste_de_dureza_Janka

Referência das Imagens:

[1] **CALLISTER**, Wiliam D. Jr. Materials Science and Engineering. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc. 1994.

[2] **HIBBELER**, **R.C.**, Resistência dos materiais, 7^a ed., Pearson, São Paulo, 2010

[3] <http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio130.shtml>

- [4] http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6582-teste-charpy#.VP7rCvnF9e8
- [5] <http://pt.slideshare.net/jurenata/tm229-propriedades-mecanicas>
- [6] http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S037044672002000200004&script=sci_arttext
- [7] http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6585-fatores-que-influenciam-os-resultados-do-teste-de-impacto#.VP7tKfnF9e8
- [8] http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7748-as-consequencias-da-conformacao-a-frio
- [9] <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=128>
- [10] <http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/09/fratura-dos-materiais-fragil-e-ductil.html>
- [11] **SOUZA**, S. A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 4ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1982.
- [12] http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010414281999000100010&script=sci_arttext
- [13] http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/03.htm
- [14] <http://html.rincondelvago.com/dureza.html>
- [15] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAMakAH/ensaio-dureza>
- [16] http://ctborracha.com/?page_id=1590
- [17] http://www.remade.com.br/br/madeira_serrada_popup.php?num=1
- [18] <http://slideplayer.com.br/slide/356079/>
- [19] Departamento de Engenharia Mecânica - Laboratório de Materiais II - Ensaio de Fadiga (UNESP) - <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABN08AD/relatorio-4-ensaio-fadiga>
- [20] <http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio130.shtml>
- [21] <http://www.esss.com.br/blog/en/2008/11/a-mecanica-da-fratura-como-base-projeto-tolerante-ao-dano/>