



Processos de Fabrico

Ensaaios de Dureza

Ensaio de Dureza

É um dos ensaios mais comuns para avaliar e controlar as propriedades mecânicas dos materiais e dos processos tecnológicos. As aplicações destes ensaios incluem:

- Determinação da resistência mecânica;
- Controle de qualidade dos tratamentos térmicos
- Controle de qualidade em processos de conformação mecânica;
- Controle de qualidade em processos de ligação.

O conceito físico de dureza de um material em geral, significa a resistência à penetração ou à deformação permanente da sua superfície

Classificação dos métodos em função do modo de medida:

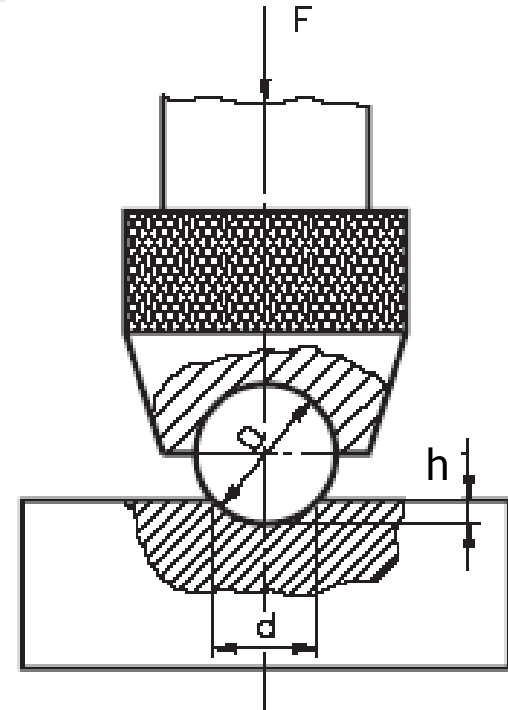
- Dureza de risco (dureza de Mohs, para os minerais);
- Dureza de resalto (dureza de Shore, polímeros elastómeros e borracha);
- Dureza de penetração (Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop usados preferencialmente para os metais e ligas metálicas).

Dureza Brinell (Hardness Brinell: HB)

Desenvolvido por Brinell em 1900, consiste em fazer penetrar uma esfera de aço temperado ou metal duro (CW) de diâmetro D na superfície do metal sob a acção de uma força F aplicada gradualmente e durante um intervalo de tempo pré-definido t .

A compressão provoca uma impressão com a forma de uma calote esférica de diâmetro d , que será tanto menor quanto mais duro for o material a ensaiar.

O valor da dureza é o quociente entre a carga em **N** e a área da calote esférica:



h = prof. de impressão da calote

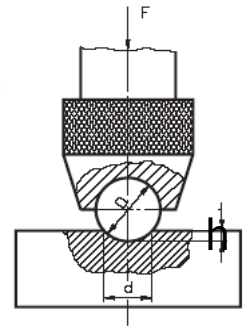
$$HB = \frac{F}{gA} [\text{kgf} / \text{mm}^2]$$

g =aceleração da gravidade

Área da calote esférica: $A = \pi Dh$

Sendo h difícil de medir é preferível fazer a leitura do diâmetro d da calote, que está relacionada com h e com D :

$$h = \frac{\pi}{2} \left[D - \left(D^2 - d^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$



A equação de cálculo da dureza Brinell será assim:

$$HB = \frac{0.102}{\pi D} \frac{2F}{D - \left(D^2 - d^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

N - Newton
 D, d - mm

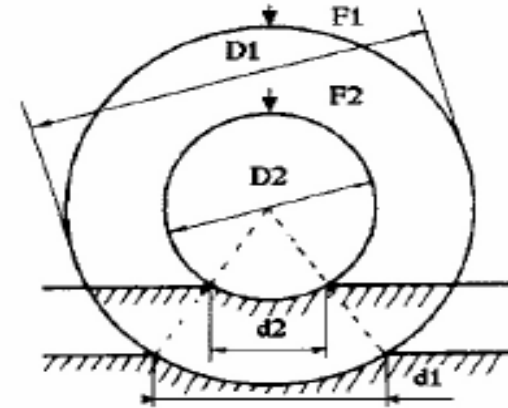
O diâmetro d da calote deve ser tomado como a media de duas leituras feitas a 90° uma da outra.

O ensaio padronizado, proposto por Brinell, é realizado com carga de 3.000 kgf e esfera de 10 mm de diâmetro, de aço temperado. Porém, para materiais muito dúcteis, quer o valor da força quer o diâmetro da esfera devem ser menores para evitar uma impressão muito profunda e permitir usar este método em peças pouco profundas.

Os valores da força e do diâmetro não podem ser arbitrários para obter os mesmos valores de HB, isto é, as geometrias devem ser semelhantes-

$$k = 0.102 \frac{F}{D^2} = const$$

Factor de carga



Fatores de carga padronizados de acordo com a faixa de dureza e o tipo de material.

| MATERIAL | DUREZA BRINELL | 0,102 F/D ² |
|---------------------------|----------------|------------------------|
| Aço | | 30 |
| Ferro Fundido | <140 | 10 |
| | ≥ 140 | 30 |
| Cobre e ligas de Cobre | <35 | 5 |
| | ≥ 35 e ≤ 200 | 30 |
| | > 200 | 30 |
| Metais leves e suas ligas | <35 | 1,25 |
| | | 2,5 |
| | ≥ 35 e ≤ 80 | 5 |
| | | 10 |
| | | 15 |
| | >80 | 10 |
| 15 | | |

Relação entre o diâmetro da esfera D e a força nominal F segundo NP106: 1990

Designação da dureza Brinell segundo NP 106:1990

Exemplo: 360 HBS 5/750/10

Dureza Brinell 360

Esfera de aço – S (metal duro-W)

Diâmetro da esfera = 5mm

Força do ensaio = 750 kgf (7355N)

| SÍMBOLO DE DUREZA | DIÂMETRO DA ESFERA (mm) | $0,102F/D^2$ | FORÇA DE ENSAIO NOMINAL |
|----------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|
| HBS (HBW) 10/3000 | 10 | 30 | 29,42 kN |
| HBS (HBW) 10/1500 | 10 | 15 | 14,71 kN |
| HBS (HBW) 10/1000 | 10 | 10 | 9,807 kN |
| HBS (HBW) 10/500 | 10 | 5 | 4,903 kN |
| HBS (HBW) 10/250 | 10 | 2,50 | 2,452 kN |
| HBS (HBW) 10/125 | 10 | 1,25 | 1,226 kN |
| HBS (HBW) 10/100 | 10 | 1 | 980,7 N |
| HBS (HBW) 5/750 | 5 | 30 | 7,355 kN |
| HBS (HBW) 5/250 | 5 | 10 | 2,452 kN |
| HBS (HBW) 5/125 | 5 | 5 | 1,226 kN |
| HBS (HBW) 5/62,5 | 5 | 2,50 | 612,9 N |
| HBS (HBW) 5/31,25 | 5 | 1,25 | 306,5 N |
| HBS (HBW) 5/25 | 5 | 1 | 245,2 N |
| HBS (HBW) 2,5/187,5 | 2,5 | 30 | 1,839 kN |
| HBS (HBW) 2,5/62,5 | 2,5 | 10 | 612,9 N |
| HBS (HBW) 2,5/31,25 | 2,5 | 5 | 306,5 N |
| HBS (HBW) 2,5/15,625 | 2,5 | 2,50 | 153,2 N |
| HBS (HBW) 2,5/7,8125 | 2,5 | 1,25 | 76,61 N |
| HBS (HBW) 2,5/6,25 | 2,5 | 1 | 61,29 N |
| HBS (HBW) 2/120 | 2 | 30 | 1,177 kN |
| HBS (HBW) 2/40 | 2 | 10 | 392,3 N |
| HBS (HBW) 2/20 | 2 | 5 | 196,1 N |
| HBS (HBW) 2/10 | 2 | 2,50 | 98,07 N |
| HBS (HBW) 2/5 | 2 | 1,25 | 49,03 N |
| HBS (HBW) 2/4 | 2 | 1 | 39,23 N |
| HBS (HBW) 1/30 | 1 | 30 | 294,2 N |
| HBS (HBW) 1/10 | 1 | 10 | 98,07 N |
| HBS (HBW) 1/5 | 1 | 5 | 49,03 N |
| HBS (HBW) 1/2,5 | 1 | 2,50 | 24,52 N |
| HBS (HBW) 1/1,25 | 1 | 1,25 | 12,26 N |
| HBS (HBW) 1/1 | 1 | 1 | 9,80 N |

Tempo de duração de aplicação da carga em função do material segundo NP 106:1990

| MATERIAIS | Aços, F.Fundidos | Cobre, Latão, Bronze | Ligas Leves | Estanho, Chumbo |
|--------------|---------------------|----------------------------|-------------|--------------------|
| TEMPO (s) | 10/30 | 30 | 60/120 | 120 |

Distância a respeitar entre os centros de duas impressões adjacentes e entre o centro de impressão eo bordo segundo NP 106:1990

| | Aços Ferros Fundidos Cobre e suas ligas | Ligas leves Chumbo Estanho e suas ligas |
|--|---|---|
| DISTÂNCIA ENTRE CENTROS ADJACENTES | $\geq 4 d$ | $\geq 6 d$ |
| DISTÂNCIA DO CENTRO DA IMPRESSÃO E O BORDO | $\geq 2,5 d$ | $\geq 3 d$ |

d - diâmetro médio da impressão

Espessura mínima do provete em função do diâmetro médio da impressão segundo NP 106:1990

| DIÂMETRO MÉDIO DA IMPRESSÃO | ESPESSURA MÍNIMA DO PROVETE | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | D = 1,0 | D = 2,0 | D = 2,5 | D = 5,0 | D = 10,0 |
| 0.2 | 0.08 | | | | |
| 0.3 | 0.18 | | | | |
| 0.4 | 0.33 | | | | |
| 0.5 | 0.54 | 0.25 | | | |
| 0.6 | 0.80 | 0.37 | 0.29 | | |
| 0.7 | | 0.51 | 0.40 | | |
| 0.8 | | 0.67 | 0.53 | | |
| 0.9 | | 0.86 | 0.67 | | |
| 1.0 | | 1.07 | 0.83 | | |
| 1.1 | | 1.32 | 1.02 | | |
| 1.2 | | 1.60 | 1.23 | 0.58 | |
| 1.3 | | | 1.46 | 0.69 | |
| 1.4 | | | 1.72 | 0.80 | |
| 1.5 | | | 2.0 | 0.92 | |
| 1.6 | | | | 1.05 | |
| 1.7 | | | | 1.19 | |
| 1.8 | | | | 1.34 | |
| 1.9 | | | | 1.50 | |
| 2.0 | | | | 1.67 | |
| 2.2 | | | | 2.04 | |
| 2.4 | | | | 2.46 | 1,17 |
| 2.6 | | | | 2.92 | 1,38 |
| 2.8 | | | | 3.43 | 1,60 |
| 3.0 | | | | 4.0 | 1,84 |
| 3.2 | | | | | 2,10 |
| 3.4 | | | | | 2,38 |
| 3.6 | | | | | 2,68 |
| 3.8 | | | | | 3,0 |
| 4.0 | | | | | 3,34 |
| 4.2 | | | | | 3,7 |
| 4.4 | | | | | 4,08 |
| 4.6 | | | | | 4,48 |
| 4.8 | | | | | 4,91 |
| 5.0 | | | | | 5,36 |
| 5.2 | | | | | 5,83 |
| 5.4 | | | | | 6,33 |
| 5.6 | | | | | 6,86 |
| 5.8 | | | | | 7,42 |
| 6.0 | | | | | 8,0 |

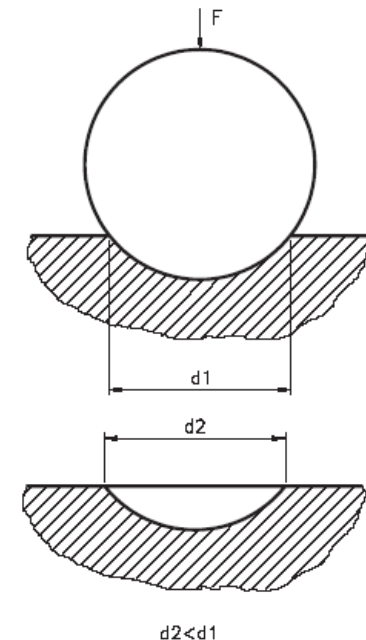
VANTAGENS DO ENSAIO BRINELL:

- ✓ **É usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas;**
- ✓ **É o único ensaio utilizado e aceite para ensaios em metais que não tenham estrutura interna uniforme (materiais heterogéneos);**
- ✓ **É realizado em equipamento de fácil operação.**

DESVANTAGENS DO ENSAIO BRINELL

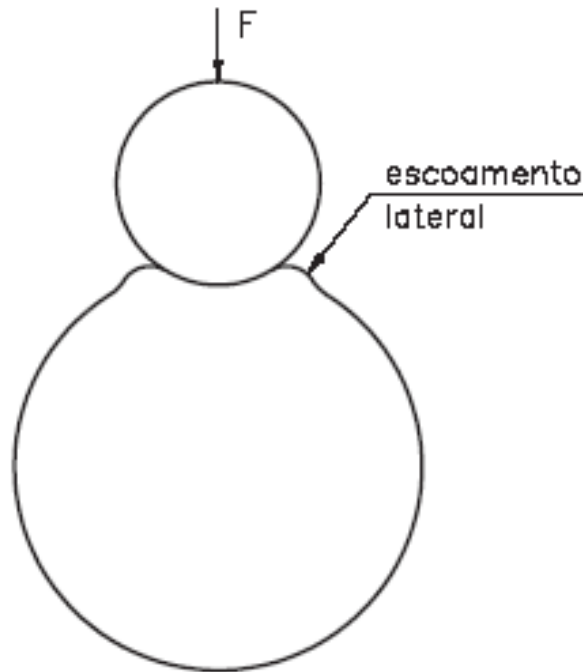
- ❑ O uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada. Usando-se esferas de aço temperado só é possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera.

- ❑ A recuperação elástica é uma fonte de erros, pois o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga. Isto é mais sensível quanto mais duro for o metal.



DESVANTAGENS DO ENSAIO BRINELL

- ❑ O ensaio não deve ser realizado em superfícies cilíndricas com raio de curvatura menor que 5 vezes o diâmetro da esfera, pois pode haver escoamento lateral do material e a dureza medida será menor que a real.

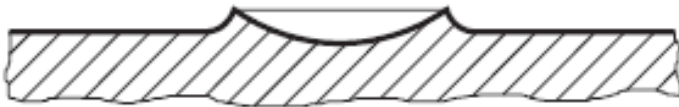


Em alguns materiais podem ocorrer deformações no contorno da impressão, ocasionando erros de leitura.



a

Impressão normal



b

Defeito: aderência do material à esfera durante a aplicação da carga.



c

Defeito: bordas estão abauladas, dificultando a leitura do diâmetro.

Dureza Rockwell (Hardness Rockwell)

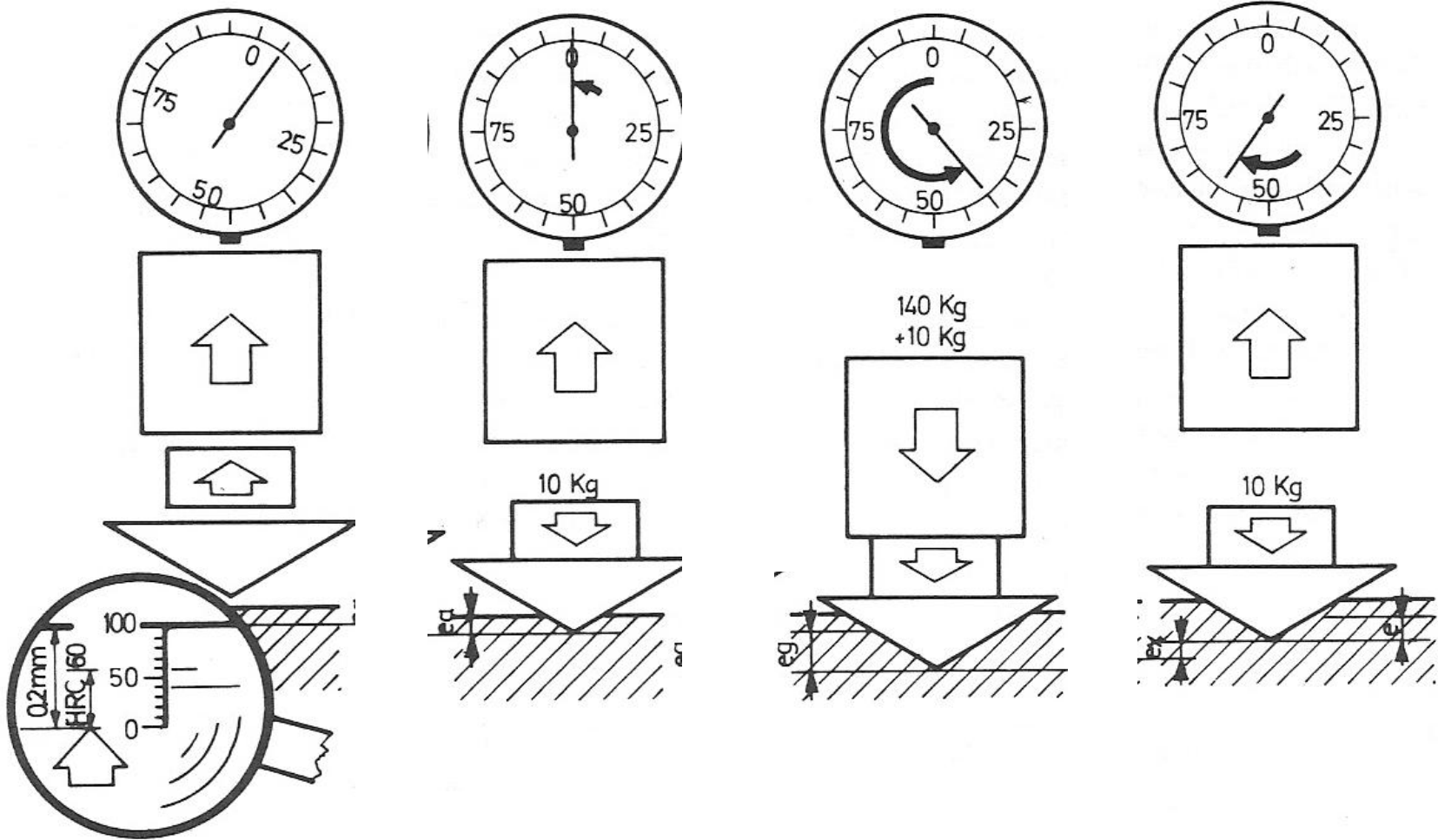
Método introduzido por Rockwell em 1924, já que o método Brinell não permitia medir durezas muito elevadas (acima de 500 HB).

Este método difere do de Brinell pelo facto de usar duas forças de ensaio. Uma força inicial F_0 que garante uma justaposição perfeita do penetrador à superfície a ensaiar, eliminando a interferência de pequenos defeitos mecânicos do aparelho.

Considera-se que a penetração neste momento é zero.

A segunda força F_1 , maior que a inicial, é somada à força inicial F_0 originando a força total F .

Numa terceira fase, após manter a força total durante um tempo suficiente, retira-se a força adicional F_1 , verificando-se uma recuperação elástica do material, lendo-se numa escala adequada o número de dureza.



Tipos de penetradores

Esfera de aço: $\Phi=1/16''$, $\Phi=1/8''$, $\Phi=1/4''$ e $\Phi=1/2''$.

Cone de diamante: Ângulo de 120° terminando numa calote esférica pertencendo a uma esfera imaginária, tangente ao cone e de raio 0.2 mm.

Tipos de dureza Rockwell :

- Normal
- Para produtos metálicos de pequena espessura
- Rockwell superficial

Ensaio Rockwell Normal

Com as várias combinações entre penetradores e cargas obtêm-se as diferentes escalas: A, B, C, D,.....K. As mais utilizadas são a Rockwell-B (HRB) e Rockwell-C (HRC).

Ao pretender determinar a dureza de um material desconhecido, deve usar-se uma escala para materiais mais duros, par evitar danificar o penetrador.

Por exemplo: usar a escala C e depois testar outro se o resultado cair fora do intervalo de validade da duraza HRC

| Escala de Dureza | Símbolo de Dureza | Tipo de Penetrador | Força Inicial FO(N) | Força Adicional F1(N) | Força Total F(N) | Campo de Aplicação | Materiais |
|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|--------------------|--|
| A | HRA | Cone de diamante | 98,07 | 490,3 | 588 | 20 a 88 HRA | aços niturados carbonetos metálicos |
| B | HRB | Esfera de aço 1,5875mm | 98,07 | 882,6 | 981 | 20 a 100 HRB | aços ao carbono recozidos c/ baixo teor de carbono |
| C | HRC | Cone de diamante | 98,07 | 1373 | 1471 | 20 a 70 HRC | aços duros |
| D | HRD | Cone de Diamante | 98,07 | 882,6 | 981 | 40 a 77 HRD | aços cementados |
| E | HRE | Esfera de aço 3,175mm | 98,07 | 882,6 | 981 | 70 a 100 HRE | metais macios, como antifricção e peças fundidas |
| F | HRF | Esfera de aço 1,587mm | 98,07 | 490,3 | 588 | 60 a 100 3 HRF | bronze recozido |
| G | HRG | Esfera de aço 1,5875mm | 98,07 | 1373 | 1471 | 30 a 94 HRG | bronze fosforoso e outros metais |
| H | HRH | Esfera de aço 3,175mm | 98,07 | 490,03 | 588 | 80 a 100 HRH | metais macios com homogeneidade ferro fundido |
| K | HRK | Esfera de aço 3,175mm | 98,07 | 1373 | 1471 | 40 a 100 HRK | Metais duros com homogeneidade ferro fundido |

Ensaio Rockwell Normal

O valor do número de dureza Rockwell é dado por:

$$HR = h - \frac{e}{0.002}$$

h- constante que depende do tipo de penetrador

e – profundidade de penetração em mm

Precauções

Peça isenta de imperfeições e acabamento de maquinagem ou polimento para bom rigor;

Espessura mínima=10 vezes a profundidade da impressão;

Superfície a ensaiar plana.

Ensaio Rockwell para pequenas espessuras

HRMm para espessuras superiores ou iguais a 0.6 mm

HR30 Tm para espessuras inferiores a 0.6 mm

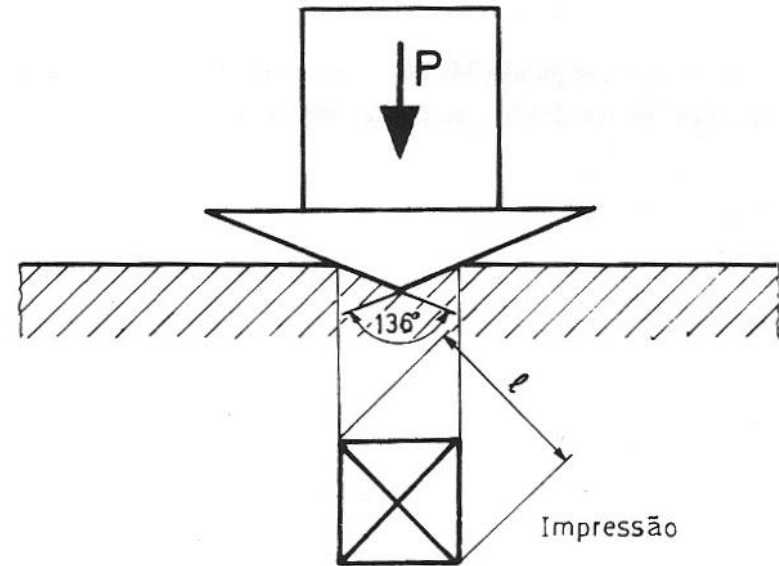
| Escala de dureza | Símbolo de dureza | Tipo de penetrador | Força inicial F_0 (N) | Força adicional F_1 (N) | Força total F (N) | Campo de aplicação |
|------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| Bm | HRBm | esfera de aço 1,5875 mm | 98,07 | 882,7 | 980,7 | 20 a 100 HRBm |
| 30Tm | HR30Tm | esfera de aço 1,5875 mm | 29,42 | 264,8 | 294,2 | 29 a 82 HR30Tm |

Ensaio Rockwell superficial

Para determinar a dureza da camada superficial ou se a peça só admitir pequenas impressões superficiais

Dureza Vickers

Desenvolvido em 1929, utiliza como penetrador um diamante com a forma de uma pirâmide quadrangular com um ângulo entre faces de 136° (para obter boa relação entre HB e HV)



A dureza é proporcional ao quociente entre a força do ensaio (F) em kgf e a área lateral da impressão em mm² . Traduz-se pela equação:

$$HC = 1.854 \frac{F}{l^2} [\text{kgf} / \text{mm}^2]$$

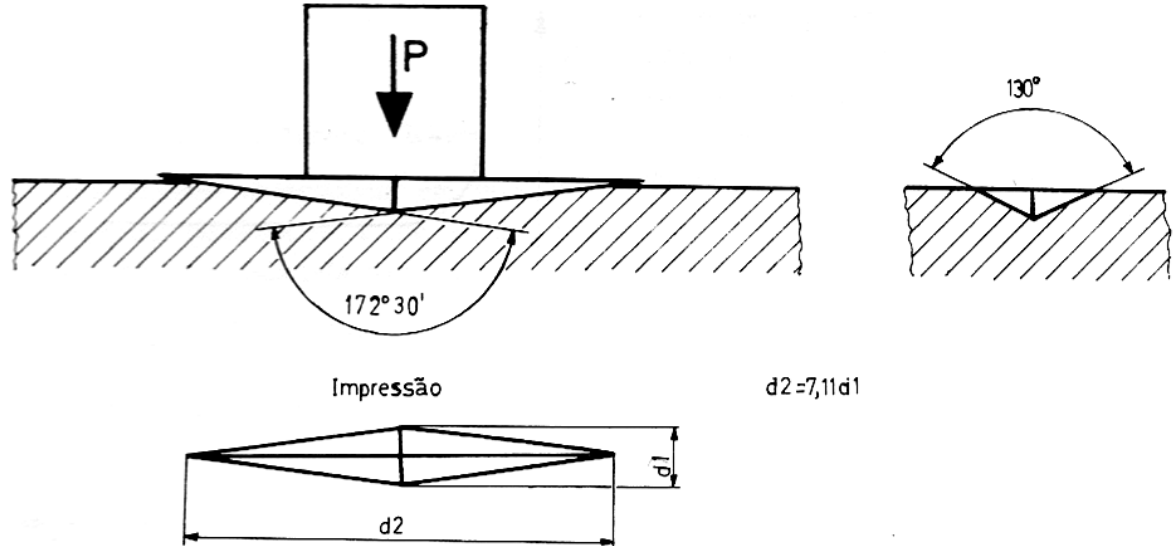
l é a média das duas diagonais da impressão

Dureza Knoop

Utiliza como penetrador um diamante também na forma de pirâmide mas alongado.

A dureza é proporcional ao quociente entre a força do ensaio (F) em kgf e a área da impressão projectada. Traduz-se pela equação:

$$HK = 1000 \frac{F}{d_2^2 C}$$



F - em gramas
d₂ - microns

Utilizado para a determinação de microdurezas.

Sendo o penetrador um diamante , praticamente indeformável, existe semelhança entre impressões de cargas diferentes.



O número de dureza é independente da carga aplicada.

É , no entanto, conveniente usar cargas diferentes para obter uma impressão regular.

Relação entre o número de dureza Vickers e a força do ensaio (NP 711-1:1990)

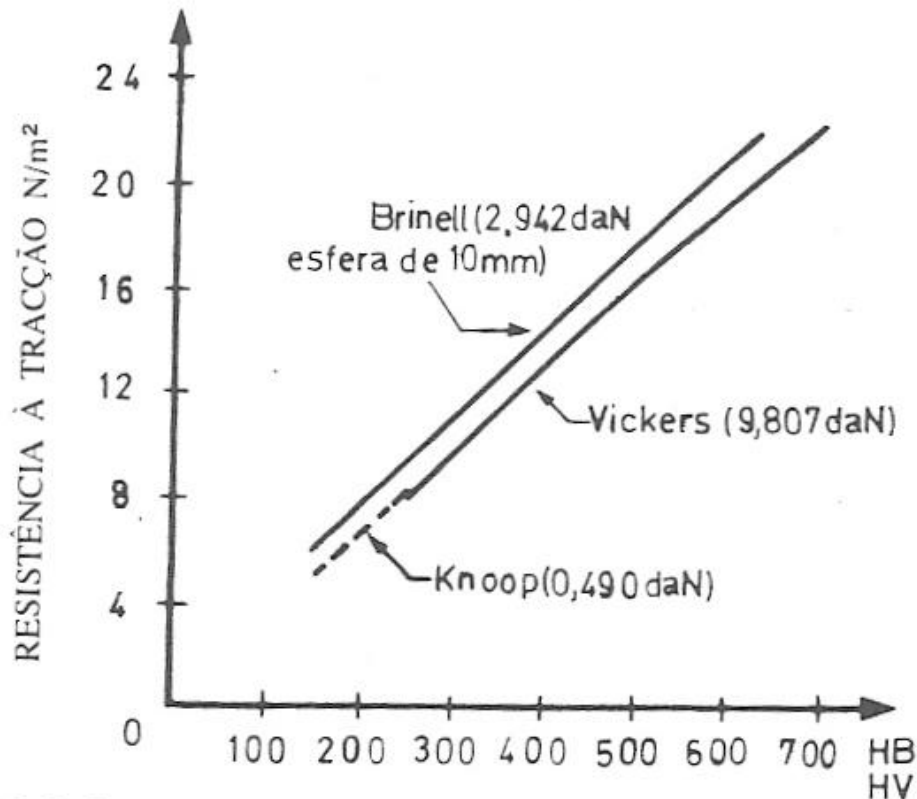
| SÍMBOLO DE DUREZA | FORÇA DE ENSAIO NOMINAL (N) |
|-------------------|-----------------------------|
| HV 5 | 49,03 |
| HV 10 | 98,07 |
| HV 20 | 196,1 |
| HV 30 | 294,2 |
| HV 50 | 490,30 |
| HV 100 | 980,7 |

Exemplo: **540 HV 20/20** – Dureza 540 Vickers ensaio com força de 20kgf (196.1N) aplicada durante 20 seg.

Relações entre a dureza e outras propriedades

Existem relações aproximadas entre as escalas de dureza e outras propriedades mecânicas

Só em propriedades onde estejam envolvidas deformações plásticas é que é possível obter estas relações, como a tensão de rotura, mas não no limite elástico



- Relação entre as durezas Brinell e Vickers e a resistência à tracção dos aços.

Tabela 4.12 Equivalência entre a tensão de rotura e a dureza em várias escalas para o aço ao carbono

| DUREZA | | | | | | TENSÃO DE ROTURA MPa |
|-------------------------------|--------|---|---------------------------------|---------|--------------------|-----------------------------|
| Brinell | | Rockwell | | Vickers | Shore | |
| Esfera 10 mm com 3000 kgf | | C | B | | para h de 200 (mm) | |
| Diâmetro da impressão em (mm) | Dureza | Força de 150 kgf e cone de diamante de 120° | Força de 100 kgf e esfera 1/16" | | | |
| 2,05 | 898 | — | — | — | — | — |
| 2,1 | 857 | — | — | — | — | — |
| 2,15 | 817 | — | — | — | — | — |
| 2,2 | 780 | 70 | — | 1,04 | 107 | — |
| 2,25 | 745 | 68 | — | 980 | 105 | — |
| 2,3 | 712 | 66 | — | 900 | 101 | 2460 |
| 2,35 | 682 | 64 | — | 830 | 98 | 2350 |
| 2,4 | 653 | 62 | — | 765 | 95 | 2270 |
| 2,45 | 627 | 60 | — | 715 | 91 | 2180 |
| 2,5 | 601 | 58 | — | 670 | 87 | 2080 |
| 2,55 | 578 | 57 | — | 650 | 86 | 2000 |
| 2,6 | 555 | 55 | 120 | 610 | 82 | 1930 |
| 2,65 | 534 | 53 | 119 | 575 | 79 | 1840 |
| 2,7 | 514 | 52 | 119 | 558 | 77 | 1770 |
| 2,75 | 495 | 50 | 117 | 525 | 74 | 1700 |
| 2,8 | 477 | 49 | 117 | 510 | 72 | 1640 |