

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS, AERONÁUTICA E AUTOMOBILÍSTICA

ENSAIO DE DUREZA

Engenharia e Ciência dos Materiais I
Profa. Dra. Lauralice Canale
Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruckert

Dureza

Definição: Medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco)

Principais Vantagens:

- Fácil execução e barato (muito utilizado na indústria)
- Rapidez na execução
- Ensaio pode ser considerado não destrutivo (tamanho impr.)
- Conhecimento aproximado da resistência mecânica através do uso de tabelas de correlação

Principais objetivos:

- ✓ Conhecimento das resistências mecânica e ao desgaste;
- ✓ Controle de qualidade nos processos de conformação plástica e nas condições de fabricação;
- ✓ Verificação das condições de tratamento térmico.

Métodos de medição:

- Dureza de risco (escala de Mohs)
- Dureza de choque ou ressalto (Shore)
- Dureza de penetração (Brinell, Meyer, Rockwell, Vickers, Knoop)

Seleção do Tipo de Ensaio de Dureza

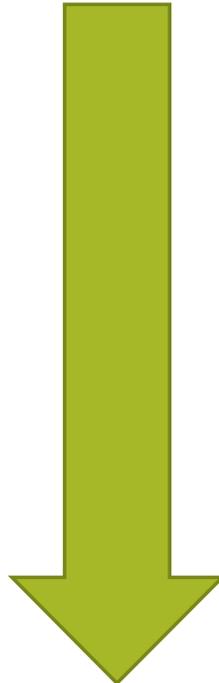
Material	Tipo de Ensaio			
	Rockwell	Vickers	Knoop	Brinell
Aços macios, ligas de cobre, ligas de alumínio, ferro fundido maleável	●	●	●	●
Aços, ferros fundidos duros, ferro perlítico maleável, titânio, aço c/ endurecimento profundo	●	●	●	●
Metal duro, aços de pouca espessura, aço com endurecimento superficial	●	●	●	
Aços de pouca espessura, aço c/ endurecimento de média profundidade, ferro perlítico maleável	●	●	●	
Ferro fundido, alumínio, ligas de magnésio, metais macios	●	●	●	●
Ligas recozidas de cobre, chapas finas de metal macio	●	●	●	
Bronze fosforoso, berílio, cobre, alumínio, zinco, chumbo	●	●	●	●
Metais macios e outros materiais finos e macios	●	●	●	
Estanho	●	●	●	
Alumínio	●	●	●	●
Zinco	●	●	●	●
Pinturas e revestimentos orgânicos			●	
Borracha dura	●			
Plásticos	●	●	●	

Dureza Mohs - risco

O primeiro método padronizado de ensaio de dureza foi baseado no processo de riscagem de minerais padrões, desenvolvido por Mohs, em 1822.

Curiosidade Escala Mohs (1822)

- 1 – Talco
- 2 – Gipsita
- 3 – Calcita
- 4 – Fluorita
- 5 – Apatita
- 6 – Feldspato (ortóssio)
- 7 – Quartzo
- 8 – Topázio
- 9 – Safira e corindo
- 10 – Diamante



Indicação essencialmente qualitativa por comparação com outros minerais (*quer. mineral da escala risca o que os precede e é riscado pelo seguinte*)

Pouco utilizada (imprecisa) nos metais (dureza entre 4 a 8)

Dureza Shore (HS) – choque ou ressalto

Shore propôs uma medida de dureza por choque que mede a altura do ressalto de um peso que cai livremente até bater na superfície lisa e plana de um CP. Esta altura de ressalto mede a perda de energia cinética do peso, absorvida pelo CP.

Características e vantagens:

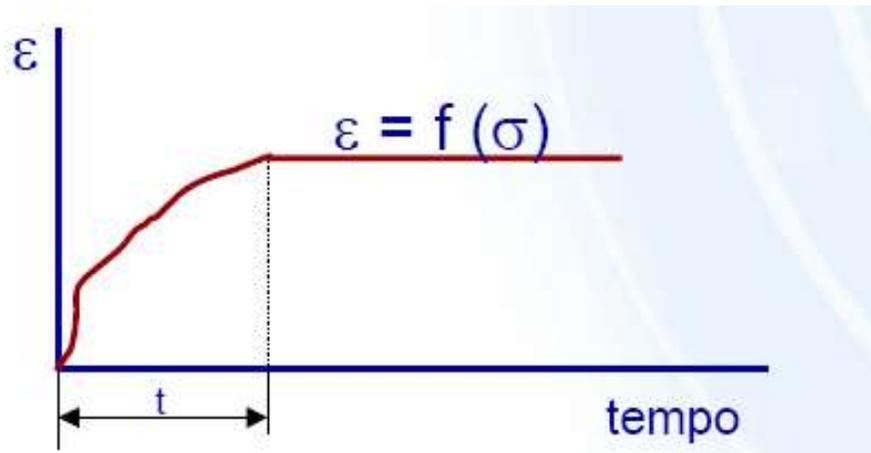
- *Normalmente equip. portátil e de fácil utilização;*
- *Possibilidade de medir durezas de peças de grandes dimensões que não cabem em máquinas de penetração;*
- *Impressão muito pequena sendo utilizada em peças acabadas (controle qualidade);*
- *Utilizado em polímeros, borracha e metais.*

Dureza por penetração (princípios gerais)

Cuidados na realização dos ensaios:

- Perpendicularidade entre a força e a superfície da peça;
- Aplicação lenta da carga;
- Preparação correta da superfície da peça;
- Tempo de espera após aplicação da carga antes da descarga (fenômeno de fluência transitória).

Dureza por penetração (princípios gerais)



Valores de t:

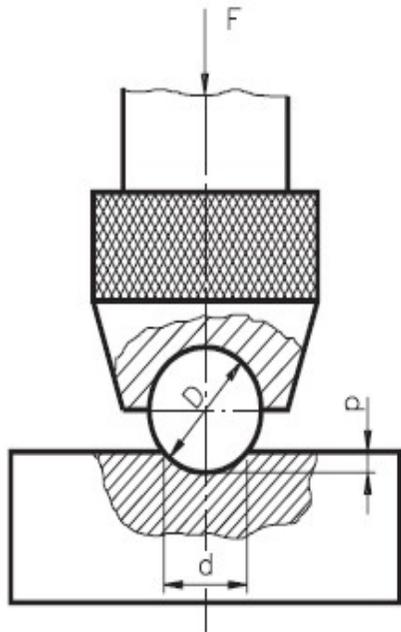
Mg – 60s

Aços – 10s

São os ensaios de dureza mais utilizados na atualidade

Dureza Brinell (HB) – Ano 1900

Consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço endurecido ou de carboneto de tungstênio (CW), de diâmetro D , sobre uma superfície polida e limpa de um metal através de uma carga F , durante um tempo t .



Penetrador esférico ϕ : 1,2 ,5 ou 10 mm

Cargas: entre 500 e 3000 kg

Tempo: entre 10 e 30 s

P = prof. de impressão (da calota)

$$HB = \frac{F}{A_c}$$
$$HB = \frac{F}{\pi D p}$$

Um símbolo de seta verde em L indica a transição da primeira fórmula para a segunda.

ENSAIO BRINELL

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

$\frac{F}{D^2}$	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 diâmetro da esfera é determinado em função da espessura do corpo de prova ensaiado. A espessura mínima é indicada em normas técnicas de método de ensaio. No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota.

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

DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	F (kgf) = 30 D ²	F (kgf) = 10 D ²	F (kgf) = 5 D ²	F (kgf) = 2,5 D ²
10	3.000	1.000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625

Observe que, no quadro anterior, os valores de carga foram determinados a partir das relações entre F e D² indicadas no primeiro quadro.

$$\text{Exemplificando: } \frac{F}{D^2} = 30 \Rightarrow F = 30 D^2$$

CASO PRÁTICO

Uma empresa comprou um lote de chapas de aço carbono com a seguinte especificação:

- espessura: 4 mm
- dureza Brinell (HB): 180

Essas chapas devem ser submetidas ao ensaio de dureza Brinell para confirmar se estão de acordo com as especificações.

Nosso problema consiste em saber se essas chapas podem ser ensaiadas com a esfera de 10 mm.



Observando o primeiro quadro, você fica sabendo que a relação $\frac{F}{D^2}$ para este material (aço carbono) é igual a 30.

O segundo quadro mostra que, para uma esfera de 10 mm e um fator de carga igual a 30, a carga de ensaio é de 3.000 kgf.

Com esses dados, é possível calcular a profundidade de impressão da calota, aplicando a fórmula:

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

Isolando p , temos:

$$p = \frac{F}{\pi Dp} \Rightarrow p = \frac{3.000}{3,14 \times 10 \times 180} \Rightarrow p = \frac{3.000}{5.652} \Rightarrow p = 0,53$$

Portanto, a profundidade da impressão é de 0,53 mm. Sabemos que a espessura do material ensaiado deve ser, no mínimo, 17 vezes a profundidade da calota. Multiplicando a profundidade da impressão por 17, obtemos: 9,01 mm.

Conclusão: as chapas de 4 mm não podem ser ensaiadas com a esfera de 10 mm. Devem ser usadas esferas menores.

A esfera de 10 mm produz grandes calotas na peça. Por isso é a mais adequada para medir materiais que têm a estrutura formada por duas ou mais fases de dureza muito discrepantes. Em casos assim, a dureza é determinada pela média entre as fases, como acontece com os ferros fundidos, bronzes etc.

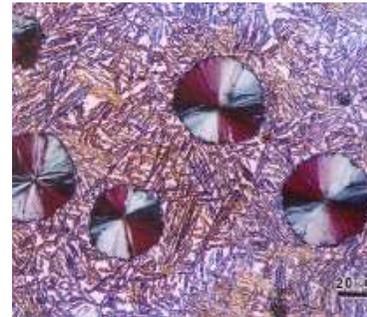
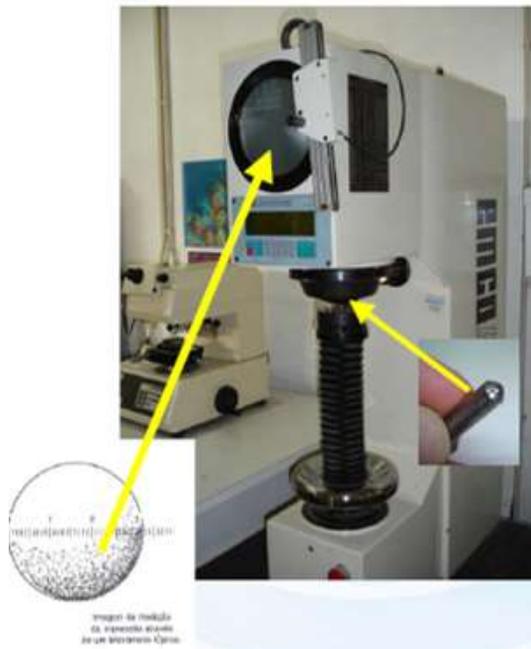
A utilização de esferas diferentes de 10 mm só é válida para materiais homogêneos. Esferas de diâmetros menores produziram calotas menores e, no caso de materiais heterogêneos, poderia ocorrer de se estar medindo a dureza de apenas uma das fases. Com isso, o valor de dureza seria diferente do esperado para o material.

Mecanismo de Medição Brinell

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

- D=diâmetro da esfera
- d=diâmetro da impressão*

*medido através de microscópio especial, utilizando uma escala gravada em sua ocular



Relação entre dureza Brinell e limite de resistência

No caso dos aços existe uma relação empírica entre dureza Brinell e o limite de resistência, σ_r , dada por:

$$\sigma_r = 0,36 * HB \quad [\text{kgf/mm}^2]$$

Segundo O'Neill, o valor de 0,36 vale para aços doces, entretanto este valor pode mudar para:

- 0,49 para Ni recozido
- 0,41 para Ni e latão encruado
- 0,52 para cobre recozido
- 0,40 para alumínio e suas ligas.

Dureza Rockwell (HR) - 1922

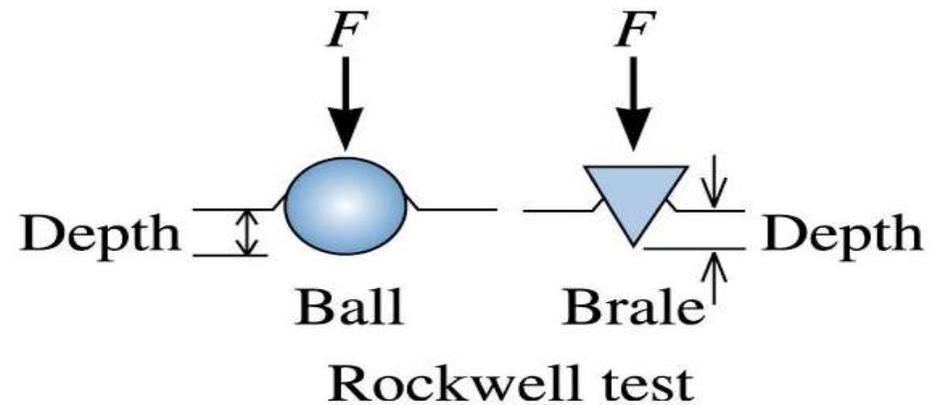
- Método mais utilizado para se medir dureza
- Elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é diretamente lido na máquina de ensaio, sendo portanto rápido e livre de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão;
- Ensaio Rockwell superficial é realizado em corpos de prova mais finos (delgados).



Método de Medição Rockwell

- Índice (HR) é determinado pela diferença na profundidade de penetração de uma carga inicial (pré-carga) seguida de uma carga principal.
- Ensaio Rockwell
 - Pré-carga = 10 kgf
 - Principal = 60, 100 e 150 kgf
- Ensaio Rockwell Superficial
 - Pré-carga = 3 kgf
 - Principal = 15, 30 e 45 kgf

Dureza Rockwell (HR)



Penetradores do ensaio Rockwell:

- Esferas de aço endurecidas com ϕ :1/16,1/8,1/4 e 1/2 pol.
- Penetradores cônicos de diamante (brale) usado para materiais mais duros

Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Rockwell

Escala	Endentador	Carga Maior F_1 (kgf)	Aplicação
A	Cone diamante 120°	50	Chapa de aço, metal duro, aço com endurecimento superficial
B	Esfera de aço 1/16"	90	Cobre, ligas de alumínio, aço de baixo carbono, ferro fundido maleável
C	Cone diamante 120°	140	Aços endurecidos mais usados, ferro fundido duro, titânio
D	Cone diamante 120°	90	Aços duros de pouca espessura, ferro perlítico maleável
E	Esfera de aço 1/16"	90	Ferro fundido, alumínio, ligas moles
F	Esfera de aço 1/16"	50	Ligas de cobre recozidas, metais moles de pouca espessura
G	Esfera de aço 1/16"	140	Bronze fosforado, cobre-berílio, ferro fundido maleável, chumbo, etc
H	Esfera de aço 1/8"	50	Metais moles (Al, Zn, Pb), plásticos
K	Esfera de aço 1/8"	140	
L	Esfera de aço 1/4"	50	
M	Esfera de aço 1/4"	90	
P	Esfera de aço 1/4"	140	Metais macios e outros materiais finos muito moles, inclusive plásticos.
R	Esfera de aço 1/2"	140	
S	Esfera de aço 1/2"	90	
V	Esfera de aço 1/2"	140	

$$F = F_0 + F_1$$

pré-carga F_0 de 10 kgf.

Indicações de aplicação do Ensaio de Dureza Superficial Rockwell

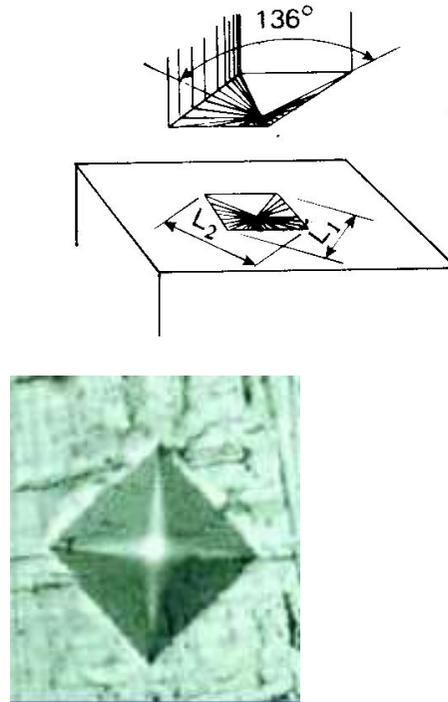
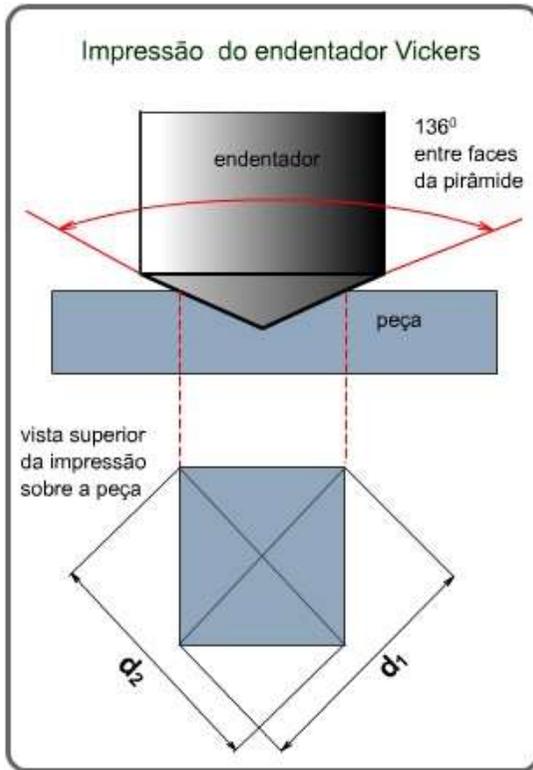
Escala	Tipo de Endentador	Carga Maior F_1 (kgf)	Aplicação
HR 15 N	Cone Diamante 120º	12	Metal duro, aços com pouca espessura, aços com endurecimento superficial
HR 30 N	Cone Diamante 120º	27	Aço, ferro fundido duro, ferro fund maleável, titânio, aço com endurecimento profundo, outros materiais mais duros que B100
HR 45 N	Cone Diamante 120º	42	Aços de pouca espessura, aços endurecidos a média profundidade, ferro fundido maleável
HR 15 T	Esfera de aço 1/16"	12	Ligas de cobre, aços macios, ligas de alumínio, ferro fundido maleável
HR 30 T	Esfera de aço 1/16"	27	Ligas de cobre recozidas, chapas finas de metais macios
HR 45 T	Esfera de aço 1/16"	42	Bronze fosforado, cobre-berílio, ferros maleáveis.
HR 15 W	Esfera de aço 1/8"	12	
HR 30 W	Esfera de aço 1/8"	27	
HR 45 W	Esfera de aço 1/8"	42	
HR 15 X	Esfera de aço 1/4"	12	
HR 30 X	Esfera de aço 1/4"	27	
HR 45 X	Esfera de aço 1/4"	42	
HR 15 Y	Esfera de aço 1/2"	12	
HR 30 Y	Esfera de aço 1/4"	27	
HR 45 Y	Esfera de aço 1/4"	42	

$$F = F_0 + F_1$$

pré-carga F_0 de 3 kgf.

Dureza Vickers (HV) - 1925

- O método é baseado na penetração de uma pirâmide de base quadrada, com ângulo entre as faces opostas de 136° feita de diamante;
- Adequado para regiões pequenas e selecionadas do corpo de prova;
- Impressão é observada em um microscópio e medida.

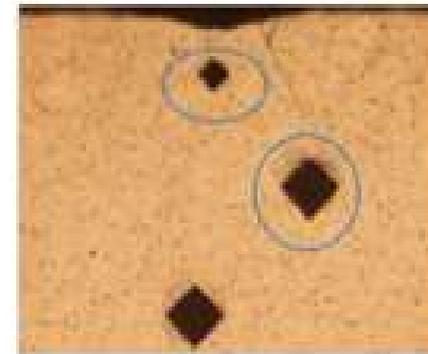
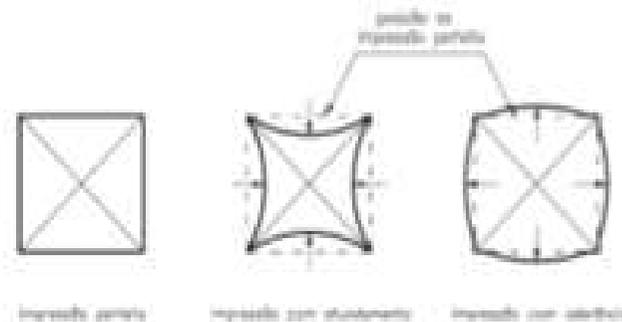


$$HV = \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136}{2}}{D^2} = \frac{1,8544F}{D^2}$$

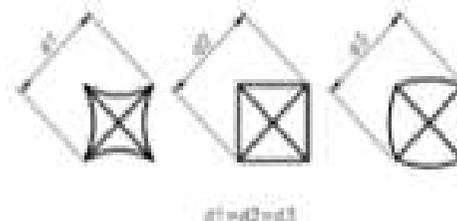
$$D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ENSAIO VICKERS

Uma impressão perfeita, no ensaio Vickers, deve apresentar os lados retos. Entretanto, podem ocorrer defeitos de impressão, devidos ao afundamento ou à aderência do metal em volta das faces do penetrador.



Quando ocorrem esses defeitos, embora as medidas das diagonais sejam iguais, as áreas de impressão são diferentes.



Vantagens e limitações

Vantagens:

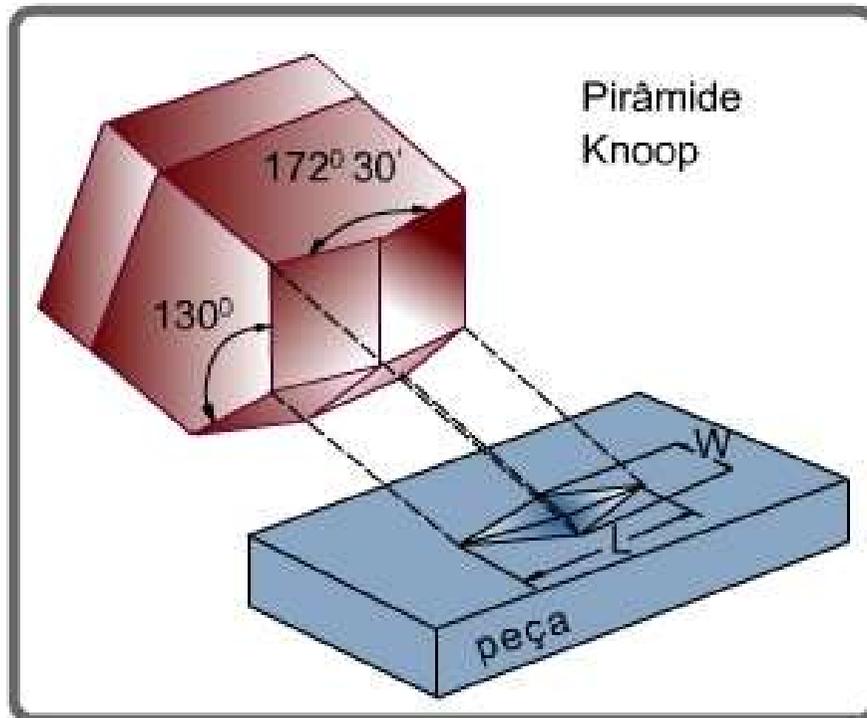
- escala contínua de dureza;
- impressões muito pequenas que não inutilizam a peça;
- grande precisão das medidas: muito utilizada em pesquisa;
- aplicação de toda a gama de durezas encontradas nos diferentes materiais;
- deformação nula do penetrador (diamante);
- aplicação em qualquer espessura de material podendo portanto medir durezas superficiais;
- diversas formulações de conversões para outras escalas.

Limitações:

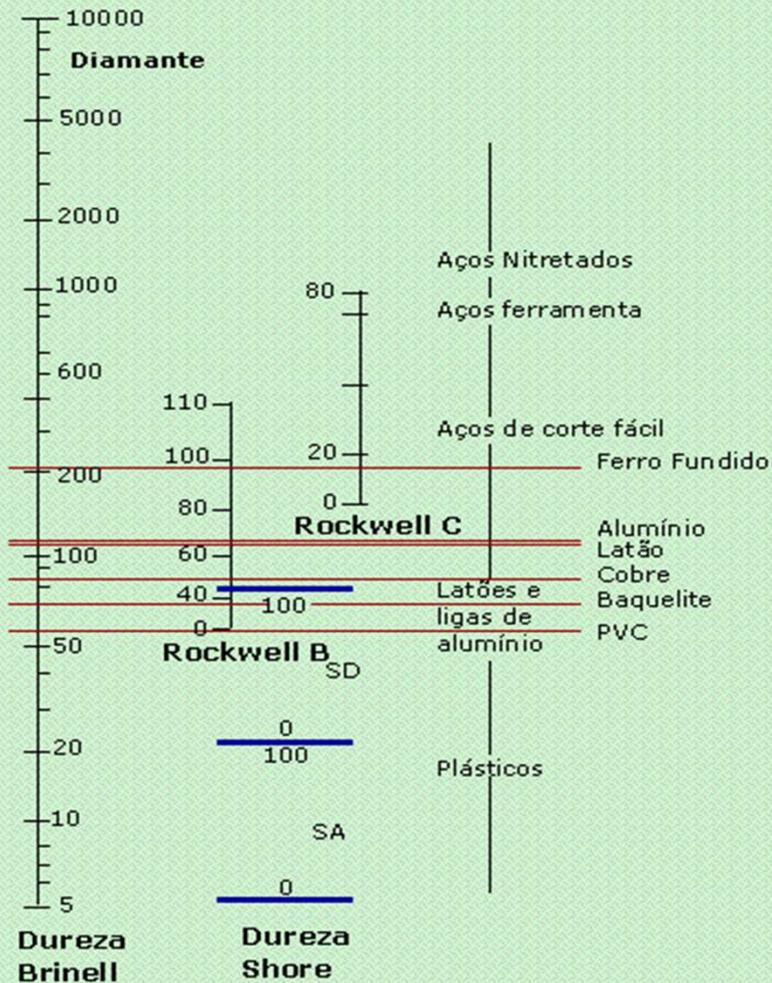
- morosidade do ensaio;
- exige preparação cuidadosa da superfície para tornar nítida a impressão;
- processo muito caro.

Ensaio de dureza Knoop

Microdureza Knoop: utiliza o mesmo princípio de ensaio de dureza Vickers, mas o penetrador possui geometria diferente



Comparação aproximada de escalas de dureza



Menu

Sair Vickers Shore Brinell Rockwell Resistência a Tração
Creditos

Conversão de Dureza

Norma SAE J-417 para aços

Combustol

<http://www.combustol.com.br>

Rua Estrada Turística do Jaraguá, 358 - (Km 15,5 da Via Anhanguera)
CEP: 05159-900 - São Paulo - SP Brasil
Tel: 55 (11) 3906-3000 / 3906-3052 / 3906-3002

Brinell - Esfera de Aço - 3000 kg/10mm

Dureza Brinell Esfera de aço
Carga de 3000 kg esfera de 10mm

Dureza Rockwell	Escala A	63,8
	Escala B	
	Escala C	27,1
	Escala 15N	73,4
Superficial	Escala 30N	47,8
	Escala 45N	27,9
Dureza Vickers		280
Dureza Brinell	Esfera de tungstênio	265
Dureza shore		40
Resistencia a tração	KSI	129
	Kg/mm2	90,7

