

2 – MEDIDAS DE DUREZA

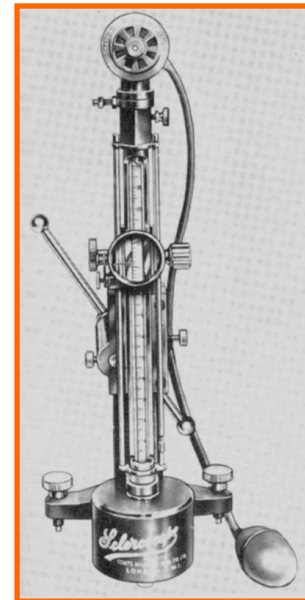


Conceito de Dureza:

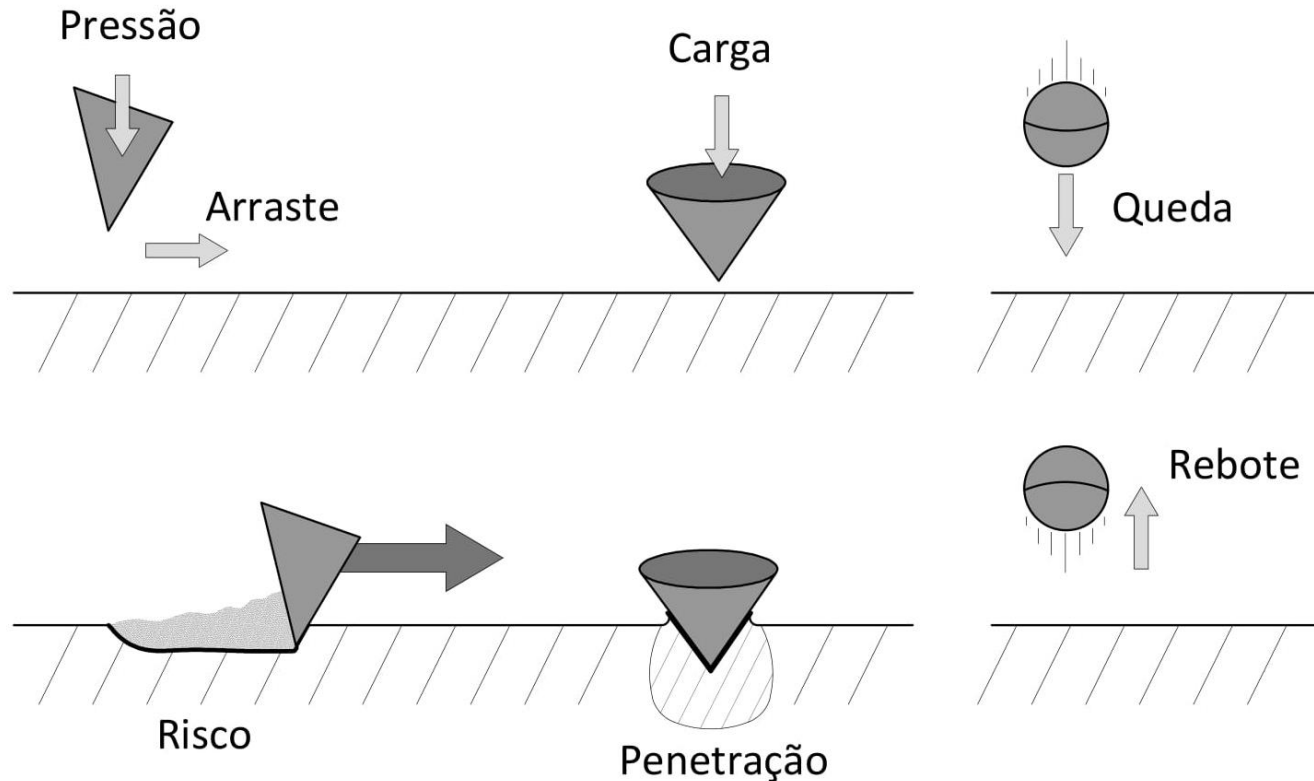
- Não há uma definição precisa
- Medidas resultam em números arbitrários que dependem do tipo de ensaio
- Engenharia mecânica e de materiais → Resistência à deformação plástica
- ♦ *Métodos mais simples e rápidos para caracterização mecânica dos materiais*
- ♦ *A dureza pode ser mandatória em especificação e controle de qualidade*

Principais Tipos de Ensaio:

- Risco
- Rebote
- Penetração



Principais modos de se medir a dureza



Dureza por Risco:

- Friedrich Mohs (1822) → Mineralogia
- Testes Manuais Simples
- Não adequada para metais de alta dureza



1 - Talco



2 - Gipsita



3 - Calcita



4 - Fluorita



5 - Apatita



6 – Ortoclásio



7 - Quartzo



8 - Topázio



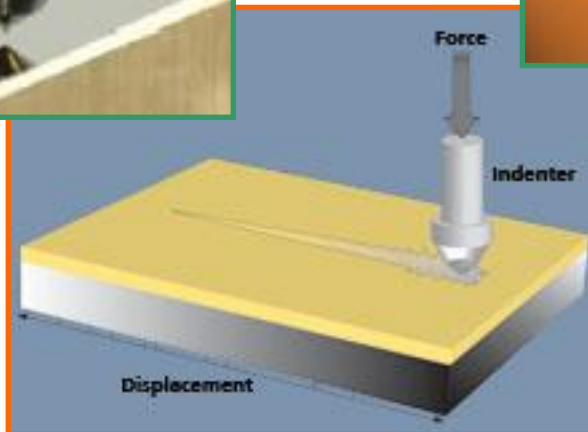
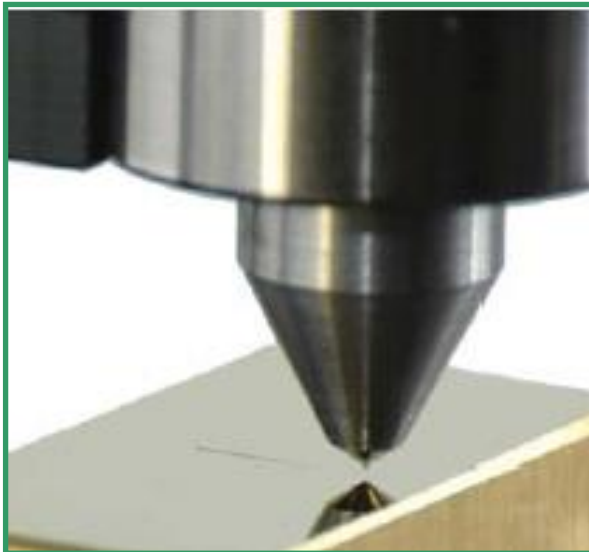
9 - Corindo



10 - Diamante

Aplicação de ensaio ao risco:

- Propriedades mecânicas de *coatings* superficiais



Hardness			
Vickers or Brinell	Mohs		
3000	10	Diamond	
Tantalum carbide	2000		
Alumina ceramics	9	Corundum	
Zircon ceramics	1000	8	Topaz
Polycrystalline glass			
Manganese steels	500	7	Quartz
Titanium	300	6	Feldspar
Carbon steels	200	5	Apatite
Aluminum	100	4	Fluorite
Magnesium	50	3	Calcite
	30	2	Gypsum
	20	1	Talc
Hard lead alloys	10		
Soft lead	5		
	3		
	2		

Dureza por Rebote:

- Ensaio Dinâmico (pêndulo ou queda livre)
- Martel (1895) → Êmbolo com Penetrador



$$\text{Dureza} = m \cdot h / V$$

- Shore (1907) → Altura de Rebote de martelo

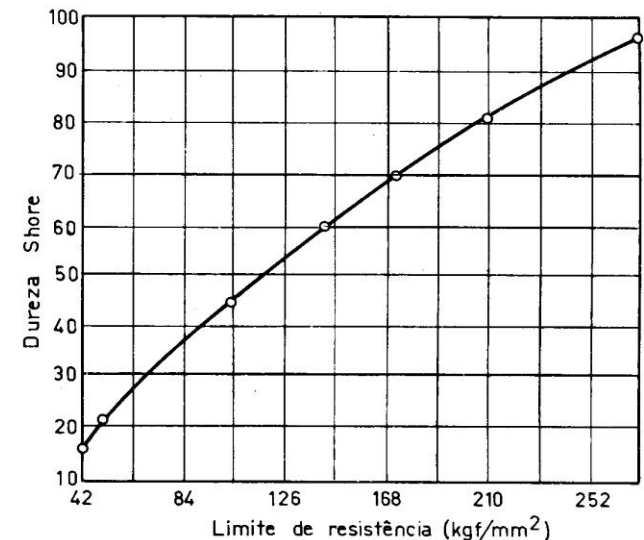
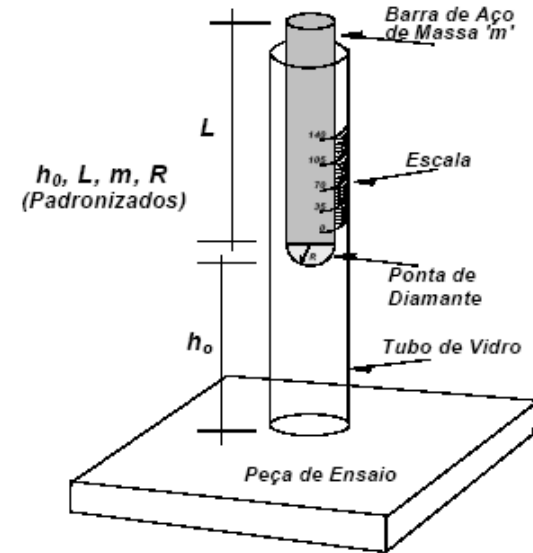


Tubo graduado de 0 a 140

- Leeb (1975) → Relação entre Velocidades



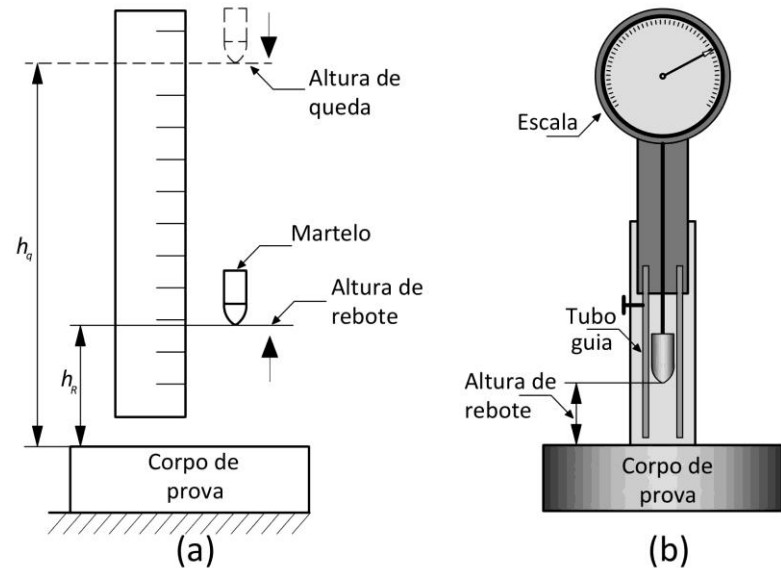
$$HL = (v_R / v_I) \cdot 1000$$



Dureza por Rebote:

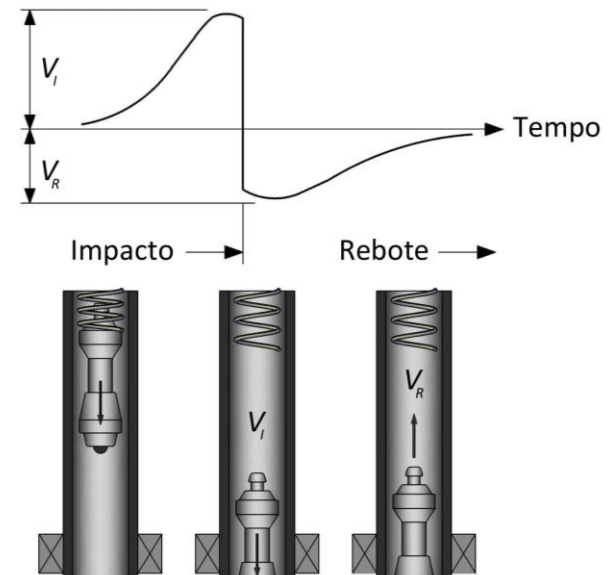
Dureza Shore:

- ✓ **Norma ASTM E 448**
- ✓ **Esfera ou barra arredondada**
- ✓ **Posição vertical**
- ✓ **Ensaio em aços endurecidos**
- ✓ **Máquina leve e portátil**
- ✓ **Uso em peças acabadas grandes**



Dureza Leeb:

- ✓ **Norma ASTM A 956**
- ✓ **Martelo é impulsionado por uma mola**
- ✓ **Sensor mede a velocidade**
- ✓ **Ensaio dura menos de 2 segundos**
- ✓ **Peça deve ter no mínimo 5 kg**
- ✓ **Recomendado para situações em que não é viável enviar amostras ao laboratório**



Dureza por Penetração:

- Impressão Estática por um Penetrador
- Rapidez e Baixo Custo
- Eventualmente Não-Destrutivo
- Estimativa de Outras Propriedades

Alguns Métodos Padronizados (ASTM):

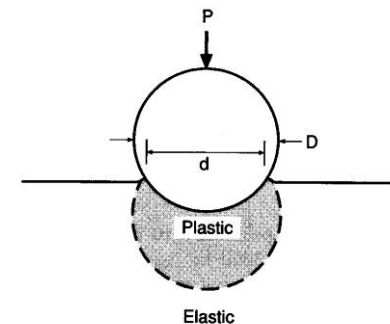
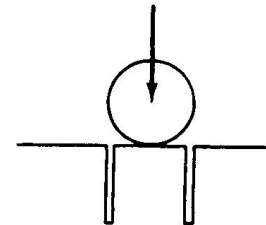
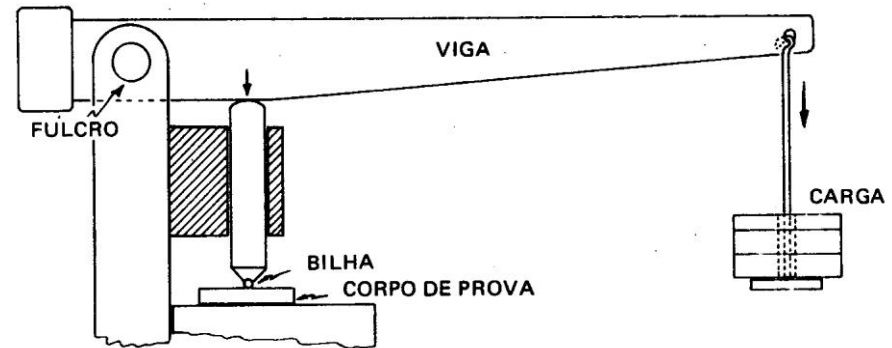
- *Brinell (E 10)*
- *Rockwell (E 18)*
- *Vickers (E 92)*
- *Tabelas de Conversão (E 140)*
- *Microdureza Vickers e Knoop (E 384)*

Valores de Dureza Levam em Conta:

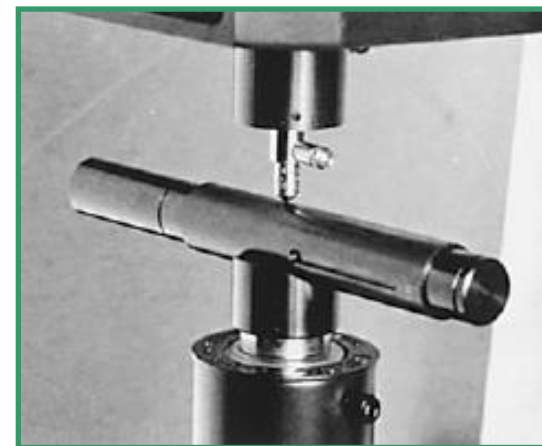
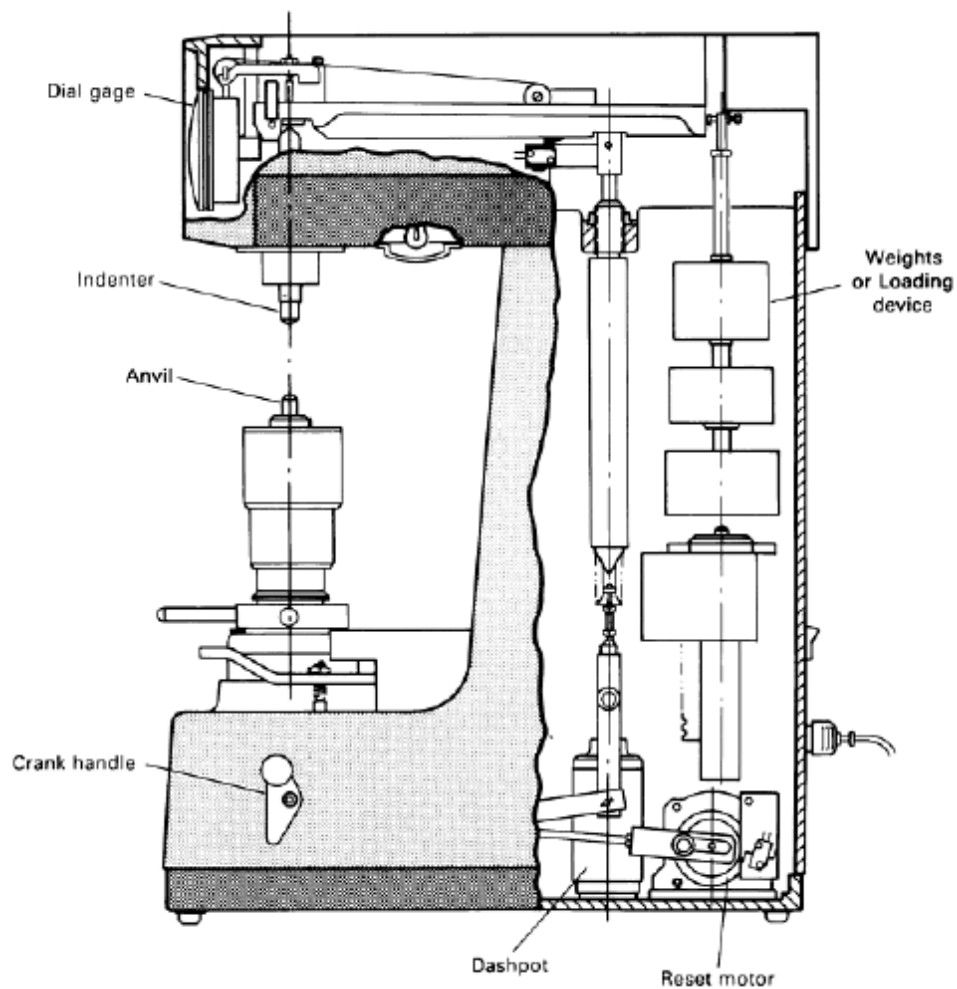
- *Superfície da Impressão*
- *Profundidade de Penetração*

Teoria da Plasticidade:

$$\sigma_y = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \approx 3\sigma_0$$

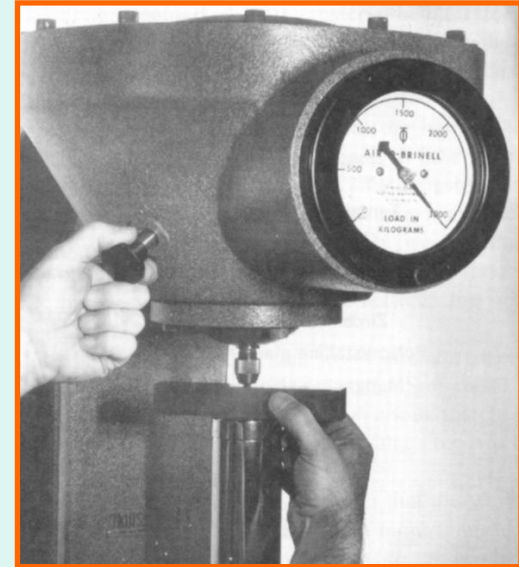


Dureza por Penetração: Equipamento e cuidados gerais:



Dureza Brinell:

- Proposto por J. A. Brinell em 1900
- Penetrador esférico (diâmetro D)
- Metal com Superfície Plana, Polida e Limpa
- Aplica-se Carga Q durante Tempo t
- Impressão com formato de Calota Esférica
- Toma-se 2 leituras da Impressão d
- Definida em kgf/mm^2 (Carga/Área Contato)



Número de Dureza Brinell:

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

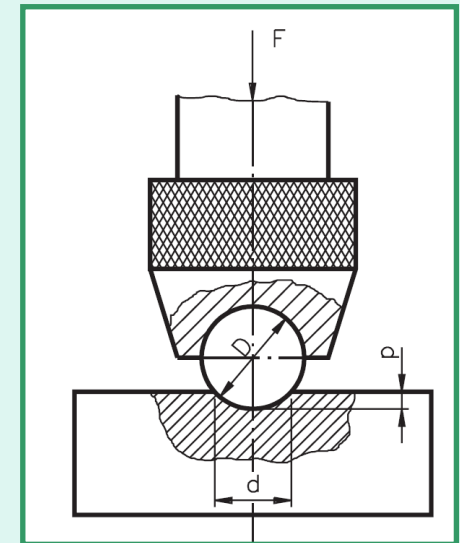
onde p é a profundidade da impressão (não medida no ensaio)

Padrão (pode variar em alguns casos):

$$\checkmark Q = 3.000 \text{ kgf}$$

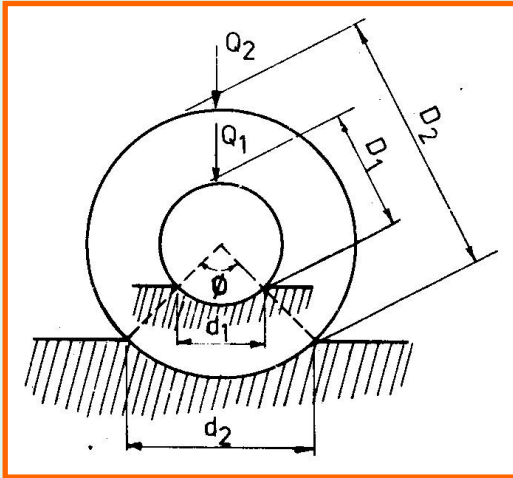
$$\checkmark D = 10 \text{ mm}$$

$$\checkmark t = 30 \text{ s}$$



Dureza Brinell:

- Os padrões de Q , D e t não são adequados para todos os metais.
 - Problema: comparação de durezas obtidas com diferentes valores de Q e D
 - Solução: impressões semelhantes (mesmo ϕ) devem ter o mesmo valor de HBN



É fácil mostrar que:

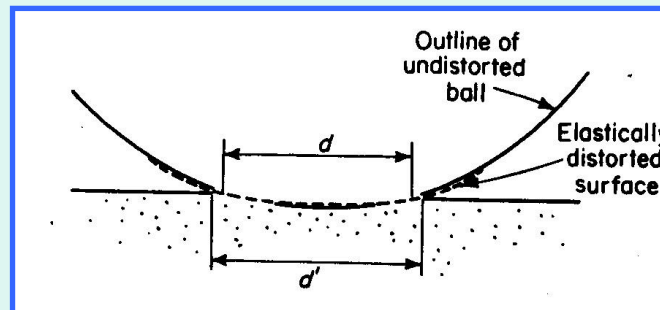
$$HB = \frac{2P}{\pi D^2 (1 - \cos \phi)}$$

Portanto, deve valer:

$$\frac{Q_1}{D_1^2} = \frac{Q_2}{D_2^2}$$



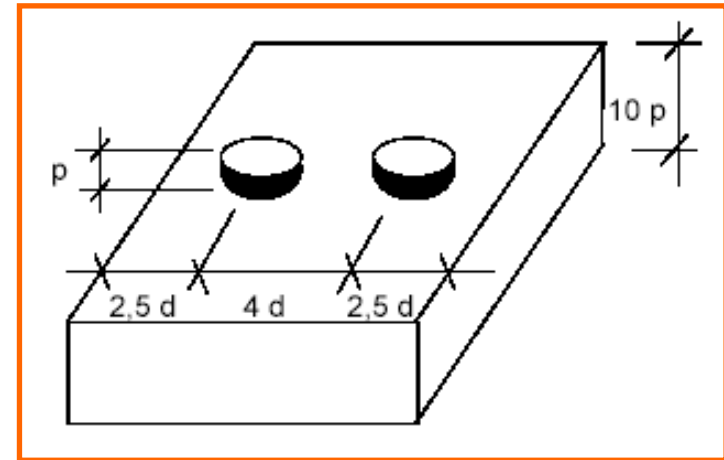
- Problema: deformação elástica da esfera se o corpo-de-prova for muito duro
- Solução: esfera de WC



Dureza Brinell:

Cuidados e Restrições:

- ✓ *Afastamento da borda 2,5 d*
- ✓ *Espessura da amostra 10 d*
- ✓ *Distância de impressões 4 d (ferrosos)*
- ✓ *Raio Curvatura mínimo 5 D*

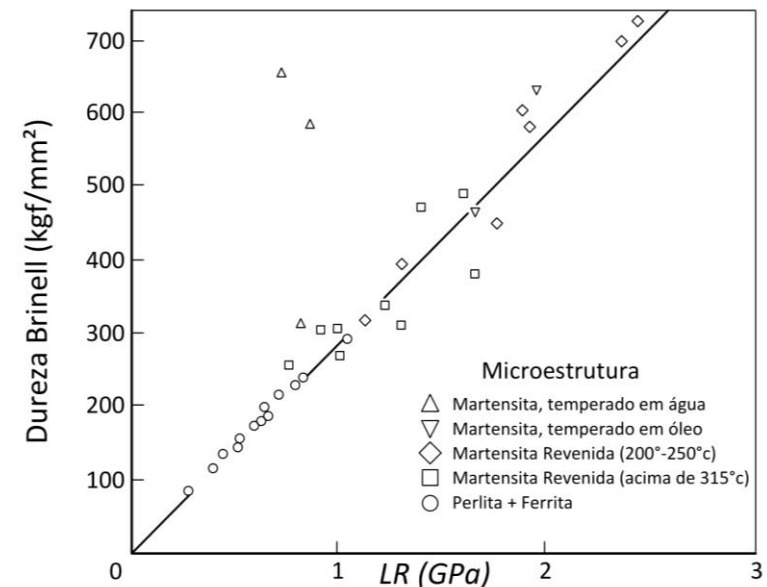


Condições do ensaio com D = 10 mm:

Carga (kgf)	Tempo (s)	Aplicação Típica	Relação P/D^2
3000	10-15	Aço e Ferro Fundido	30
500	30	Ligas de Cobre e Alumínio	5
100	30	Ligas de Chumbo e Estanho	1

Relação entre dureza Brinell e resistência à tração:

$$LR \text{ (MPa)} = 3,45 \text{ HB (kgf/mm}^2\text{)}$$

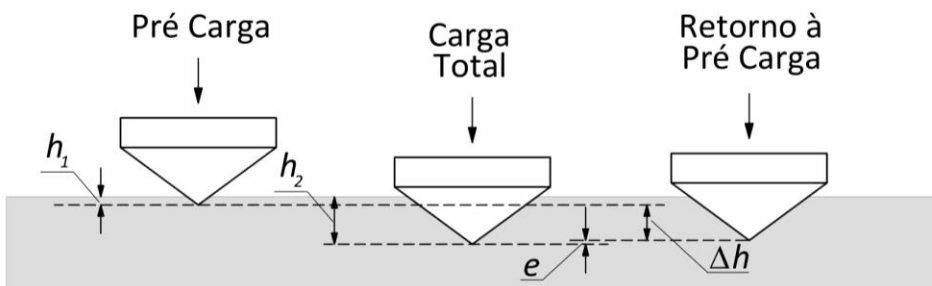


Dureza Rockwell:

- Elaborado por Rockwell em 1922
- Baseia-se na Profundidade de Impressão
- Penetrador Esférico ou Cônico (*Brale*)
- Resultado é lido Diretamente na Máquina
- O Valor da Dureza é Adimensional
- Escalas com máximo 100 (*Brale*) ou 130
- Notação: HRx , onde x é a escala (A, B etc)
- Adequado para Linhas de Produção
- Também usado para Dureza Superficial



$$HR = M - \frac{\Delta h}{0,002}$$



Vantagens:

- Mais rápido e livre de erros do operador
- Pequeno tamanho da impressão
- Distingue pequenas diferenças de dureza

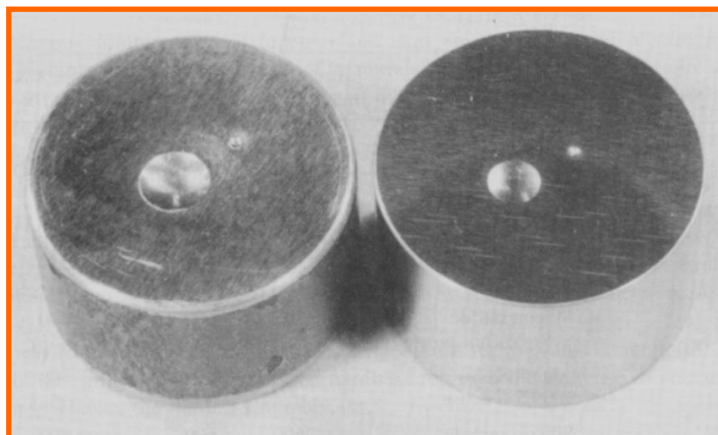
Desvantagem:

- Diversas escalas independentes (difícil correlação)

Dureza Rockwell:



Comparação de impressões Brinell e Rockwell em dois aços distintos:



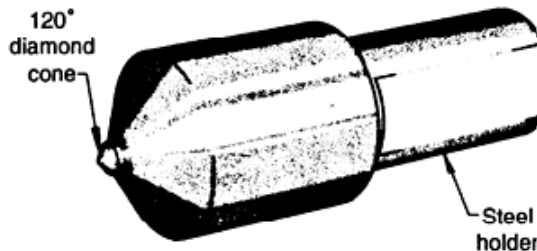
Dureza Rockwell:

COMMONLY USED ROCKWELL HARDNESS SCALES

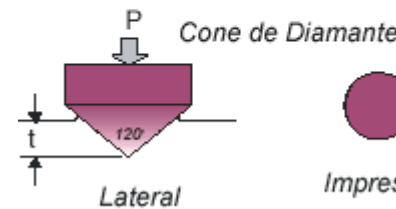
Symbol, HRX $X =$	Penetrator Diameter if Ball, mm (in)	Load kg	Typical Application
A	Diamond point	60	Tool materials
D	Diamond point	100	Cast irons, sheet steels
C	Diamond point	150	Steels, hard cast irons, Ti alloys
B	1.588 (0.0625)	100	Soft steels, Cu and Al alloys
E	3.175 (0.125)	100	Al and Mg alloys, other soft metals; reinforced polymers
M	6.35 (0.250)	100	Very soft metals; high modulus polymers
R	12.70 (0.500)	60	Very soft metals; low modulus polymers



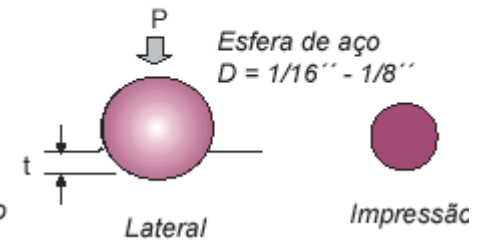
Durômetro Rockwell com adaptador “pescoço de ganso”



Rockwell (A, C, D)
P (60 kgf, 150 kgf, 100 kgf)



Rockwell (B, F, G)
P (100 kgf, 60 kgf, 150 kgf)



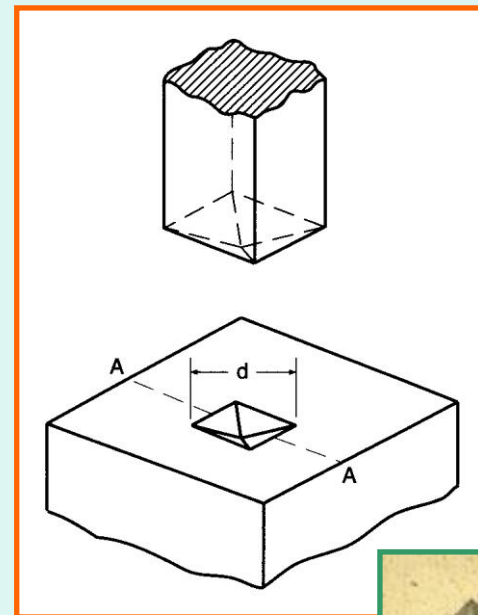
Dureza Vickers:

- Introduzido em 1925 por Smith e Sandland
- Penetrador: Pirâmide de Diamante (136°)
- Carga entre 1 e 120 *kgf*
- Impressão em forma de Losango
- Definida em *kgf/mm²* (Carga/Área Superfície)
- Mais usado em Pesquisas



Valor da dureza Vickers:

$$HVN = \frac{1,8544Q}{d^2}$$



Vantagens:

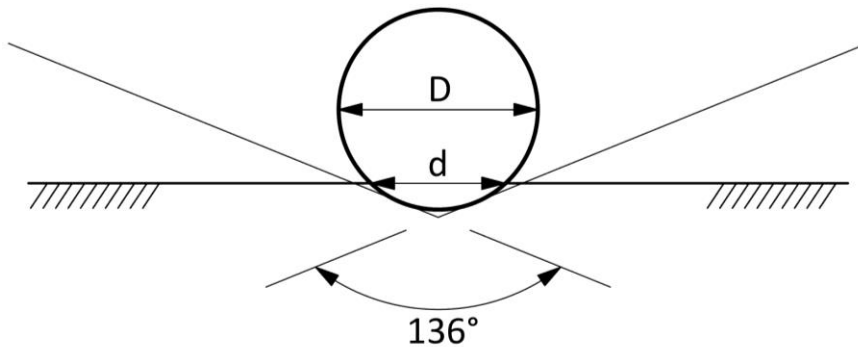
- Impressões geometricamente similares (menor dependência entre HVN e Carga)
- Escala contínua para todas faixas de dureza
- Penetrador indeformável

Desvantagem:

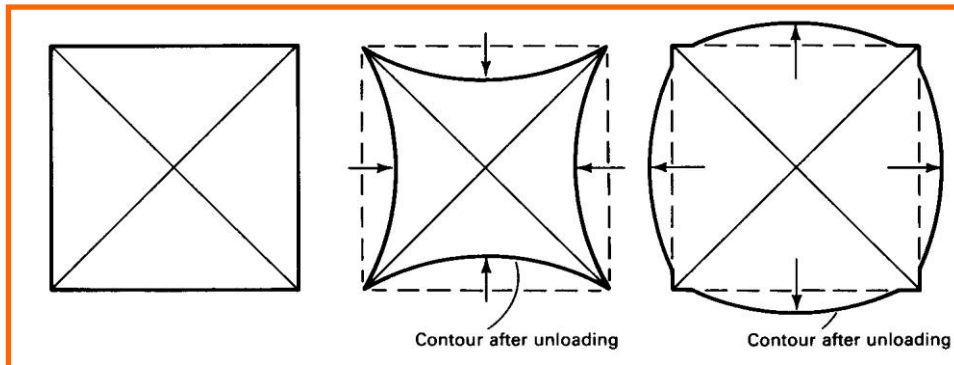
- Mais demorado, exige preparo cuidadoso

Dureza Vickers:

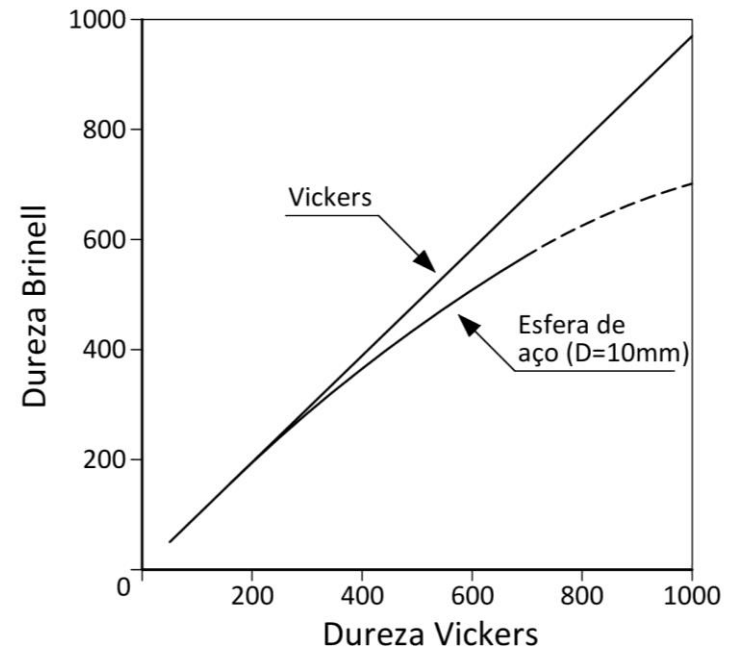
Escolha do penetrador Vickers: ângulo formado pelas retas tangentes à esfera Brinell quando $d/D = 0,375$



Anomalias encontradas nas impressões:



Comparação de resultados de dureza Vickers e Brinell:

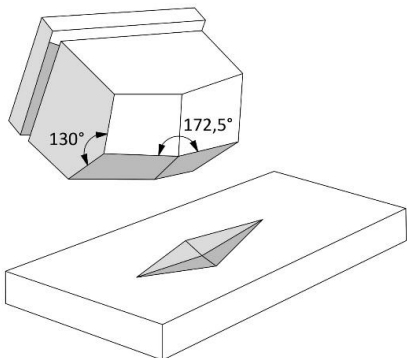
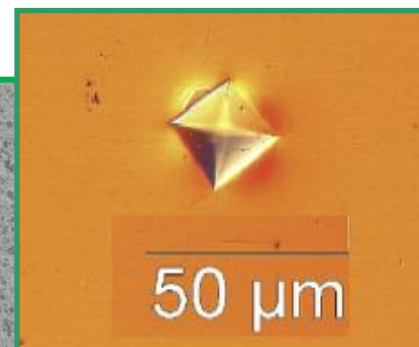
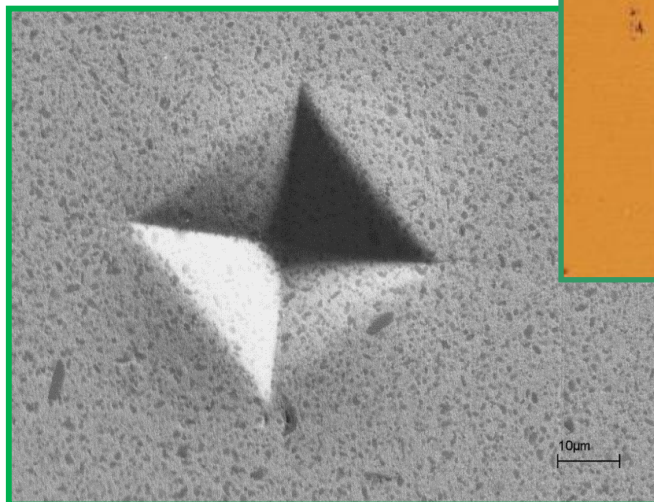


Microcureza Vickers e Knoop:

Problemas metalúrgicos

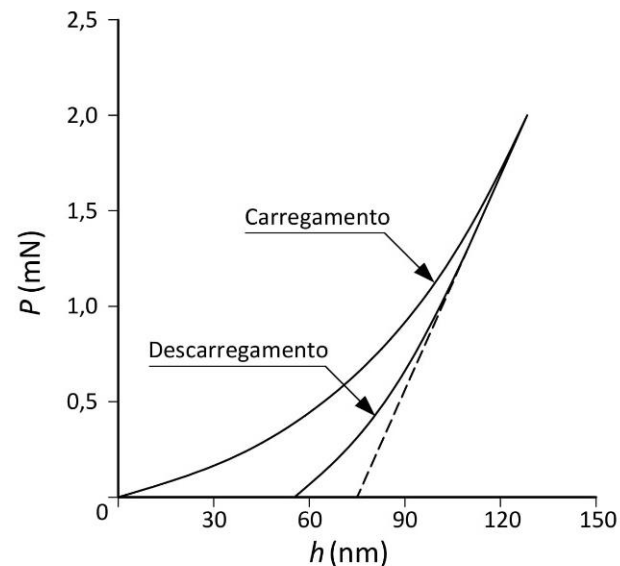


Avaliar pequenas áreas ($Q < 200 \text{ gf}$)



$$HK = 14,229 \frac{P}{d_M^2}$$

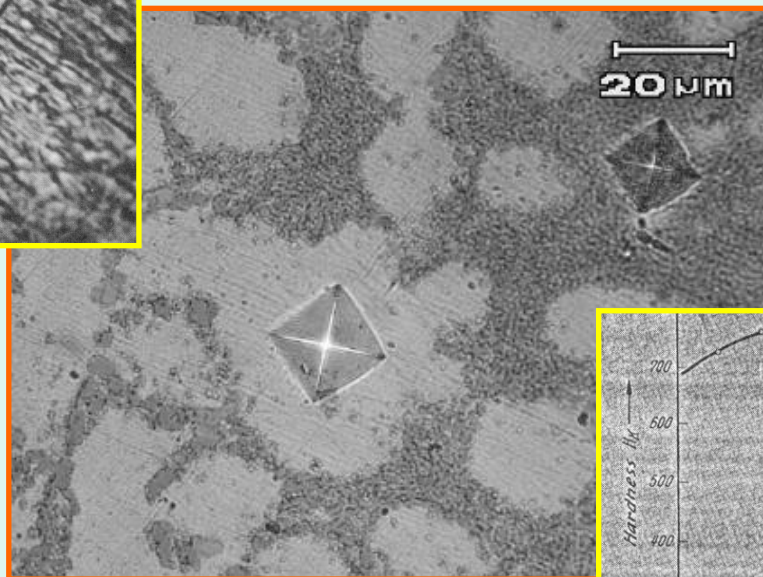
Ensaio instrumentado:



Exemplos – Microdureza:

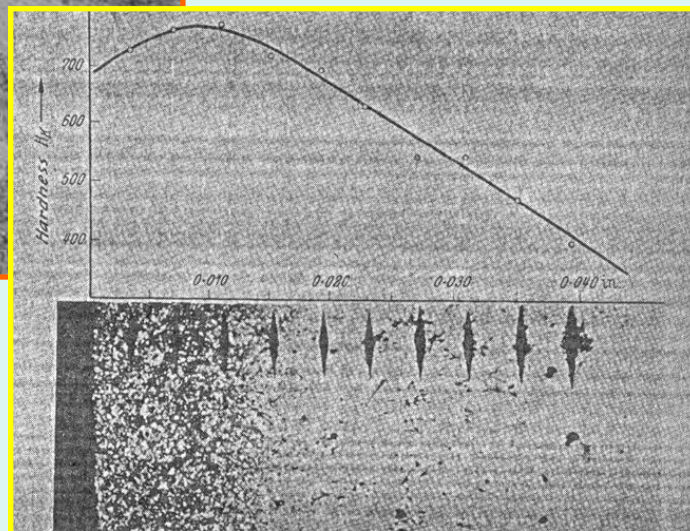


Avaliação de metal eletrodepositado



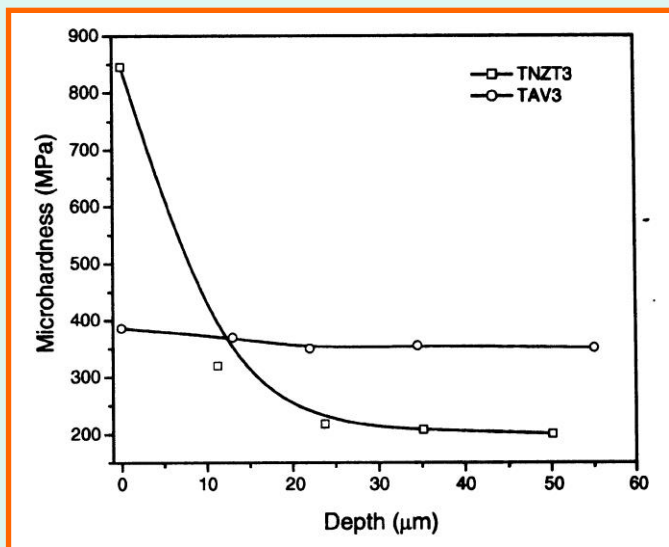
**Liga de Al-Si hipoeutética:
Fase clara (rica em Al);
Fase escura (eutético)**

**Endurecimento superficial
de aço (microdureza Knoop)**

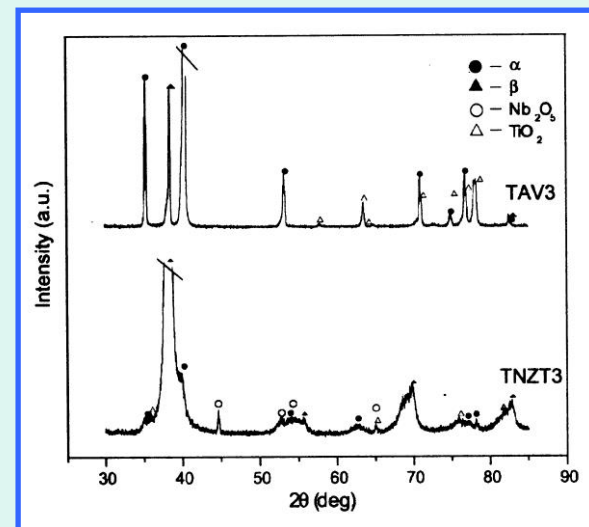


Exemplo – Microdureza e Resistência ao Desgaste:

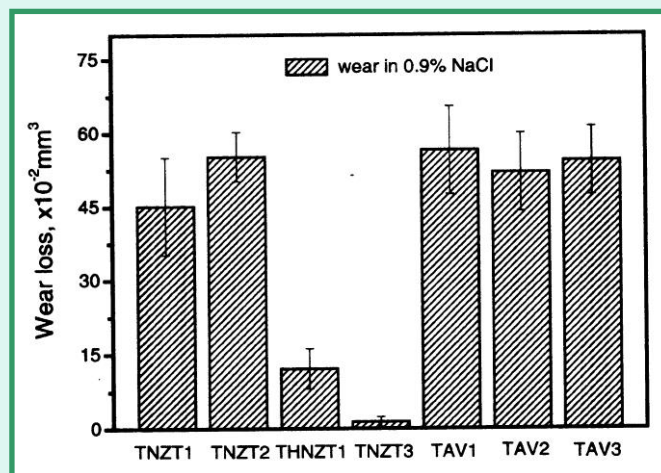
- **Ligas para aplicações biomédicas:**
(TAV = Ti-6Al-4V - TNZT = Ti-29Nb-13Ta-4,6Zr)
- **Efeito de Oxidação ao Ar**



Variação da microdureza com a profundidade

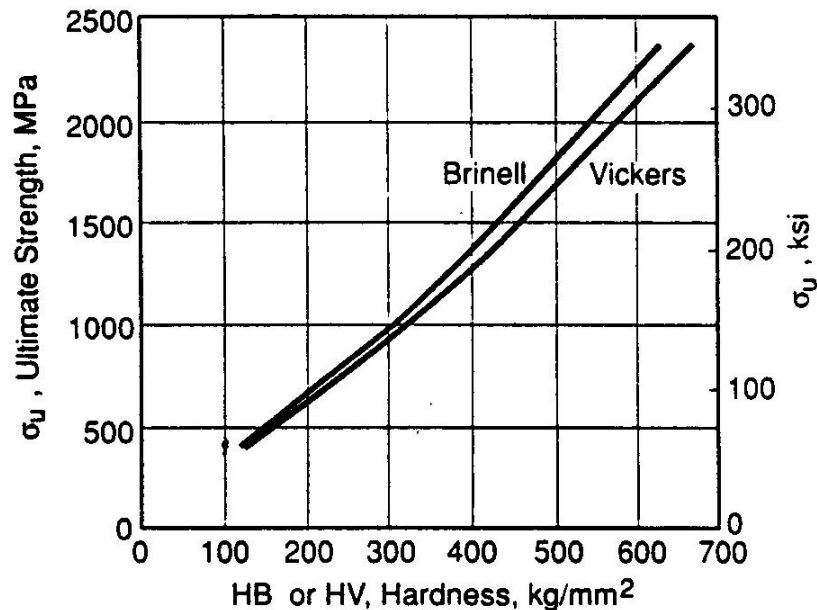


Difratogramas das ligas após os tratamentos



Ensaio de desgaste pin-on-disc

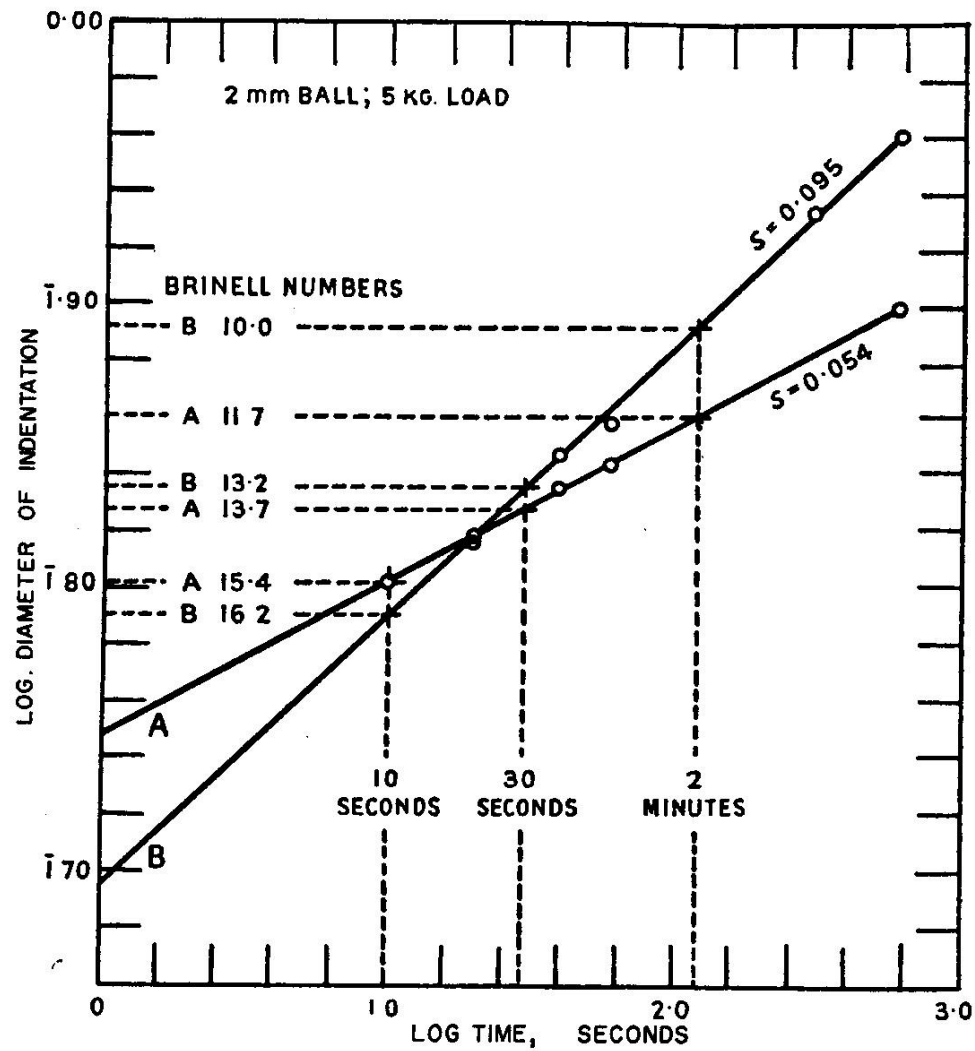
Relação entre Dureza e Resistência à Tração:



APPROXIMATE EQUIVALENT
HARDNESS NUMBERS AND ULTIMATE TENSILE
STRENGTHS FOR CARBON AND ALLOY STEELS

Brinell <i>HB</i>	Vickers <i>HV</i>	Rockwell		Ultimate, σ_u	
		<i>HRB</i>	<i>HRC</i>	MPa	ksi
627	667	—	58.7	2393	347
578	615	—	56.0	2158	313
534	569	—	53.5	1986	288
495	528	—	51.0	1813	263
461	491	—	48.5	1669	242
429	455	—	45.7	1517	220
401	425	—	43.1	1393	202
375	396	—	40.4	1267	184
341	360	—	36.6	1131	164
311	328	—	33.1	1027	149
277	292	—	28.8	924	134
241	253	100	22.8	800	116
217	228	96.4	—	724	105
197	207	92.8	—	655	95
179	188	89.0	—	600	87
159	167	83.9	—	538	78
143	150	78.6	—	490	71
131	137	74.2	—	448	65
116	122	67.6	—	400	58

Efeito da Fluência:



Mais Exemplos – Emprego do Ensaio de Dureza:

