



SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

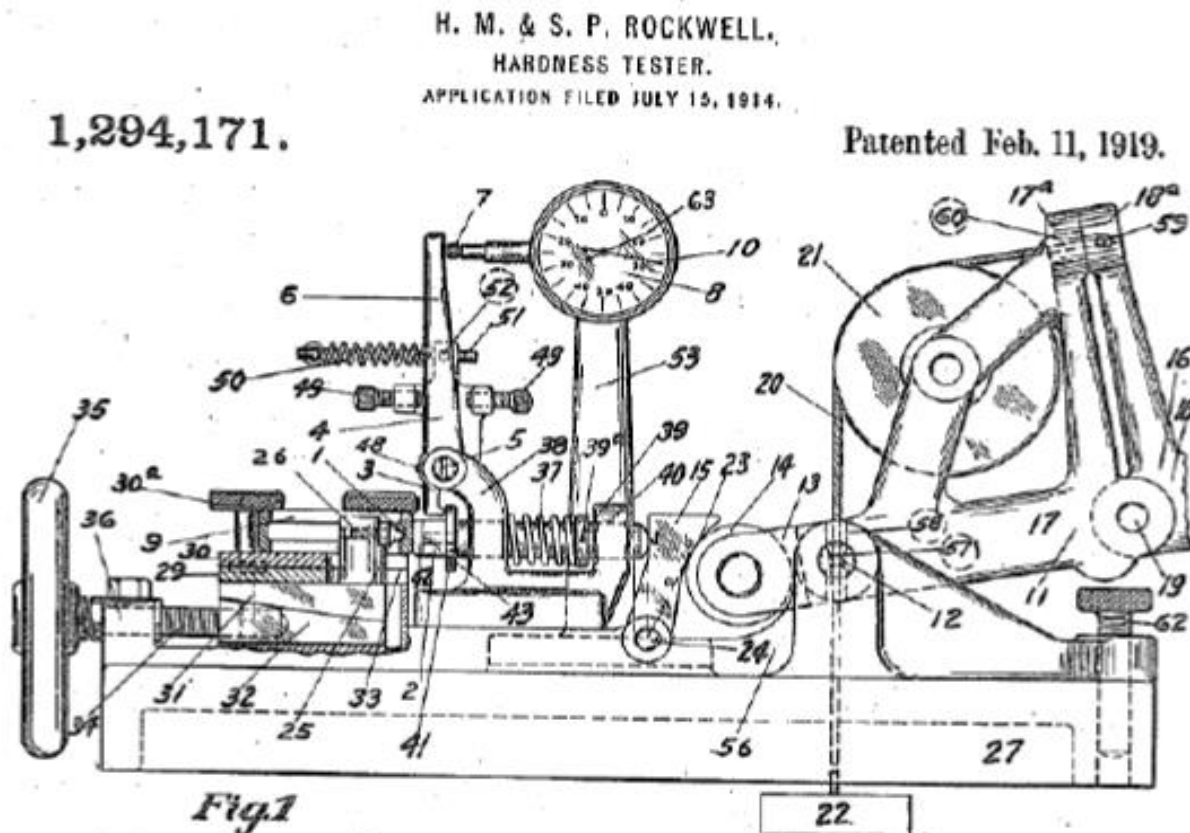
Prof. Dr. José Benedito Marcomini

ENSAIO DE DUREZA

ENSAIO DE DUREZA

- Mohs(1822) – capacidade de riscar;
- J.A. Brinell((1849-1925) – 1900 dureza por penetração;
- Os irmãos Stanley e Hugh Rockwell – 1919.

Um dos desenhos da primeira patente do durômetro Rockwell, de 1919.



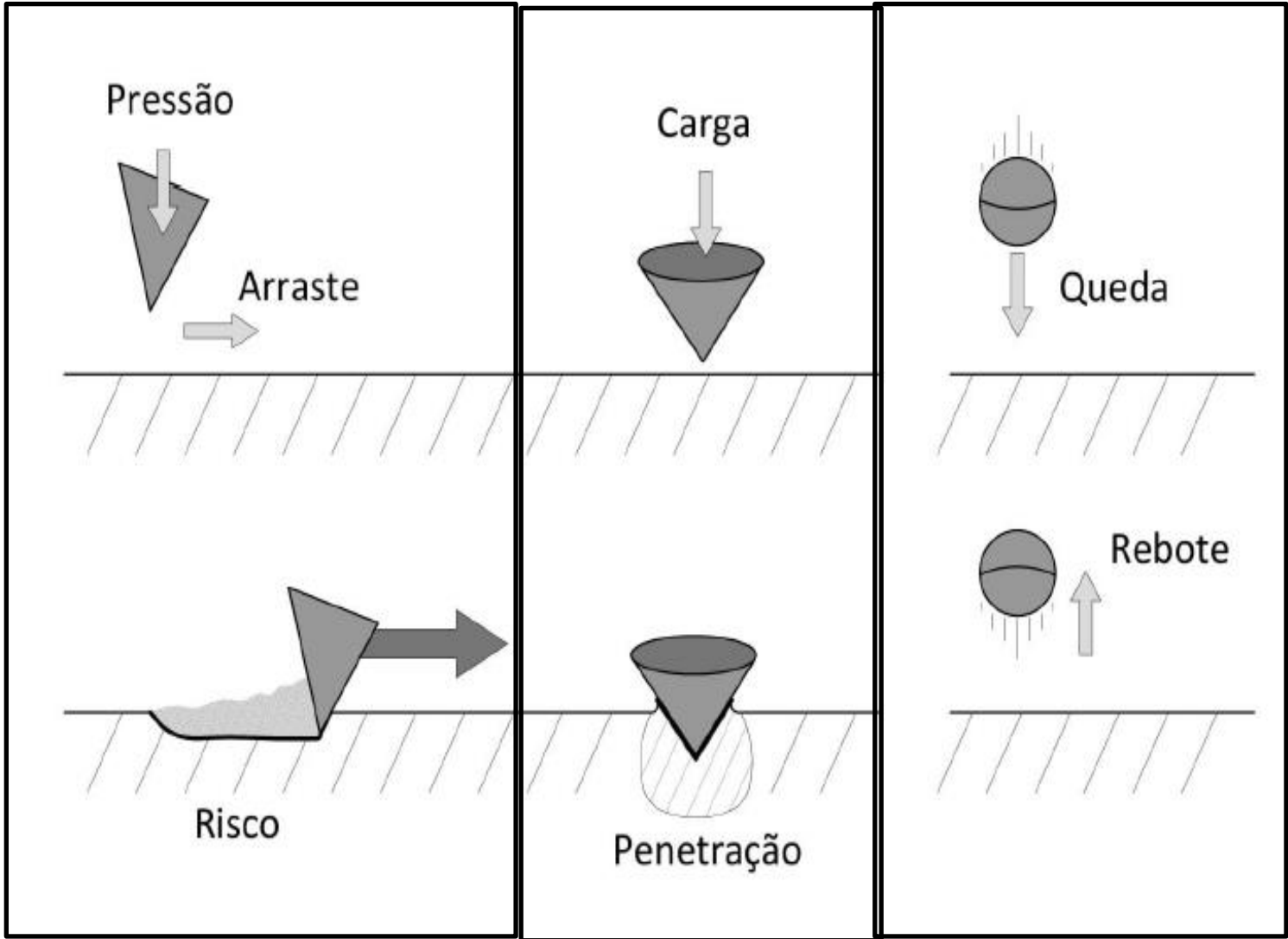
ENSAIO DE DUREZA

Métodos de medição:

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

Importância:

- Análise prévia-movimentação;
- Análise prévia- T.Térmico;
- Controle de qualidade. Ex: Trefilação.



ENSAIO DE 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

Deformação Elástica e
Deformação Plástica

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 |

AUMENTO DA DUREZA

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

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

Ex. aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 Mohs, a mesma dureza Mohs de um aço temperado.

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** do peso, **absorvida pelo CP**: diferença de **Energia potencial**.

Bancada



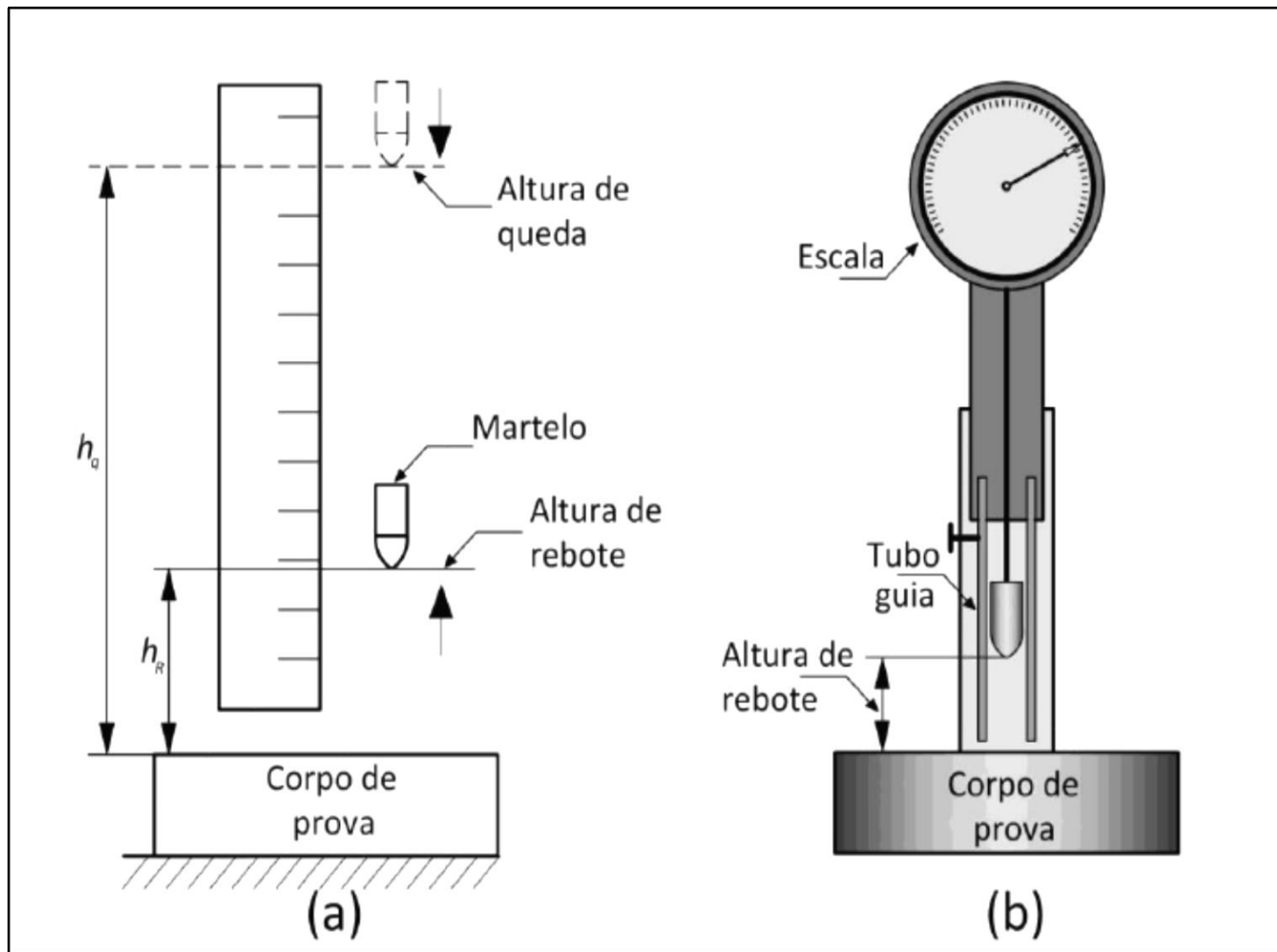
Portáteis



Dureza Shore (HS) – choque ou ressalto

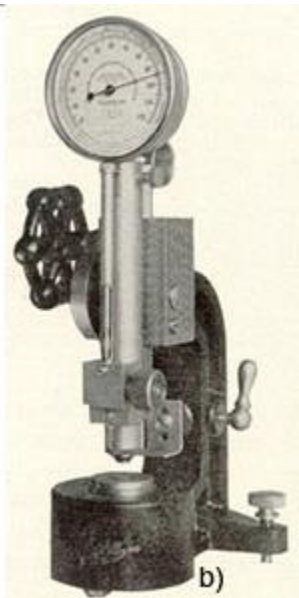
Características e vantagens

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



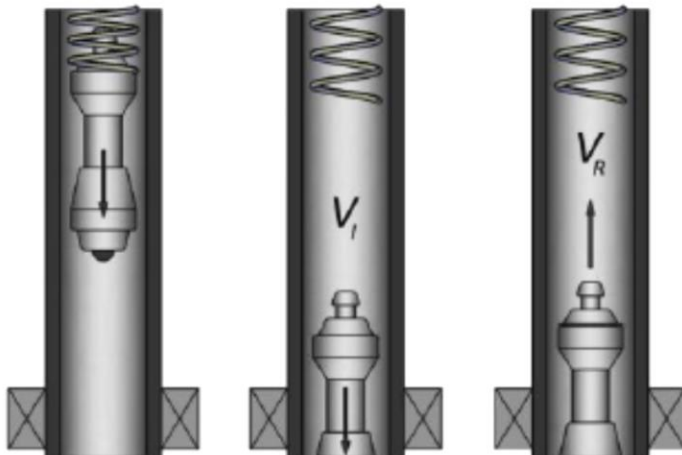
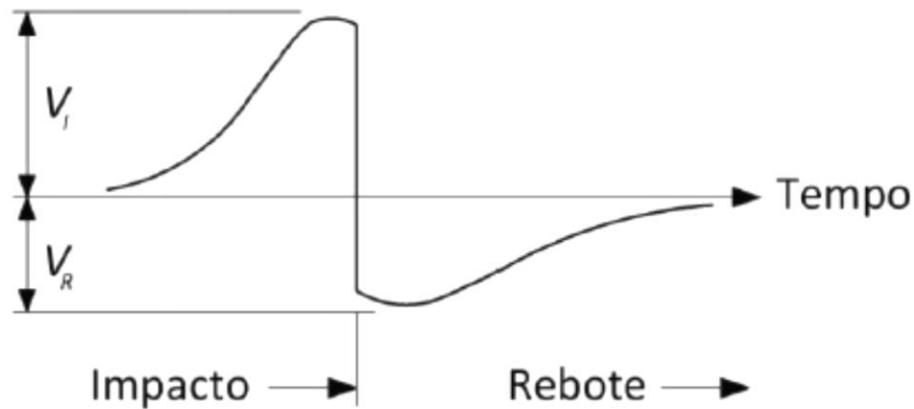
Dureza Shore (rebote). Escleroscópico, modelo clássico criado em 1905

Dureza Shore (HS) – choque ou ressalto



Escleroscópico Shore

Em 1975, Leeb e Brandestini desenvolveram a medida por meio de aparelhos portáteis. O ensaio é regido por normas como ASTM A956 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products e ISO/DIS 16859-1 Leeb hardness test Part 1: Test method.



$$HL = \frac{V_R}{V_I} \cdot 1000$$

EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS MODERNOS

DynaPOCKET



DynaMIC



MIC 20



APLICAÇÃO

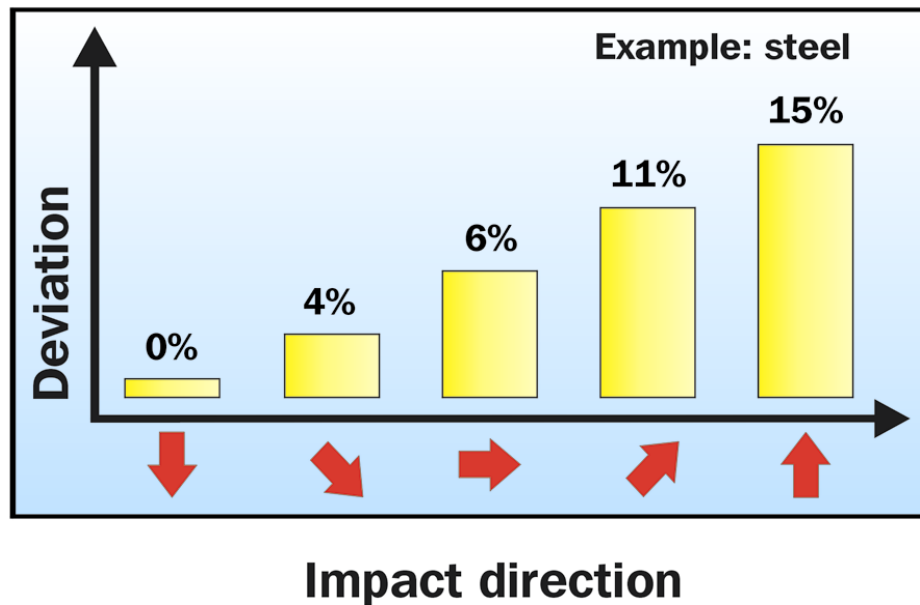


ROGÉRIO CENI



Influência da direção da sonda

Dependendo da direção do impacto, ocorre uma redução da medida real de Dureza, conforme o gráfico de barras abaixo

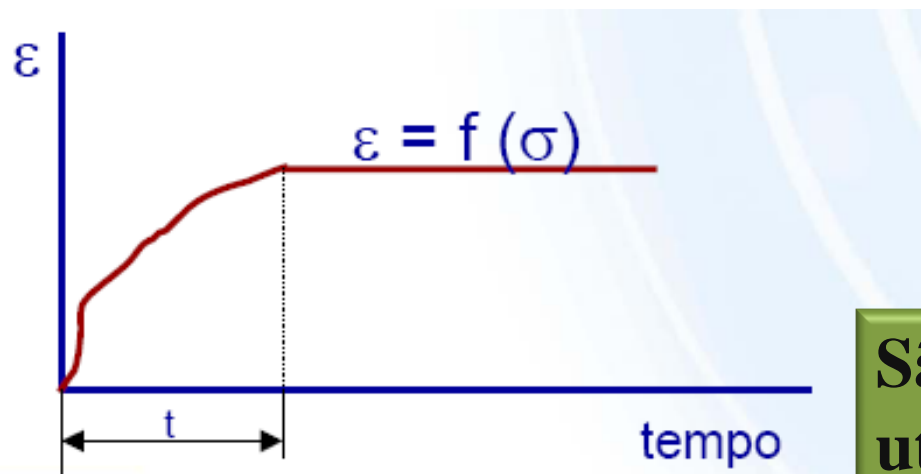


Aparelhos modernos (DynaMIC / DynaPOCKET / MIC 20) possuem um autobalanceamento: correção automática.

Dureza por penetração (princípios gerais)

Cuidados na realização dos ensaios:

- **Perpendicularidade** entre a **direção** de aplicação da 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**).



Valores de t:

Mg – 60s

Aços – 10s

São os ensaios de dureza mais utilizados na atualidade

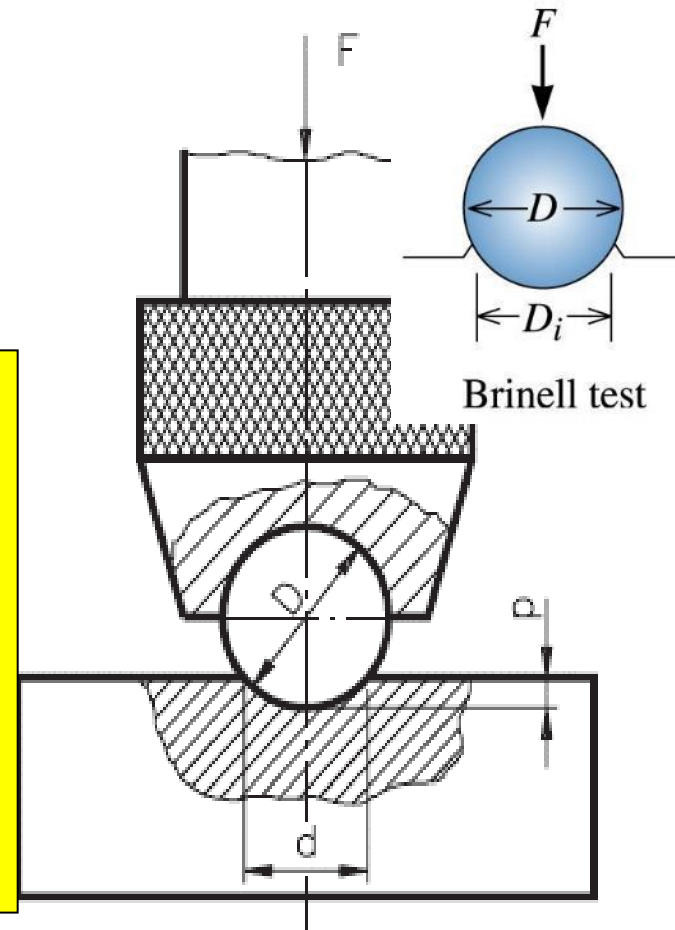
Dureza Brinell (HB) – Ano 1900

Consiste em comprimir lentamente uma **esfera de carbeto 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, 2.5, 5** ou **10** mm (NBR NM187-1999) e/ou **1, 2.5, 5** e **10** (ASTM E10-2007)

Cargas: entre **500 e 3000 kg**

Tempo: entre **10 e 30 s**



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

P = prof. de impressão (da calota)

Dureza Brinell (HB)

Teste de Dureza
Brinell

Relação carga (F) – diâmetro do penetrador (D)

A relação carga aplicada e diâmetro do penetrador é dada por:

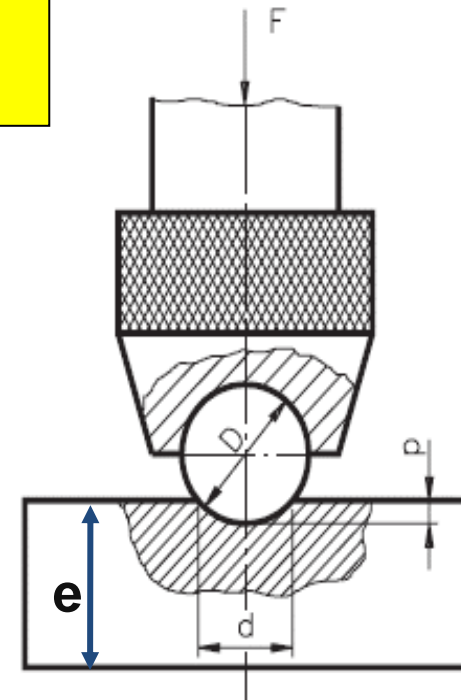
$$\frac{F}{D^2} = K = Cte.$$

(Fator de carga)

$\frac{F}{D^2}$	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

Dureza Brinell (HB)

O diâmetro da esfera (D) é determinado em função da espessura do CP ensaiado (e). No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota (p).



O quadro a seguir mostra os diâmetros de esfera mais usados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

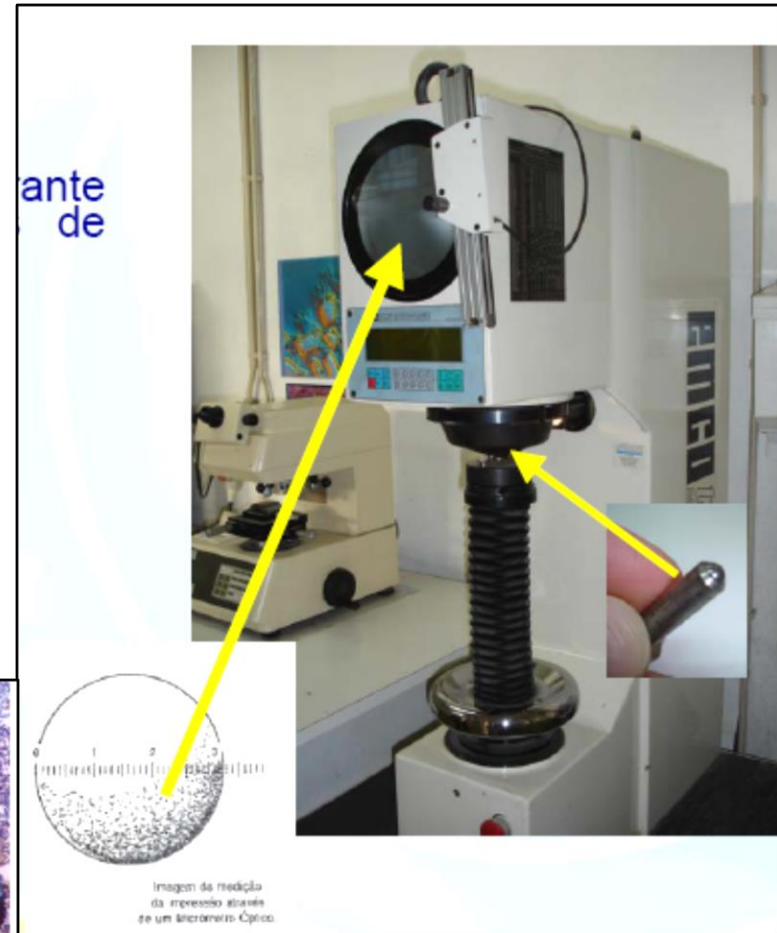
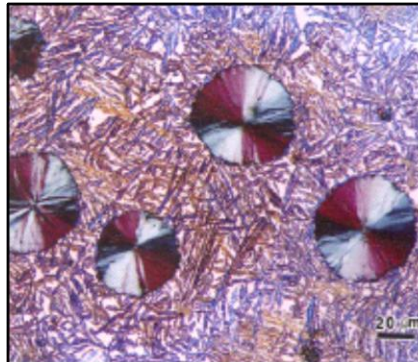
DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	F (kgf) = $30 D^2$	F (kgf) = $10 D^2$	F (kgf) = $5 D^2$	F (kgf) = $2,5 D^2$
10	3.000	1.000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187.5	62,5	31.25	15.625

Mecanismo de Medição Brinell

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

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

***medido com microscópio especial acoplado, utilizando uma escala gravada em sua ocular**



Dureza Brinell (HB)

A unidade kgf/mm^2 , que deveria ser sempre colocada após o valor de HB, é omitida, uma vez que a dureza Brinell não é um conceito físico satisfatório, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da calota.

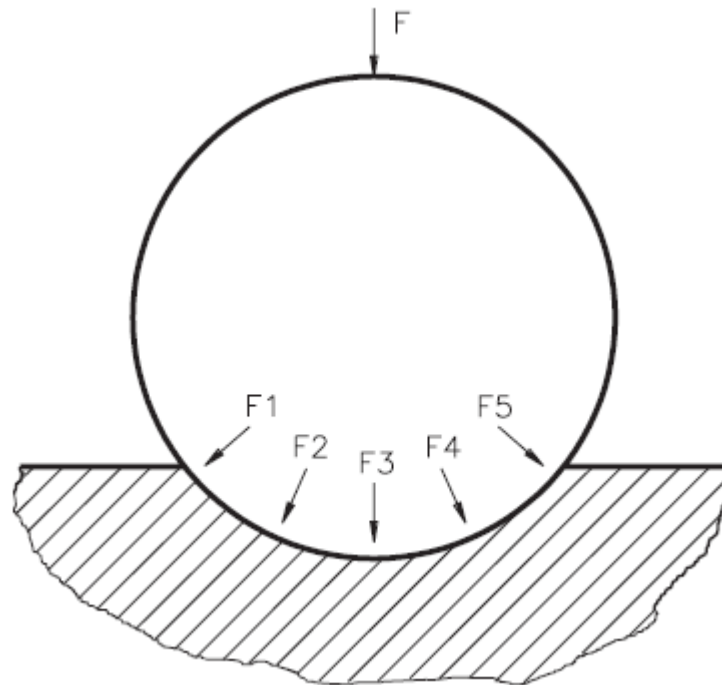


Tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão d.

DUREZA BRINELL EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA IMPRESSÃO (DIÂMETRO DA ESFERA DO PENETRADOR: 10 MM)			
d (mm)	HB (F = 3000 kgf)	d (mm)	HB (F = 3000 kgf)
2,75	(495)	4,05	223
2,80	(477)	4,10	217
2,85	(461)	4,15	212
2,90	444	4,20	207
2,95	429	4,25	201
3,00	415	4,30	197
3,05	401	4,35	192
3,10	388	4,40	187
3,15	375	4,45	183
3,20	363	4,50	179
3,25	352	4,55	174
3,30	341	4,60	170
3,35	331	4,65	167
3,40	321	4,70	163
3,45	311	4,75	159
3,50	302	4,80	156
3,55	293	4,85	152
3,60	285	4,90	149
3,65	277	4,95	146
3,70	269	5,00	143
3,75	262	5,10	137
3,80	255	5,20	131
3,85	248	5,30	126
3,90	241	5,40	121
3,95	235	5,50	116
4,00	229	5,60	111

Relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração

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 (aço carbono), 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
- 0,34 aços Cr-Mo

Dureza Brinell (HB)

Vantagens e limitações

Vantagens:

- **Estimativa** do limite de resistência à tração (σ_r);
- **Baixo custo** e **simples** operação;
- A **deformação produzida** não afeta o comportamento do material;
- Ensaio **pode ser considerado não destrutivo** (depende do **tamanho da impressão final, dimensões da peça e aplicação**)

Limitações:

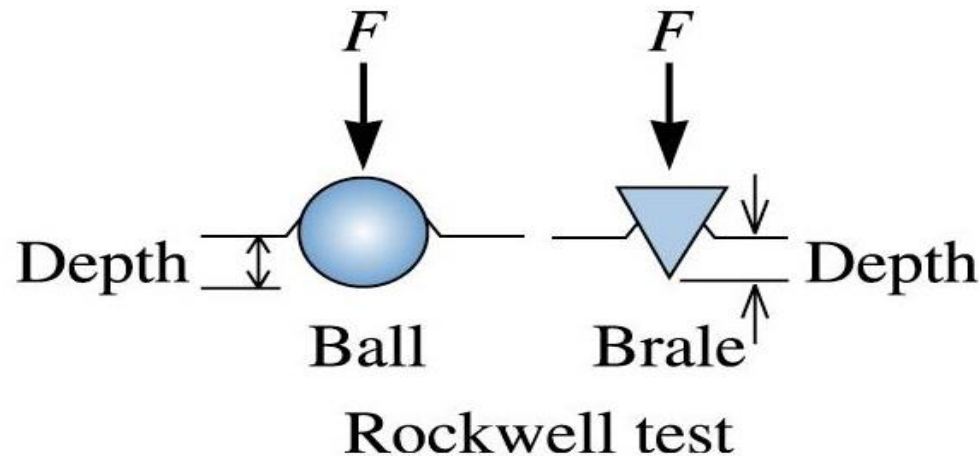
- **Não** é aplicável em peças **muito finas** e em materiais **muito duros**;
- Método **relativamente lento** para a produção industrial;
- A **impressão** obtida é muito **grande** para peças **acabadas**.

Dureza Rockwell (HR) - 1922

- Método mais utilizado para se medir dureza
- **Não** é necessário **medir** a impressão, portanto, é **mais rápido** e com **menor** possibilidade de erros humanos;
- Fácil execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e **pequeno tamanho da impressão**;
- Existe a possibilidade de medida de **dureza Rockwell superficial** é realizado em corpos de prova mais finos (delgados).



Método de Medição Rockwell



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

- Para materiais metálicos, o **ensaio** é regido no Brasil pela **norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2019**, intitulada “Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)”;
- A norma norte-americana para esse ensaio é a **ASTM E18-19 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**;
- Existem ao todo **30 escalas**, mas a maioria das aplicações envolvendo **materiais metálicos** são cobertas pelas escalas **B e C**;
- As escalas **L, M, P, R, S e V** são empregadas para **borracha, madeira e plásticos**;
- As escalas **N, T, W, X e Y** são usadas no ensaio de dureza Rockwell **superficial**.

• Os penetradores **esféricos** podem ter os seguintes diâmetros:

• 1/16 in (1,588 mm) para as escalas B, F, G e T;

• 1/8 in (3,175 mm) para as escalas E, H, K e W;

• 1/4 in (6,35 mm) para as escalas L, M, P e X;

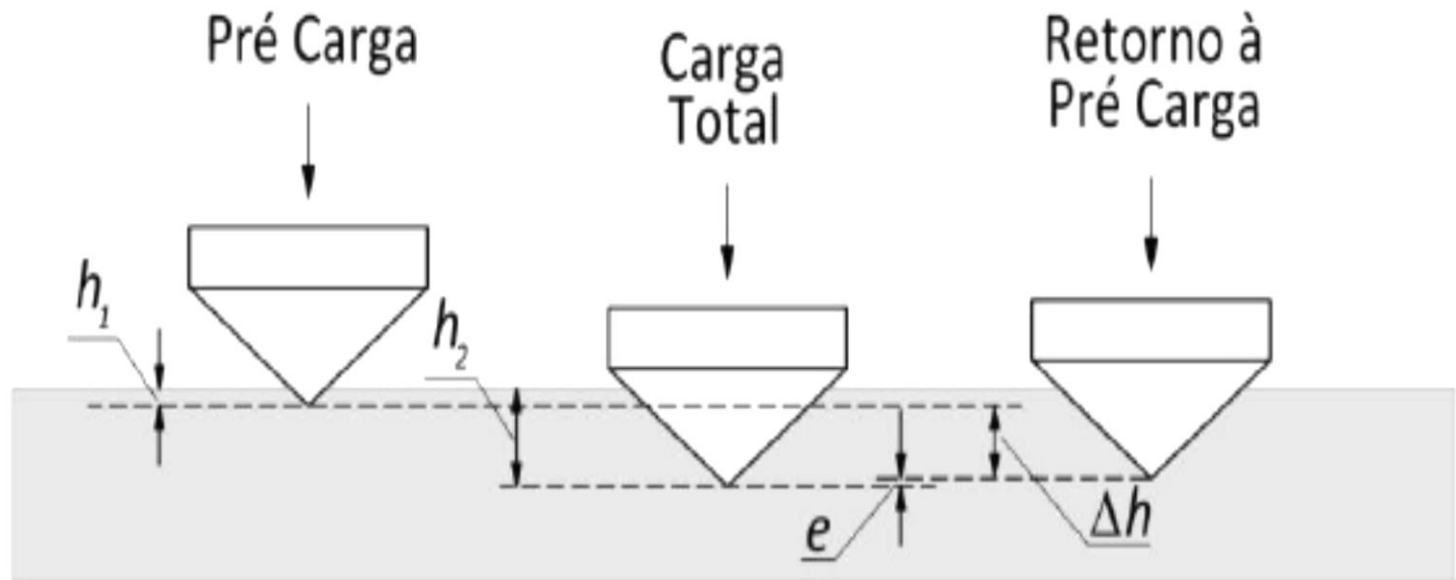
• 1/2 in (12,7 mm) para as escalas R, S, V e Y.

As escalas **A, C, D e N** empregam um **cone de diamante com ângulo de 120° e ponta arredondada com raio 0,2 mm**, denominado penetrador **Brale**.

Escala	Penetrador	Força (kgf)	Aplicação Típica
A	Brale	60	Aço cementado
D	Brale	100	Ferro fundido maleável
C	Brale	150	Aços duros, ligas de titânio
B	esfera 1/16 in	100	Ligas de Cu e de Al, aço macio
E	esfera 1/8 in	100	Ligas de Al e de Mg
M	esfera 1/4 in	100	Metais macios, polímeros duros
R	esfera 1/2 in	60	Polímeros de baixo módulo

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

$$\Delta h = (h_2 - h_1 - e).$$



e : recuperação elástica, $M=130$ para penetrador esférico e $M=100$ para penetrador Brale

Durezza Rockwell (HR)

Teste de Durezza
Rockwell

VER O VIDEO - DUREZA
ROCKWELL

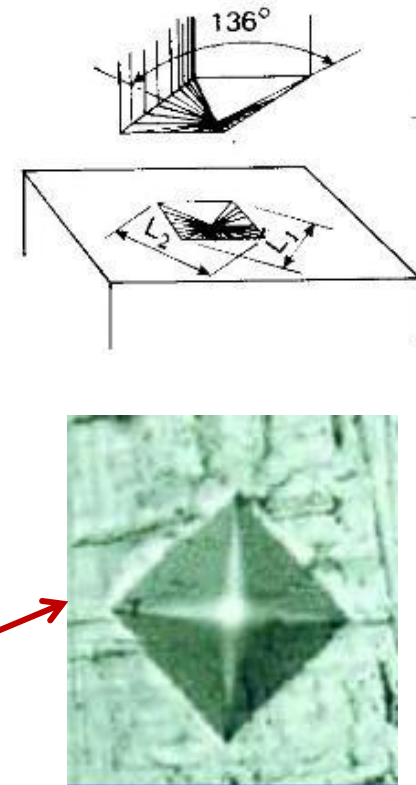
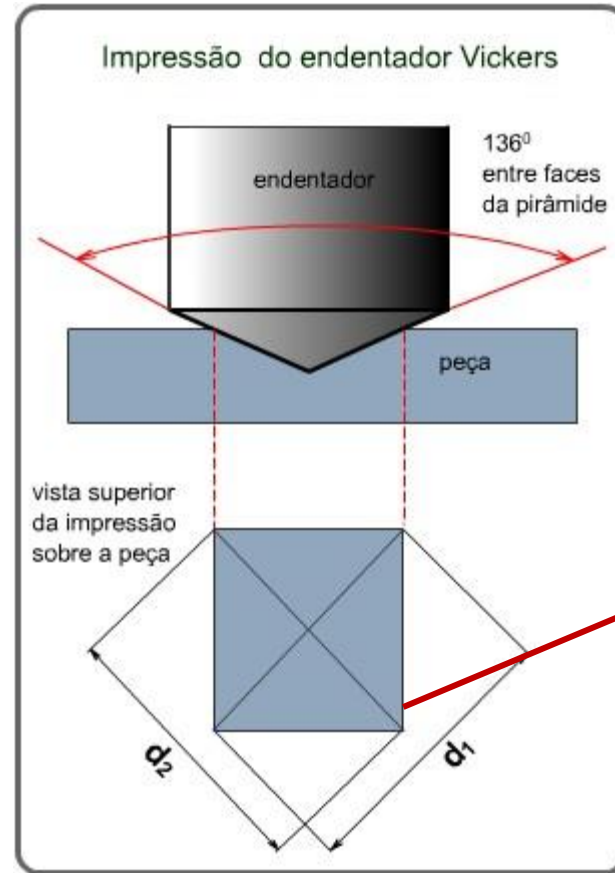
•Esfera de aço: máquinas mais antigas. As **esferas de CW** são mais aceitas (**permitidas atualmente, pelas normas**) : **menor deformação- menor erro da medida;**

•**Representação:** se um aço temperado apresenta dureza Rockwell C igual a 43, escreve-se **HRC 43 ou 43 HRC;**

•**HR15T 57** significa que a **dureza superficial** na escala **T** com carga de **15 kgf** é igual a **57;**

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.



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

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

Vantagens e limitações

Vantagens:

- 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: **camada** nitretada ou cementada;

Limitações:

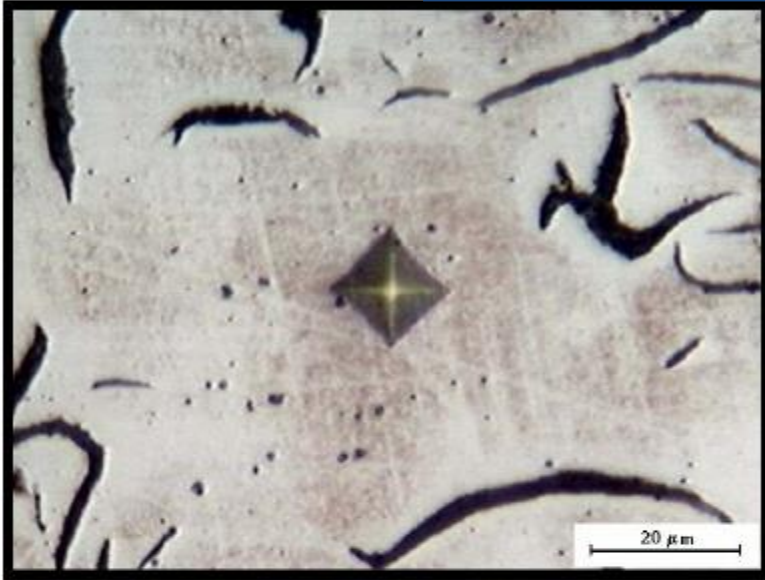
- **Morosidade** do ensaio;
- Exige **preparação cuidadosa** da superfície para tornar nítida a impressão;
- Equipamento e acessórios **caros**.

Dureza Vickers (HV)

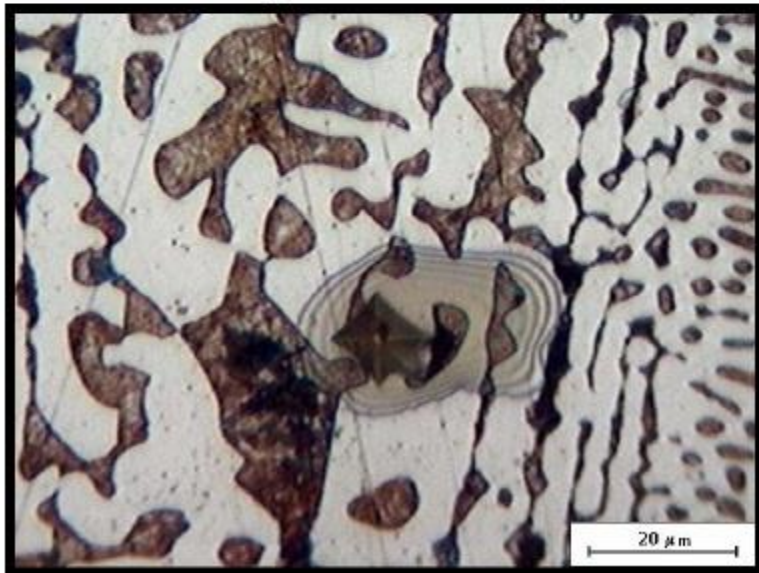
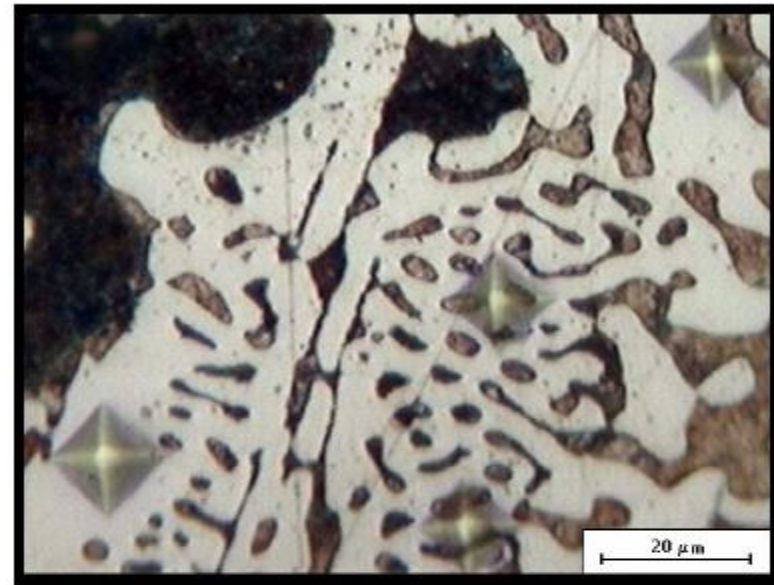
Teste de Dureza
Vickers

**VER O VIDEO - DUREZA
VICKERS**

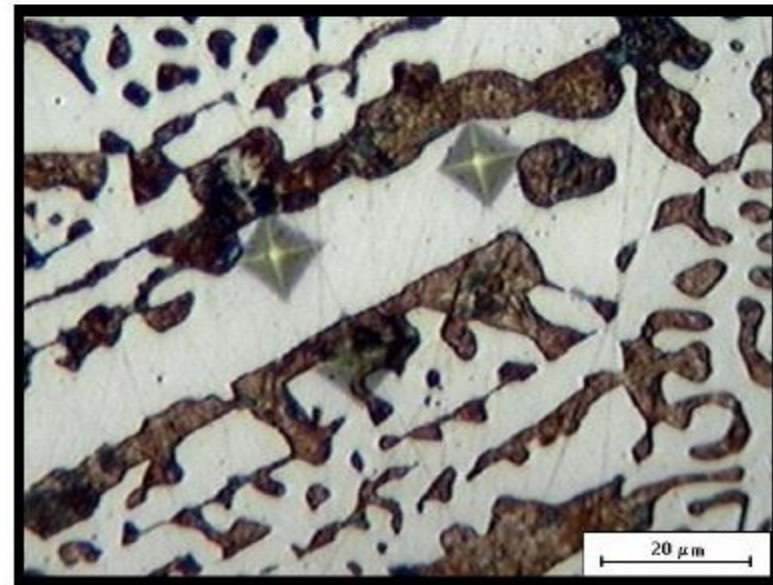
Indentação Vickers



Indentação em um fofo Cz, na região interna aos veios de grafite. Sem ataque 500x

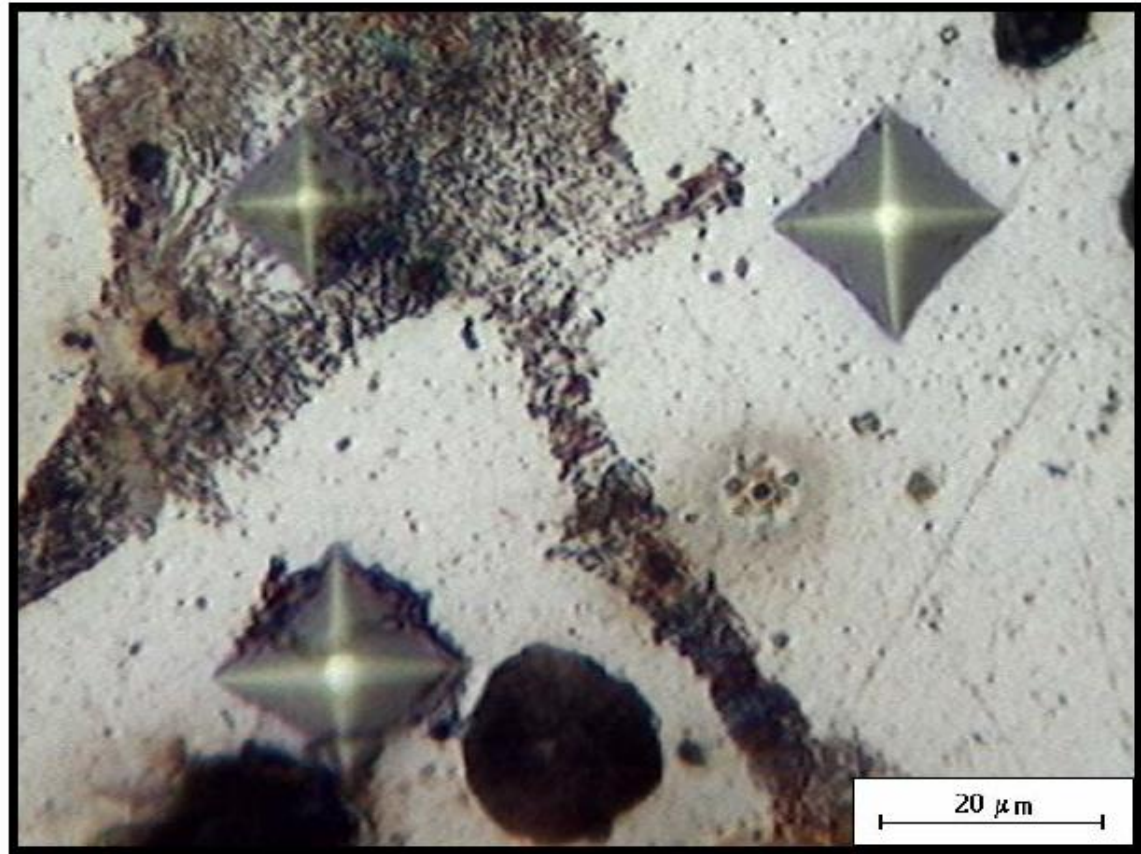


Indentação em um fofo Br Hipo, na região da Ledeburita. 951HV (Inter-Ledeburita), 750HV (fase clara - Cementita), 534HV (fase escura - Perlita). Ataque Nital, 500x



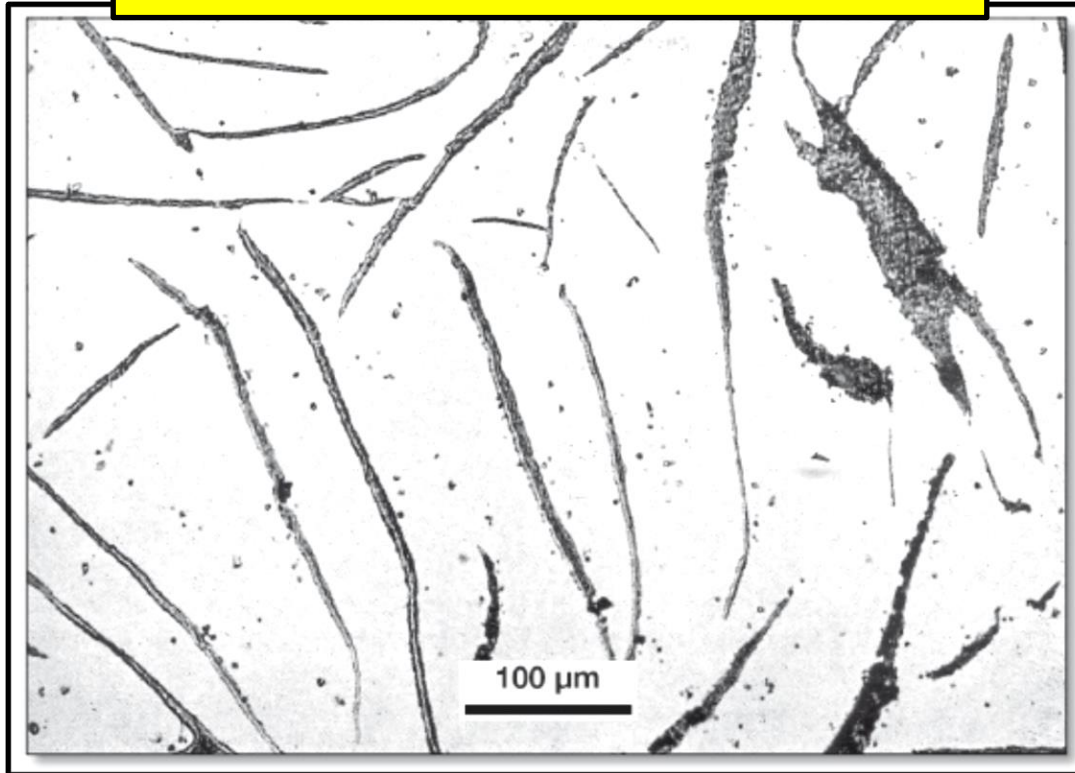
Indentação Vickers

Indentação em um
fofo Nodular,
162HV (fase clara –
Ferrita), 324HV
(fase escura –
Perlita). Ataque
Nital, 500x

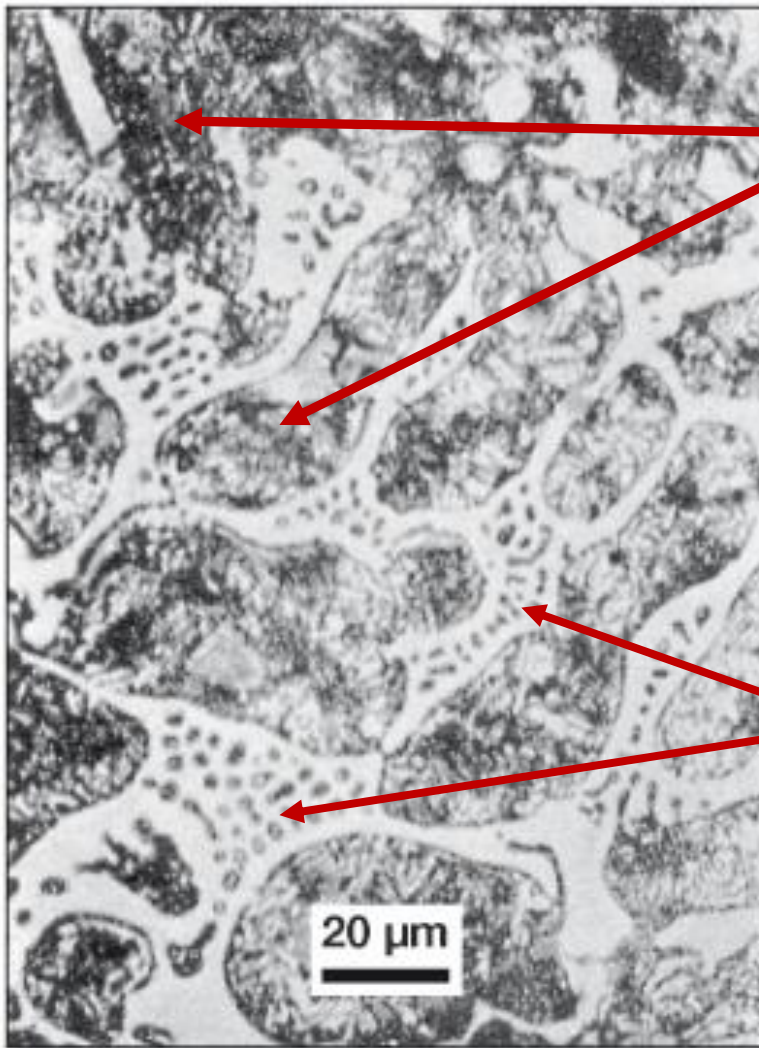


FERROS FUNDIDOS

Ferro fundido cinzento



Resfriamento lento: veios de grafita (grafitização) e ferrita



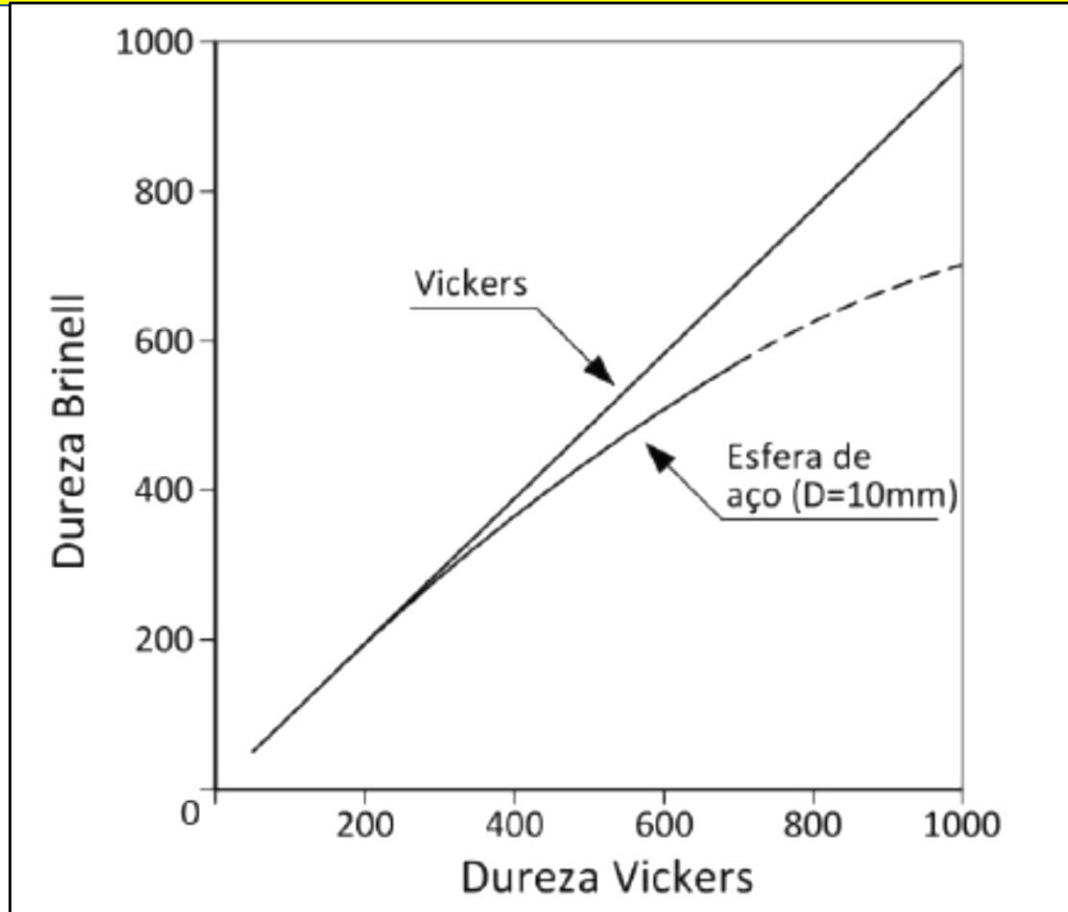
Dendritas de austenita transformadas em perlita.

Ledeburita: cementita (clara) e pontos de perlita

Figura 17.12

Aspecto com maior aumento da microestrutura da Figura 17.11(b). Ledeburita transformada entre as dendritas de austenita transformada em perlita. Ataque: Picral.

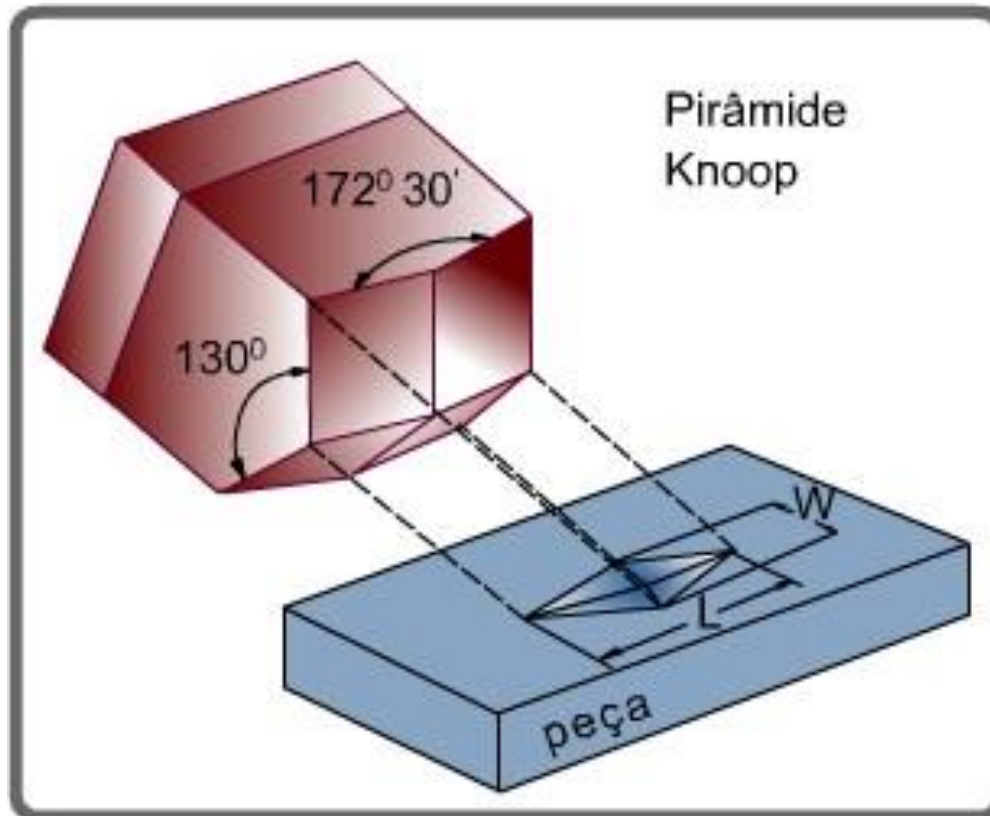
Valores de dureza Brinell e Vickers, mostrando que estes são praticamente **idênticos até próximo de 300 HB**. A partir daí os resultados passam a **divergir devido à deformação** sofrida pelo penetrador Brinell (**esfera de aço**) ao ensaiar materiais de alta dureza



[Suryanarayana, 2011].

Ensaio de dureza Knoop (alternativa à dureza Vickers)

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



DUREZA X LIMITE DE RESISTÊNCIA



TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels^A (Rockwell C to Other Hardness Numbers)

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	...	920	85.6	93.2	84.4	75.4	...
67	900	...	895	85.0	92.9	83.6	74.2	...
66	865	...	870	84.5	92.5	82.8	73.3	...
65	832	739	846	83.9	92.2	81.9	72.0	...
64	800	722	822	83.4	91.8	81.1	71.0	...
63	772	706	799	82.8	91.4	80.1	69.9	...
62	746	688	776	82.3	91.1	79.3	68.8	...
61	720	670	754	81.8	90.7	78.4	67.7	...
60	697	654	732	81.2	90.2	77.5	66.6	...
59	674	634	710	80.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	80.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	79.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	79.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	78.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	78.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	77.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)
52	544	512	576	76.8	86.4	70.2	57.4	273 (1880)
51	528	496	558	76.3	85.9	69.4	56.1	264 (1820)
50	513	482	542	75.9	85.5	68.5	55.0	255 (1760)
49	498	468	526	75.2	85.0	67.6	53.8	246 (1700)
48	484	455	510	74.7	84.5	66.7	52.5	238 (1640)
47	471	442	495	74.1	83.9	65.8	51.4	229 (1580)
46	458	432	480	73.6	83.5	64.8	50.3	221 (1520)
45	446	421	466	73.1	83.0	64.0	49.0	215 (1480)

APLICAÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA



Tratamentos superficiais: térmicos ou termoquímicos.

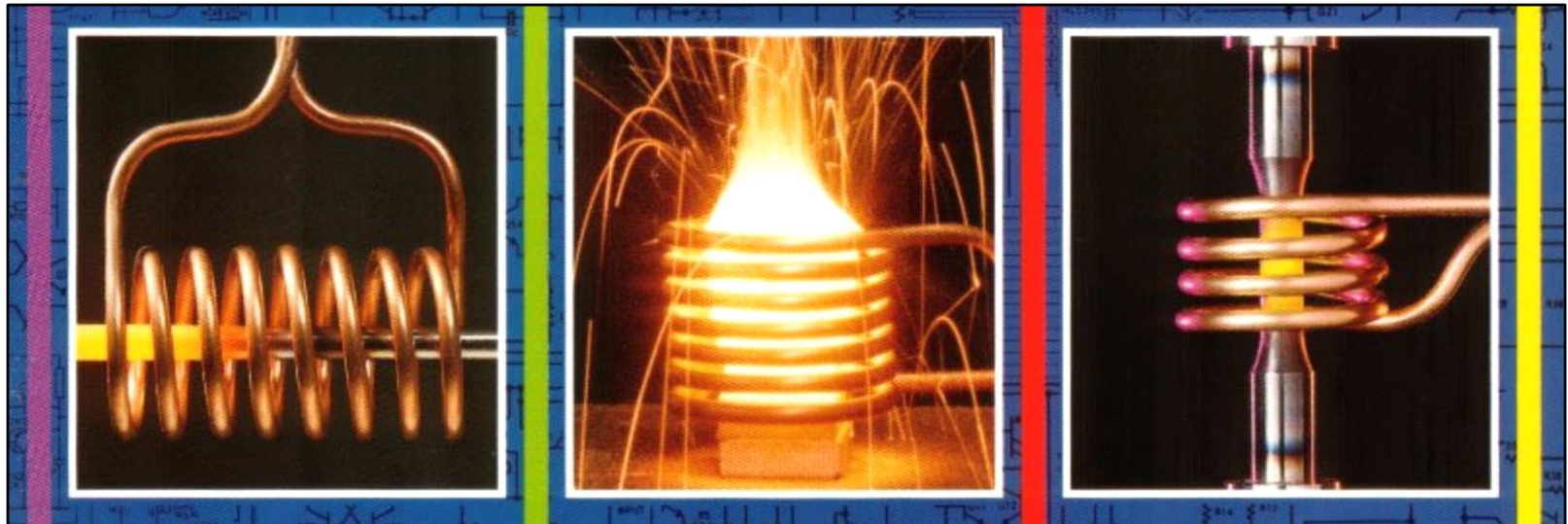
Térmicos:

- **Têmpera superficial (indução): transformação martensítica superficial (aumento de dureza) até uma certa profundidade (controlada);**

Termoquímicos:

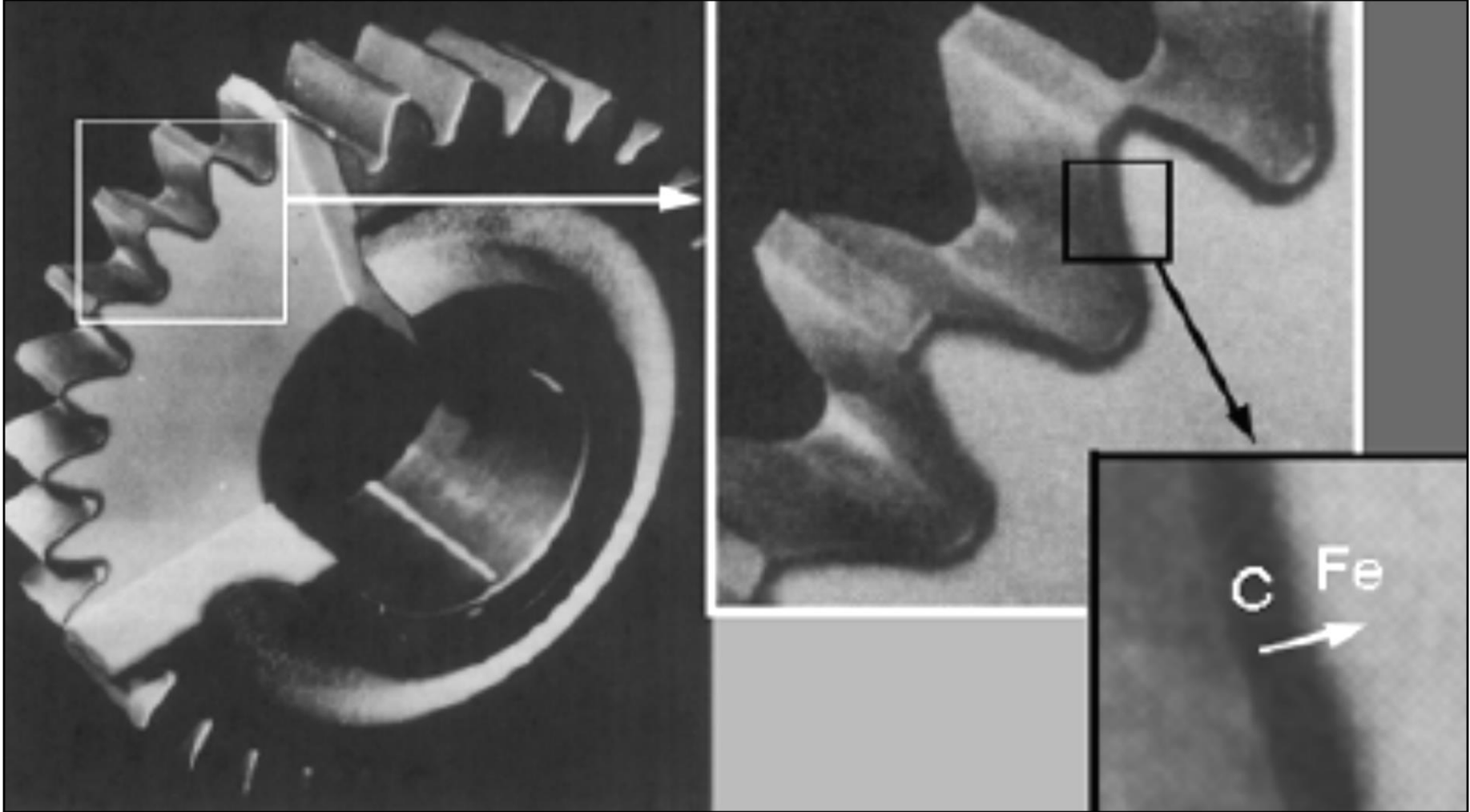
- **Cementação: introdução de carbono, por difusão, até uma certa profundidade (controlada) seguida de têmpera e revenimento (aumento de dureza);**
- **Nitretação: introdução de nitrogênio até uma certa profundidade (controlada). Formação de nitretos aumenta a dureza superficial;**

TÊMPERA POR INDUÇÃO



**VER O VIDEO - TÊMPERA POR
INDUÇÃO**

CEMENTAÇÃO



CEMENTAÇÃO

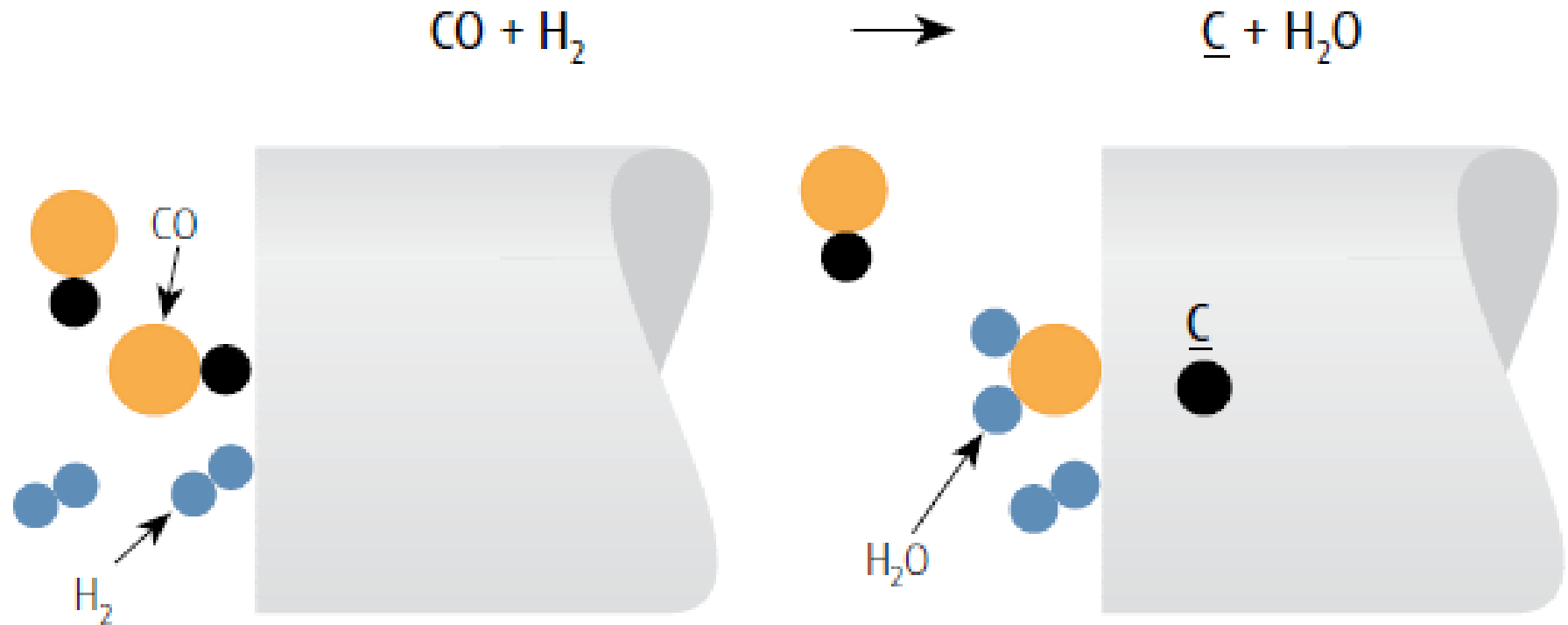
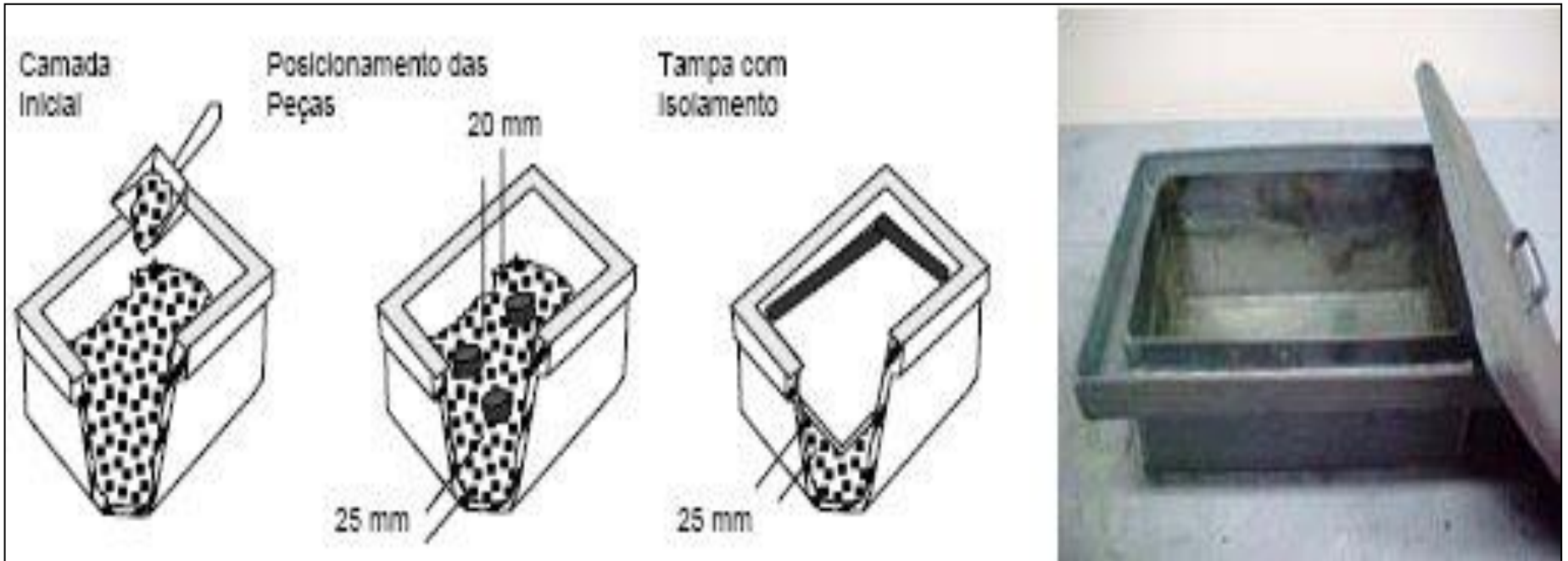


Figure 11: Schematic illustration of the carburizing process

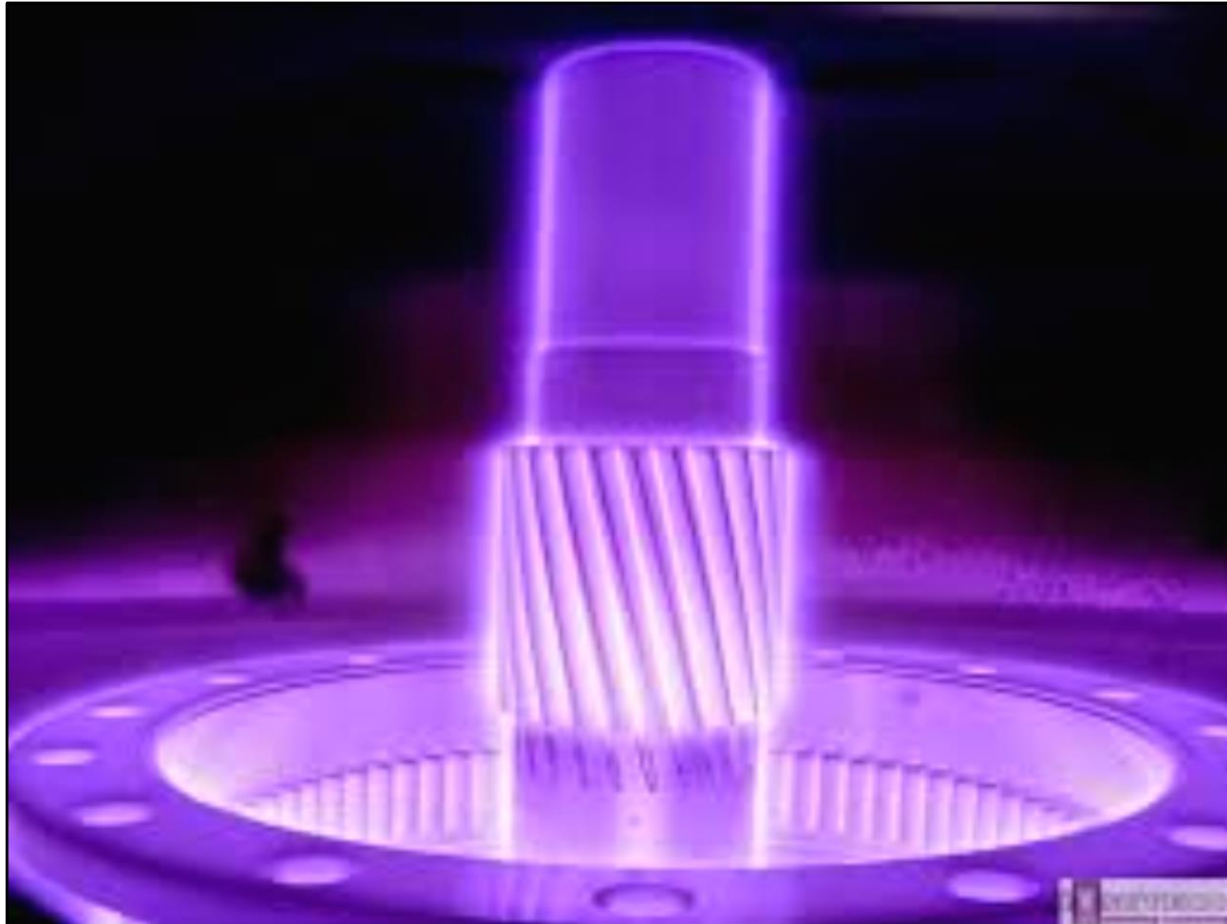
(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

Cementação sólida ou em caixa

- Substâncias carbonáceas sólidas são utilizadas por isso é chamada de cementação sólida;
- Misturas carburizantes (fonte e carbono): carvão de madeira; aglomerado com 5% à 20% de óleo comum ou óleo de linhaça;
- Substância ativadora (50% à 70% de carbonato de bário).



PEÇA DURANTE NITRETAÇÃO A PLASMA



NITRETAÇÃO

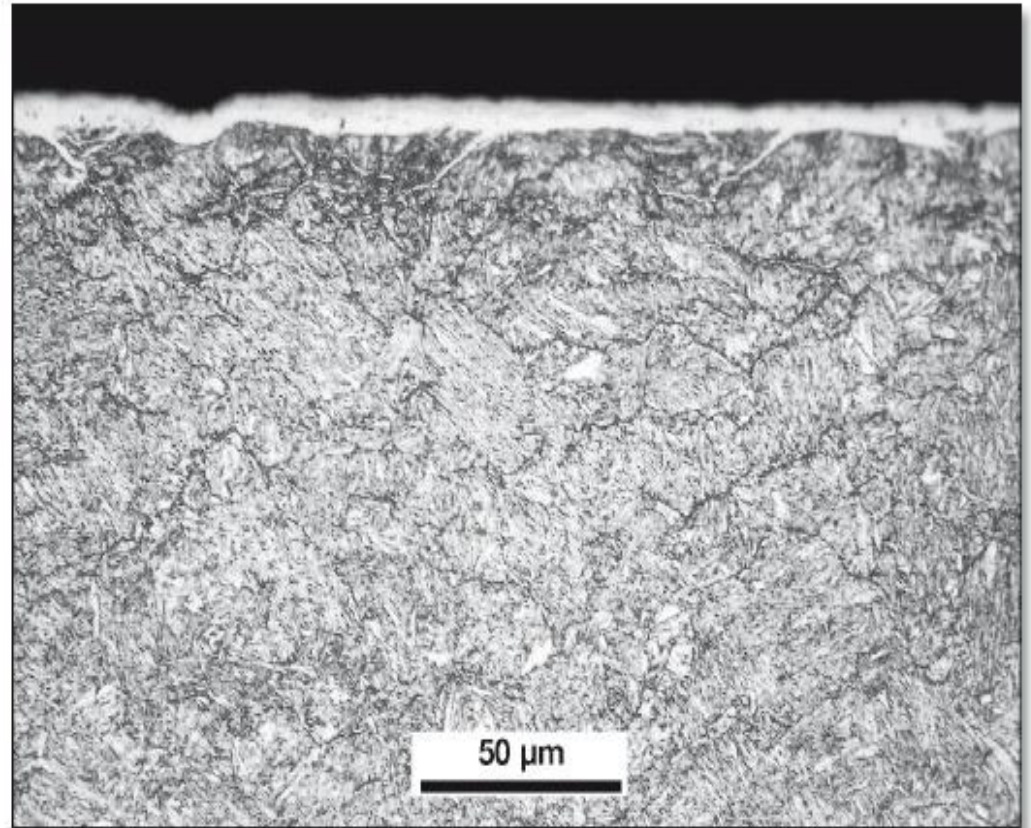
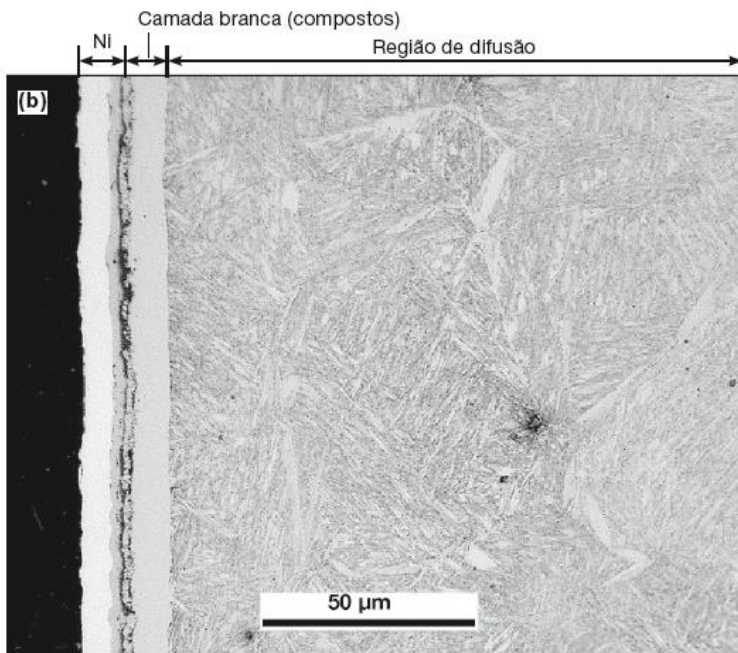
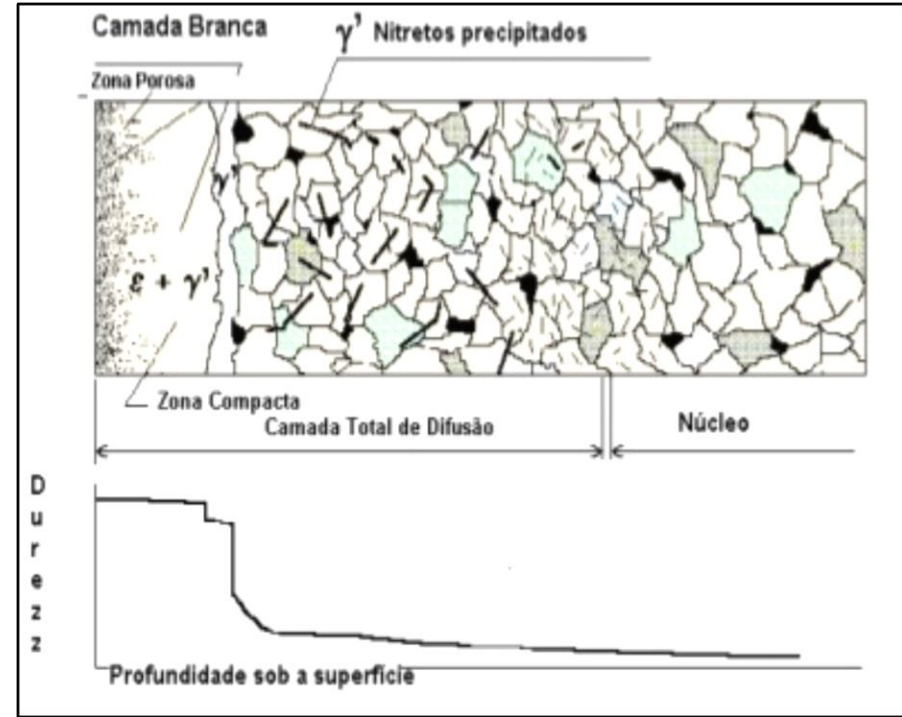
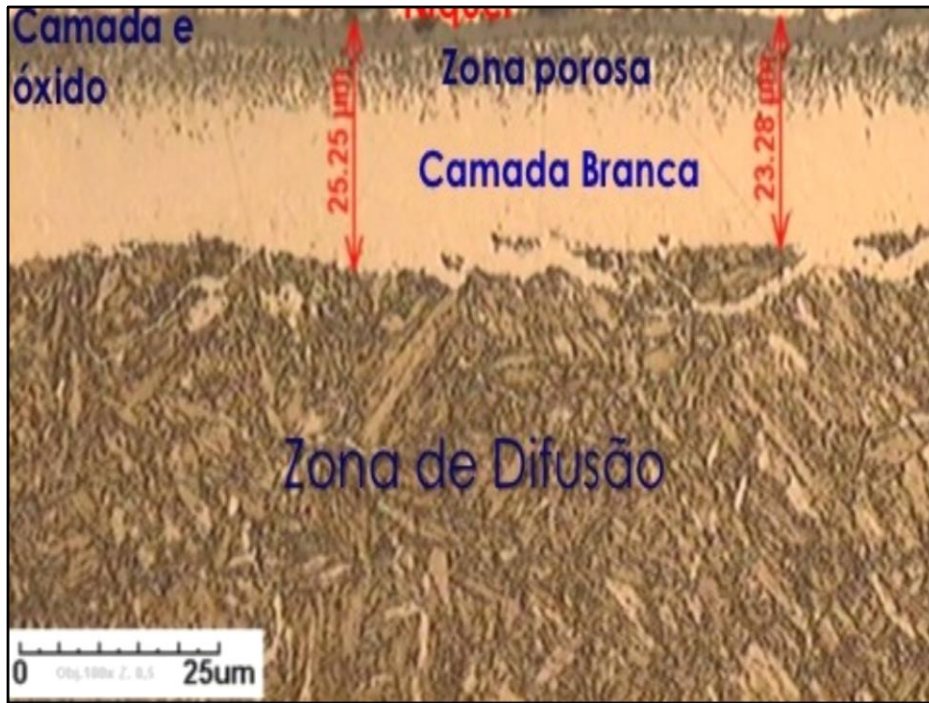


Figura 10.94

Seção transversal à superfície de uma peça de aço AISI 4340 temperado e revenido e nitretado. Observa-se a camada branca, de nitreto de alta dureza (ver [2]). Cortesia A. Zeemann, Tecmetal, RJ, Brasil.

Camada Branca e camada de difusão-Imagem de MO e desenho esquemático com perfil de dureza

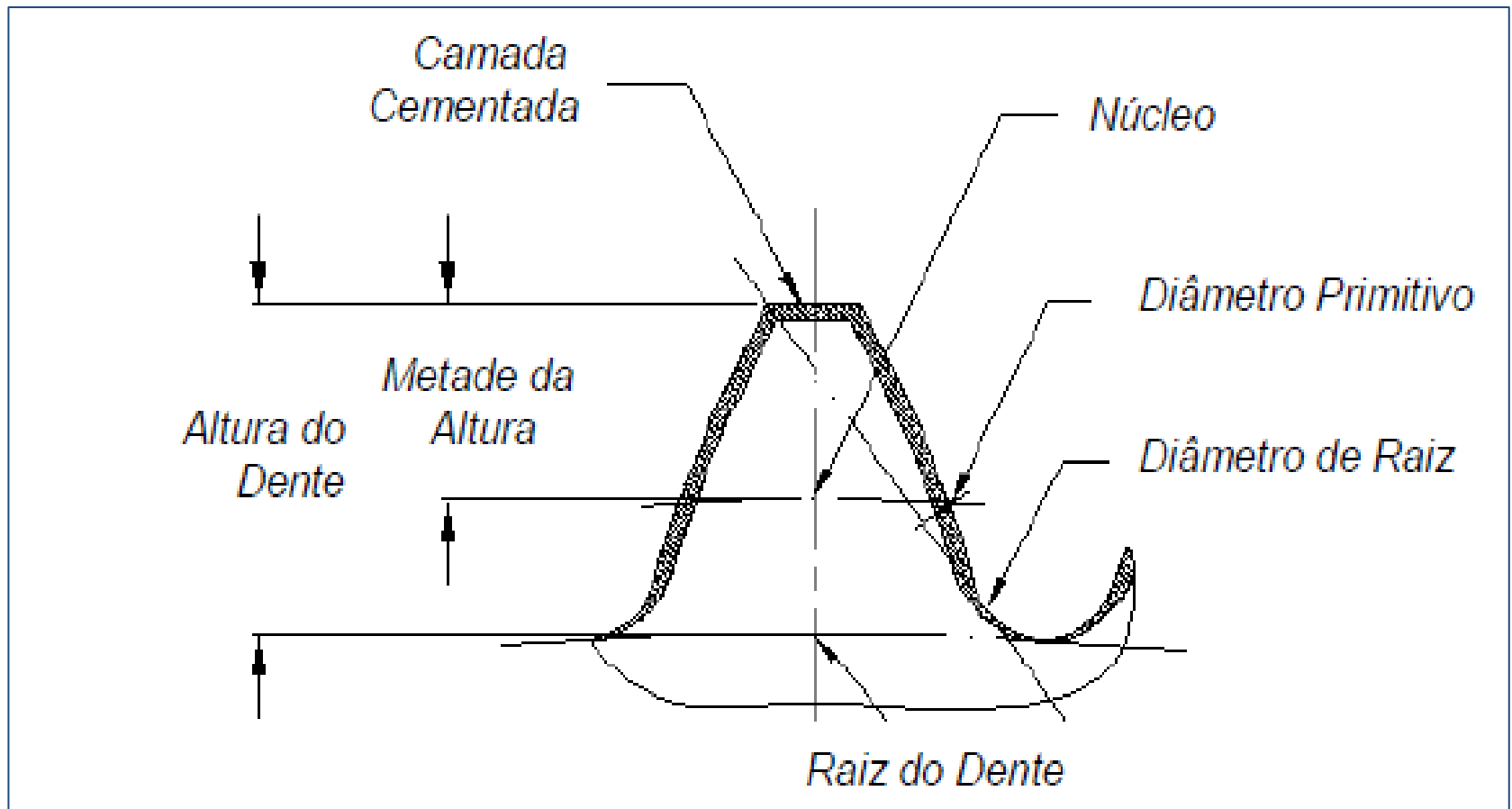


A camada branca é formada por uma combinação do nitreto ϵ e γ' . O nitreto γ' é mais duro e frágil. A camada branca é dura e frágil e pode ser reduzida ou eliminada, conforme a aplicação. Abaixo desta camada existe a camada de difusão.

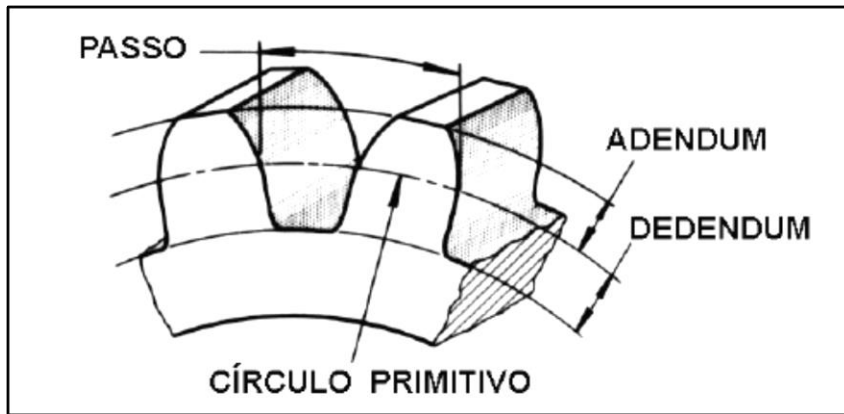
Determinação da profundidade de camada efetiva

Effective Hardness Testing (EHT)

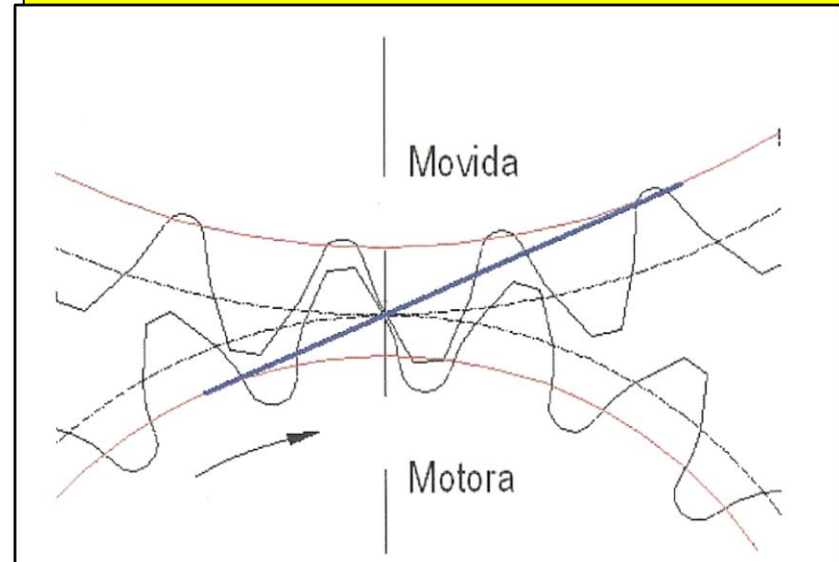
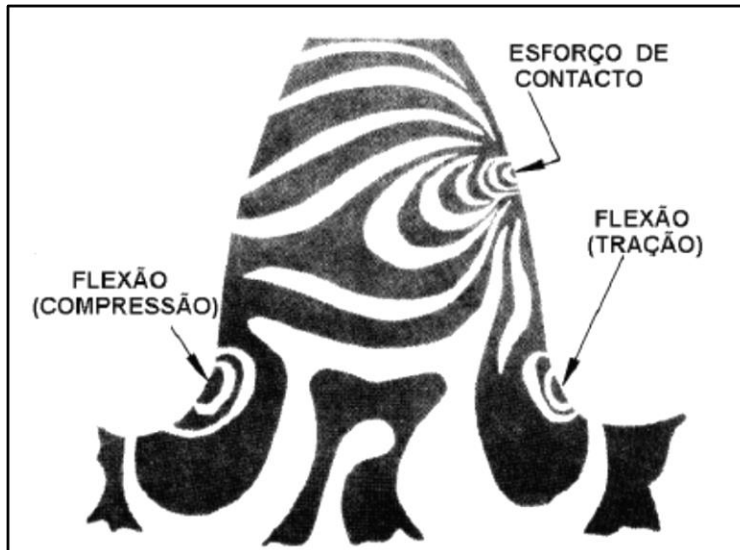
Case Hardness Depth (CHD)



FADIGA DE CONTATO - ENGRENAGEM

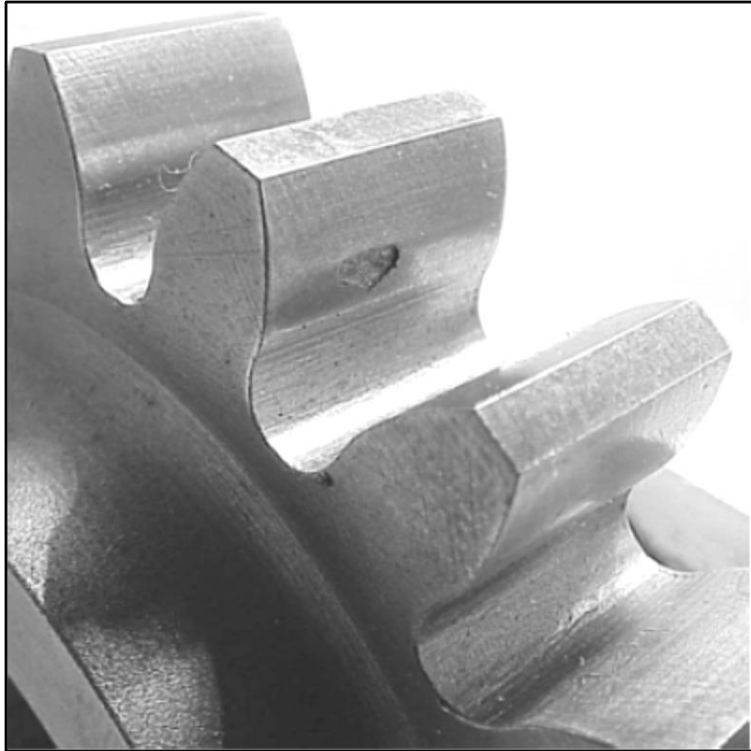


MAIORES TENSÕES E O ESCORREGAMENTO OCORREM NO DEDENDUM, LOCAL DE MAIOR PROBABILIDADE DE NUCLEAÇÃO DE TRINCA.



MODELO FOTOELÁSTICO

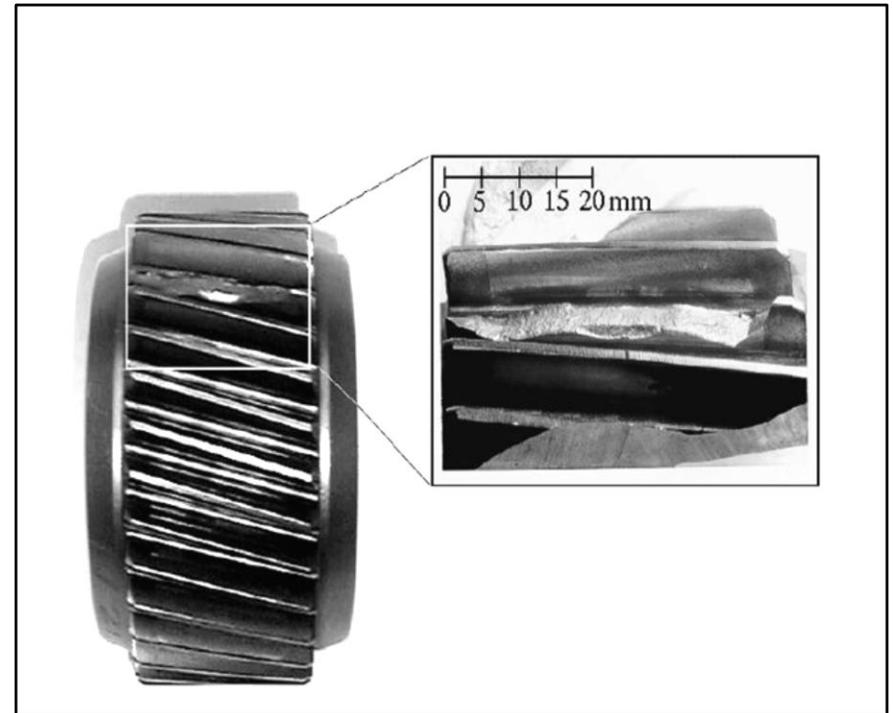
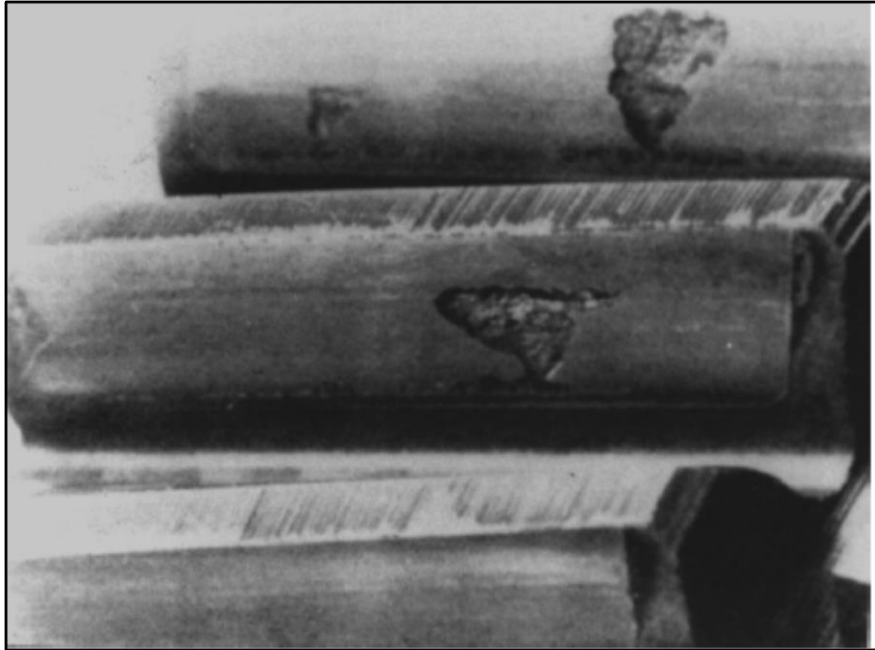
FADIGA DE CONTATO -ENGRENAGEM



- **Próximo ao diâmetro primitivo: causado por especificações inadequadas de durezas, profundidades de camada ou tratamento térmico;**
- **No diâmetro primitivo: causado por sobrecarga;**
- **Logo abaixo ou acima do diâmetro primitivo: falha de engrenamento.**

FADIGA DE CONTATO –ENGRENAGEM - SPALLING

O “Spalling” é a propagação de um “pitting” e pode ter contribuição do lubrificante presente nas superfícies de contato. Nucleação se dá nos “micropittings”.



FIM