

ENSAIO DE DUREZA

DUREZA BRINELL

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto, o conceito físico de dureza não tem um mesmo significado para todas as pessoas que tratam essa propriedade. Essa conceituação divergente de dureza depende do contexto em que é empregada.

- Na área da metalurgia, considera-se dureza como a resistência à deformação plástica permanente. Isso porque uma grande parte da metalurgia consiste em deformar plasticamente os metais.
 - Na área da mecânica, é a resistência à penetração de um material duro no outro, pois esta é uma característica que pode ser facilmente medida.
 - Para um projetista, é uma base de medida, que serve para conhecer a resistência mecânica e o efeito do tratamento térmico ou mecânico em um metal. Além disso, permite avaliar a resistência do material ao desgaste.
 - Para um técnico em usinagem, é a resistência ao corte do metal, pois este profissional atua com corte de metais, e a maior ou menor dificuldade de usinar um metal é caracterizada como maior ou menor dureza.
 - Para um mineralogista é a resistência ao risco que um material pode produzir em outro. E esse é um dos critérios usados para classificar minerais.
- Ou seja, a dureza não é uma propriedade absoluta. Só tem sentido falar em dureza quando se comparam materiais, isto é, só existe um material duro se houver outro mole.

Introdução

É importante destacar que, apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações.

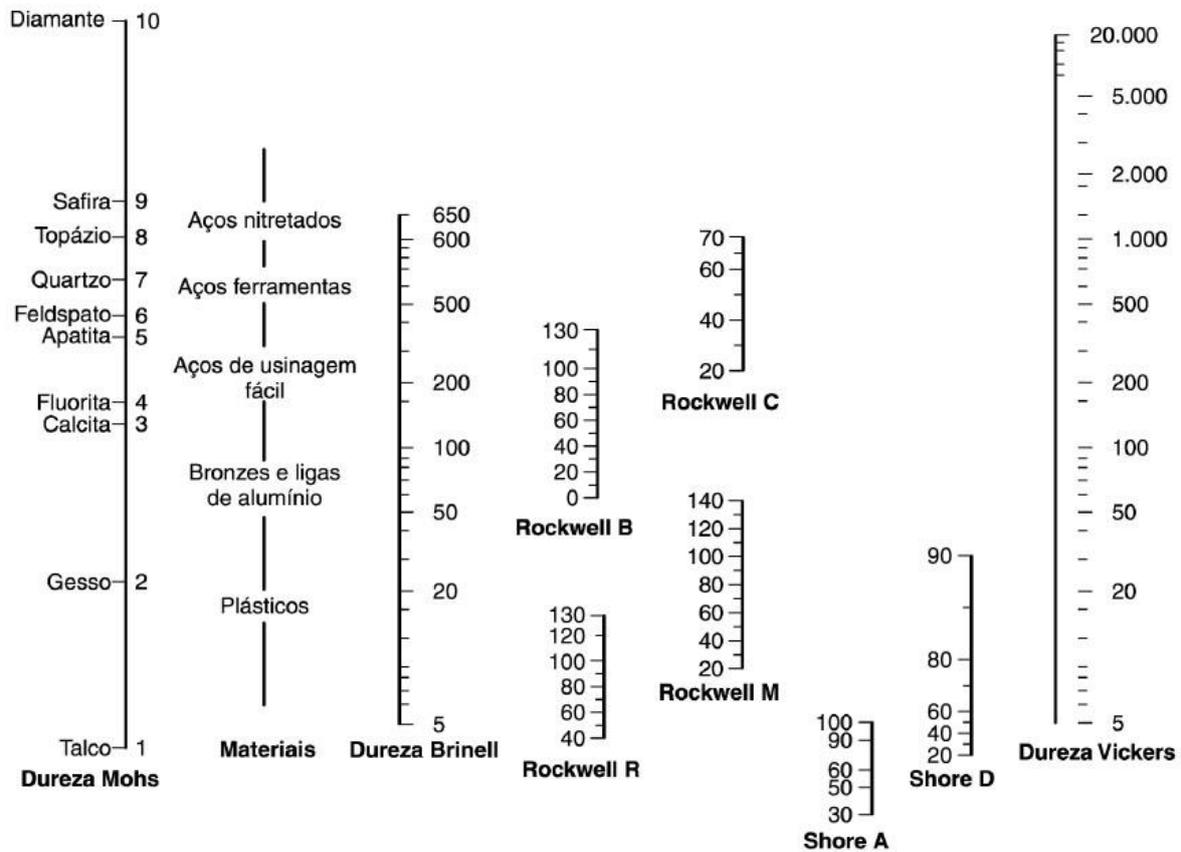
Há registros de que no século XVII já se avaliava a dureza de pedras preciosas, esfregando-as com uma lima.

No século XVIII desenvolveu-se um método para determinar a dureza do aço, riscando-o com minerais diferentes.

Mas o primeiro método padronizado de ensaio de dureza do qual se tem notícia, baseado no processo de riscagem, foi desenvolvido por Mohs, em 1822. Este método deu origem à escala de dureza Mohs, que apresenta dez minérios-padrões, ordenados numa escala crescente do grau 1 ao 10, de acordo com sua capacidade de riscar ou ser riscado.

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

Esta escala não é conveniente para os metais, porque a maioria deles apresenta durezas Mohs 4 e 8, e pequenas diferenças de dureza não são acusadas por este método. Por exemplo, um aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 Mohs, a mesma dureza Mohs de um aço temperado.



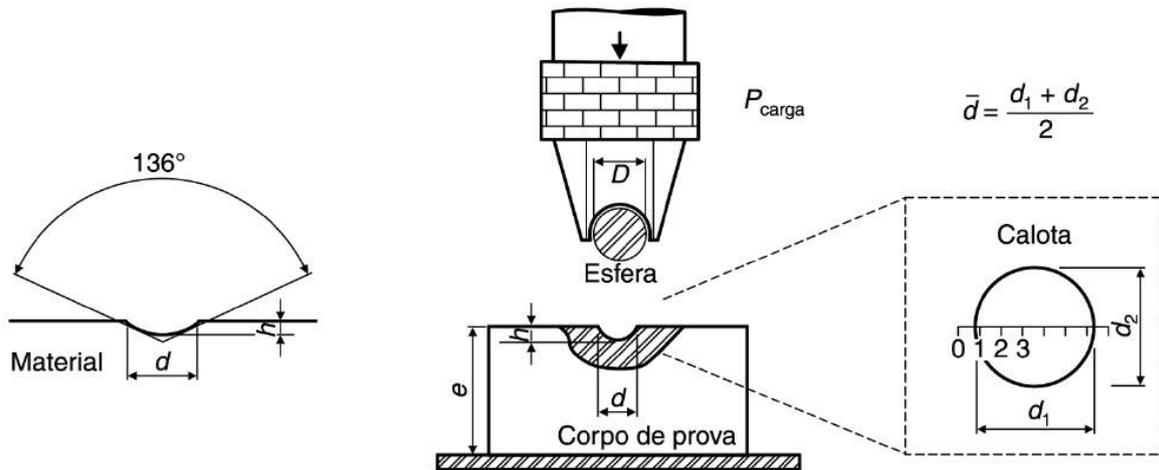
Escalas comparativas dos valores para os vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais. (Adaptado de Jástrzebski, 1987.)

As limitações da escala Mohs levaram ao desenvolvimento de outros métodos de determinação de dureza, mais condizentes com o controle do aço e de outros metais. Um desses métodos de determinação é o ensaio de dureza Brinell.

Ensaio de dureza Brinell

Em 1900, J. A. Brinell divulgou este ensaio, que passou a ser largamente aceito e padronizado, devido à relação existente entre os valores obtidos no ensaio e os resultados de resistência à tração.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado, de diâmetro D , sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga F , durante um tempo t , produzindo uma calota esférica de diâmetro d .



Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell.

A dureza Brinell é representada pelas letras HB. Esta representação vem do inglês Hardness Brinell, que quer dizer dureza Brinell.

A dureza Brinell (HB) é a relação entre a carga aplicada (F) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado (A_c).

Em linguagem matemática:

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

A área da calota esférica é dada pela fórmula: πDp , onde p é a profundidade da calota.

Substituindo A_c pela fórmula para cálculo da área da calota, temos:

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

A profundidade (p em milímetros) da calota esférica pode ser calculada por:

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

onde d é o diâmetro médio da impressão em mm.

Devido à dificuldade técnica de medição da profundidade (p), que é um valor muito pequeno, utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade (p) e o diâmetro da calota (d) para chegar à fórmula matemática que permite o cálculo da dureza HB, representada a seguir:

$$HB = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

0,102= fator de conversão para carga em (N), já que inicialmente o ensaio foi proposto em kgf, mas, devido à adoção do Sistema Internacional (SI) de unidades, a unidade da carga aplicada foi convertida para este.

Acompanhe um exemplo de aplicação desta fórmula:

Uma amostra foi submetida a um ensaio de dureza Brinell no qual se usou uma esfera de 2,5 mm de diâmetro e aplicou-se uma carga de 1839 N. As medidas dos diâmetros de impressão foram de 1 mm. Qual a dureza do material ensaiado?

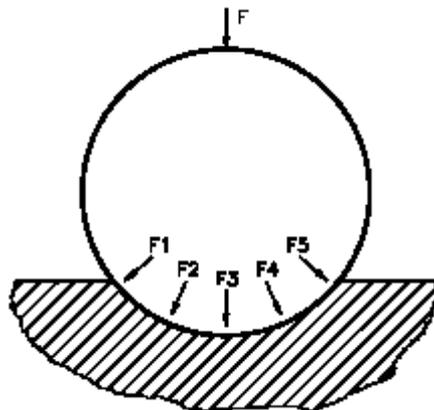
Uma vez que todos os valores necessários para calcular a dureza HB são conhecidos, podemos partir diretamente para a aplicação da fórmula:

$$HB = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \Rightarrow HB = 0,102 \times \frac{2 \times 1839}{\pi \times 2,5 \left(2,5 - \sqrt{2,5^2 - 1^2} \right)} \Rightarrow$$

$$HB = 0,102 \times \frac{3677}{3,14 \times 2,5 \left(2,5 - \sqrt{6,25 - 1} \right)} \Rightarrow HB = 0,102 \times \frac{3677}{7,85 \left(2,5 - 2,29 \right)} \Rightarrow$$

$$HB = 0,102 \times \frac{3677}{7,85 \times 0,21} \Rightarrow HB = 0,102 \times \frac{33677}{1,6485} \Rightarrow HB = 227$$

A unidade kgf/mm², 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.



É também prática usual (NBR NM-187-1) utilizar as notações HBS, no caso de se utilizar esfera de aço, e HBW, no caso de esfera de carboneto de tungstênio. A escolha é dependente da faixa de dureza do material a ser submetido ao ensaio. A norma ASTM E10: 2007a só admite a utilização de esfera de carboneto de tungstênio (HBW).

Os cálculos anteriores são dispensáveis, se você dispuser de uma tabela apropriada. Veja abaixo um exemplo de 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=3000kgf)	d(mm)	HB (F=3000kgf)
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

Os valores indicados entre parênteses são somente referenciais, pois estão além da faixa normal do ensaio Brinell.

Obs: Tente localizar na tabela acima, o valor de dureza para um material que deixou um diâmetro de 3,55 mm.

Para encontrar o valor de HB solicitado, deve-se procurar na primeira coluna da tabela a linha correspondente ao valor de diâmetro de impressão 3,55 mm. Este valor está associado à dureza HB 293, que aparece na mesma linha na segunda coluna. Os valores de dureza encontrados por cálculos com aplicação da fórmula matemática apresentam pequenas diferenças em relação aos valores correspondentes encontrados em tabelas, correspondentes aos arredondamentos utilizados nos cálculos.

ESCOLHA DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

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, usando cargas e esferas

diferentes, é possível chegar ao mesmo valor de dureza, desde que se observem algumas condições:

- A carga será determinada de tal modo que o diâmetro de impressão d se situe no intervalo de 0,24 a 0,6 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, 0,42 mm.

Tanto a carga quanto o diâmetro da esfera dependem do material, devendo tais parâmetros se adequar ao tamanho, à espessura e à estrutura interna do corpo de prova. Os diâmetros de esferas normalizados são de 10 mm, 5 mm, 2,5 mm, 2 mm e 1 mm para a norma NBR NM-187- 1:1999, e de 10 mm, 5 mm, 2,5 mm e 1 mm para a norma ASTM E10:2007a.

Para obter um diâmetro de impressão dentro do intervalo citado acima, 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

$\frac{F}{D^2}$ é igual a uma constante chamada grau de carga ou 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. O quadro a seguir mostra os principais fatores de carga utilizados e indicações.

Constante ou grau de carga	Materiais	Exemplos
30	Metais ferrosos e não ferrosos resistentes	Aços, ferros fundidos, níquel e ligas, cobalto e ligas, ligas de titânio
15	Somente para carga de 3000 kgf	Titânio e ligas, bem como materiais não tão duros e ligas leves (somente NBR NM-187-1)
10	Metais ferrosos dúcteis e maioria dos não ferrosos	Ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre: latões, bronzes, ligas de magnésio, zinco
5	Metais não ferrosos moles	Metais puros alumínio, magnésio, cobre, zinco
2,5	Metais moles	Ligas de estanho, chumbo, antimônio, berílio, lítio
1,25	Metais mais moles	Metais puros berílio e lítio ou metais moles
1	Metais muito moles	Metais puros estanho, chumbo, antimônio

Tabela 1 Cargas recomendadas para diferentes esferas e constantes

Esfera D (mm)	Constante ou grau de carga (ABNT e ASTM)						
	30	15	10	5	2,5	1,25	1
	Cargas (kgf)						
10	3000	1500	1000	500	250	125	100
5	750	-	250	125	62,5	31,25	25
2,5	187,5	-	62,5	31,25	15,625	7,812	6,25
2	120	-	40	20	10	5	4
1	30	-	10	5	2,5	1,25	1

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. As distâncias entre medições obedecem um padrão mínimo que depende da norma adotada.

Tabela 2 Distâncias mínimas recomendadas para ensaios de dureza Brinell

	ABNT	ASTM
Distância entre centros	$4 \times d$ para materiais ferrosos $HB > 150$ $6 \times d$ para materiais moles $HB < 150$	$3 \times d$ para todos
Distância do centro à borda	$2,5 \times d$ para materiais $HB > 150$ $3,0 \times d$ para materiais $HB < 150$	$2,5 \times d$ para todos
Espessura mínima	$8,0 \times p$ - profundidade da calota $2,0 \times d$ - diâmetro da calota	$10 \times p$ - profundidade da calota
Superfícies cilíndricas	-	Diâmetro da peça $\geq 5 \times D$

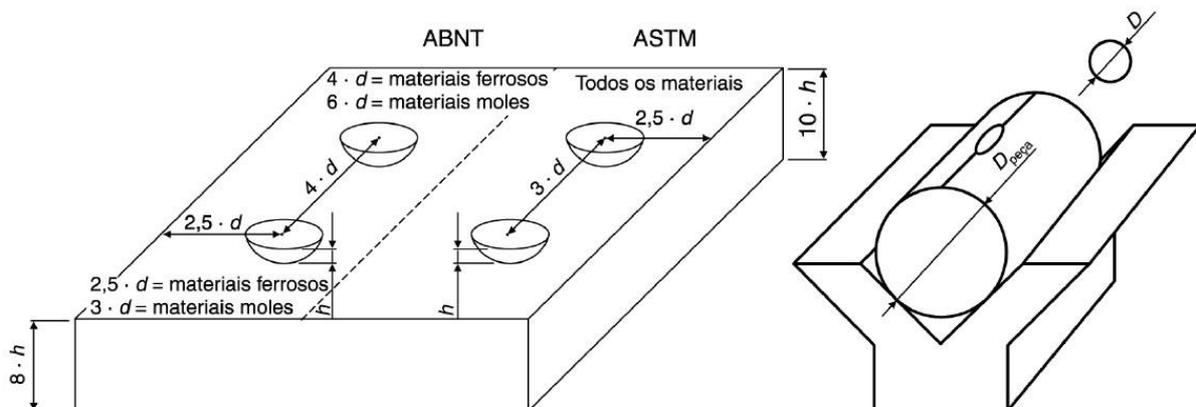


Figura 1 Distâncias mínimas que devem ser obedecidas para a realização das medidas.

Observe que nos quadros anteriores, os valores de carga foram determinados a partir das relações entre F e D^2 .

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

Estas informações podem ser úteis para resolver um problema prático, como por exemplo:

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.

Para resolver esse problema, precisamos das informações contidas nos dois quadros anteriores.

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 expressão:

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

Isolando p , temos:

$$p = \frac{F}{\pi DHB} \Rightarrow p = \frac{3000}{3,14 \times 10 \times 180} \Rightarrow p = \frac{3000}{5652} \Rightarrow p = 0,53$$

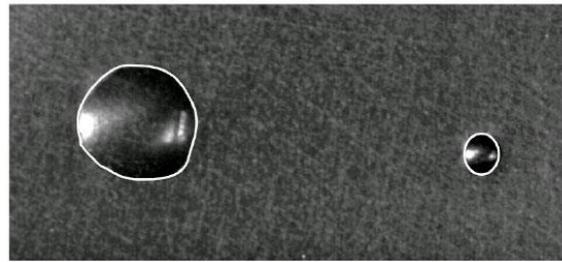
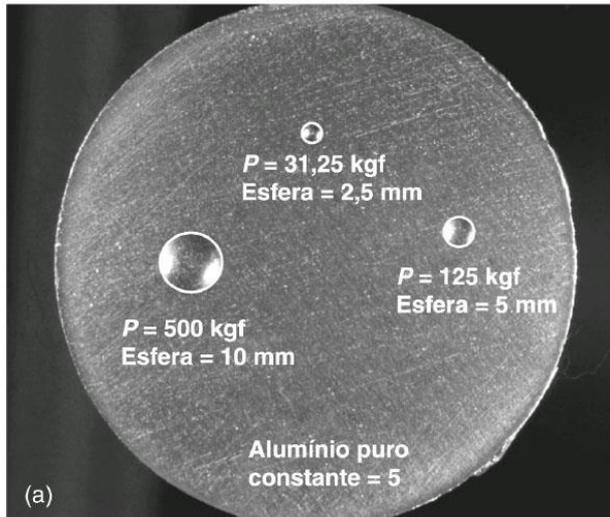
Portanto, a profundidade da impressão é de 0,53 mm. Sabemos que a espessura do material ensaiado deve ser, no mínimo, 10 vezes a profundidade da calota para a norma ASTM. Multiplicando a profundidade da impressão por 10, obtemos: 5,3 mm, ou 4,24 mm pela norma ABNT.

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 produziriam 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.



(b)

Figuras: (a) Imagem de calotas com diferentes cargas em alumínio puro. (b) Exemplo de calotas irregulares.

Representação dos resultados obtidos

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 HBS ou HBW 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 aço de 10 mm de diâmetro e uma carga de 1.000 kgf, aplicada por 30 segundos, é representado da seguinte forma:

85HBS 10/1000/30

Exemplo:

Interprete a seguinte representação de dureza Brinell: 120HBS 5/250/30.

Resposta:

dureza Brinell:

diâmetro e material da esfera:

carga:

duração do ensaio:

Conferindo: a dureza Brinell é de 120 HB; o diâmetro da esfera é de 5 mm; a carga aplicada foi de 250 kgf e a duração do ensaio foi de 30 segundos.

O tempo de aplicação da carga varia de 15 a 60 segundos: é de 15 segundos para metais com dureza Brinell maior que 300; de 60 segundos para metais moles, como o chumbo, estanho, metais-patente etc., e de 30 segundos para os demais casos.

A medida do diâmetro da calota (d) deve ser obtida pela média de duas leituras obtidas a 90° uma da outra, e de maneira geral não pode haver diferença maior que 0,06 mm entre as duas leituras, para esferas de 10 mm.

Informações Adicionais sobre o Ensaio de Dureza Brinell

A norma brasileira para a realização do ensaio é a NBR NM-187-1:1999 (ABNT), e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E10:2007a (ASTM).

Basicamente, o procedimento do ensaio consiste em:

- escolha do material da esfera: esfera de AÇO (materiais com dureza 350 HB);
 - esfera de WC (materiais com dureza , 650 HB);
 - escolha do grau de carga ou constante: depende do material (30; 15; 10; 5; 2,5; 1,25; 1);
 - definição da carga aplicada: depende da relação $P = D^2$. Constante;
 - validação do resultado: diâmetro de impressão: $0,24.D$ a $0,60.D$.
- Devido ao tamanho da impressão formada, o ensaio pode ser considerado destrutivo.
 - O penetrador deve ser polido e isento de defeitos na superfície, e o corpo de prova (ou superfície) deve estar liso e isento de substancias como óxidos, carepas, sujeiras e óleos; e, mais importante, a superfície deve ser plana, normal ao eixo de aplicação da carga e bem apoiada sobre o suporte, evitando deslocamentos durante o ensaio. Recomenda-se que a superfície a ser medida apresente um bom acabamento, podendo ser lixada ou usinada, desde que esses processos não alterem as características da superfície e permitam uma medição fácil e precisa.
 - Como a impressão formada abrange uma área maior do que a formada pelos outros ensaios de dureza, o ensaio de dureza Brinell é o único indicado para materiais com estrutura interna não uniforme, como, por exemplo, o ferro fundido cinzento. Por outro lado, o grande tamanho da impressão pode impedir o uso desse teste em peças pequenas.
 - O ensaio de dureza Brinell não é adequado para caracterizar peças que tenham sofrido tratamentos superficiais, como cementação, nitretação e outros, pois a penetração pode ultrapassar a camada tratada e gerar erros nos valores obtidos.
 - Para metais de grande capacidade de encruamento, podem ocorrer um amassamento das bordas da impressão e a leitura de um diâmetro menor do que o real ($d' < d_r$).
 - Ao contrário, em metais que tenham sido trabalhados a frio a ponto de apresentarem pequena capacidade de encruamento, pode ocorrer uma aderência do metal à esfera de ensaio, com as bordas da calota esférica formada projetando-se ligeiramente para fora da superfície do corpo de prova, provocando uma leitura de um diâmetro maior que o real ($d' > d_r$).
 - Deve-se observar, entre os centros de duas impressões vizinhas, um afastamento de, no mínimo, $4.d$ (quatro vezes o diâmetro da calota esférica) para ferrosos (dureza maior que 150 HB), e $6.d$ no caso de outros materiais (dureza menor que 150 HB), segundo a ABNT, e $3.d$ para todos os materiais, segundo a ASTM.
 - A distância do centro da impressão para a borda do corpo de prova deve ser de no mínimo $2,5.d$ para materiais com dureza maior que 150 HB (ASTM) e de $3.d$ para materiais abaixo de 150 HB (ABNT).

- A espessura mínima (e_{\min}) de 8x a profundidade (p) da calota esférica (ABNT), ou 10x segundo a ASTM.

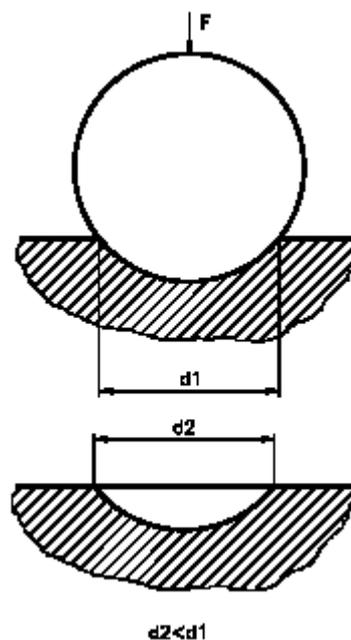
Algumas observações

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.

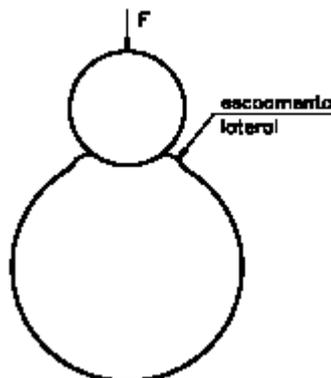
É o único ensaio utilizado e aceito para ensaios em metais que não tenham estrutura Interna uniforme.

É feito em equipamento de fácil operação, mas exige tratamento matemático para os resultados.

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.

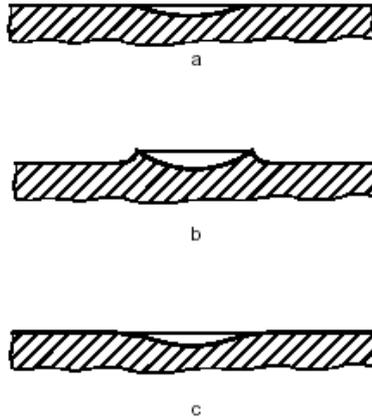


O ensaio não deve ser realizado em superfícies cilíndricas com raio de curvatura menor que 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada, porque haveria escoamento lateral do material e a dureza medida seria menor que a real.



Em alguns materiais podem ocorrer deformações no contorno da impressão, ocasionando erros de leitura. As figuras a seguir mostram uma superfície com impressão normal e duas impressões com deformação. A figura a representa a impressão normal; na figura b observa-se que houve aderência do material à esfera

durante a aplicação da carga; e na figura c, as bordas estão abauladas, dificultando a leitura do diâmetro.



Em certas situações em que é necessário avaliar a dureza de um material ou produto de dureza muito elevada ou com mais de uma fase constituinte, outros tipos de ensaio podem ser mais aconselháveis. Existem outros ensaios de dureza que apresentam melhores resultados que o de dureza Brinell, tais como o ensaio de dureza Rockwell ou o ensaio de dureza Vickers.

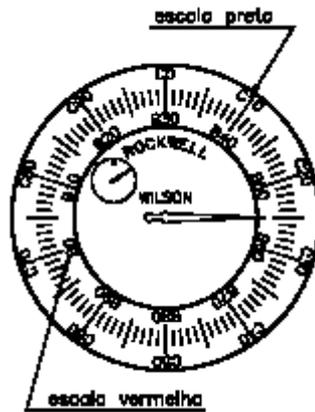
DUREZA ROCKWELL

No início do século XX houve muitos progressos no campo da determinação da dureza.

Em 1922, Rockwell desenvolveu um método de ensaio de dureza que utilizava um sistema de pré-carga. Este método apresenta algumas vantagens em relação ao ensaio Brinell, pois permite avaliar a dureza de metais diversos, desde os mais moles até os mais duros. Entretanto, também tem limitações, o que indica que está longe de ser a solução técnica ideal.

O ensaio Rockwell, que leva o nome do seu criador, é hoje o processo mais utilizado no mundo inteiro, devido à rapidez e à facilidade de execução, isenção de erros humanos, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão.

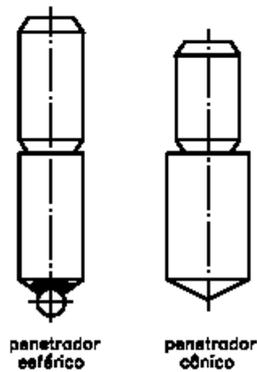
Todas essas razões justificam conhecer este método de ensaio, bem como conhecer qual o equipamento empregado e como utilizar as diferentes escalas de dureza Rockwell.



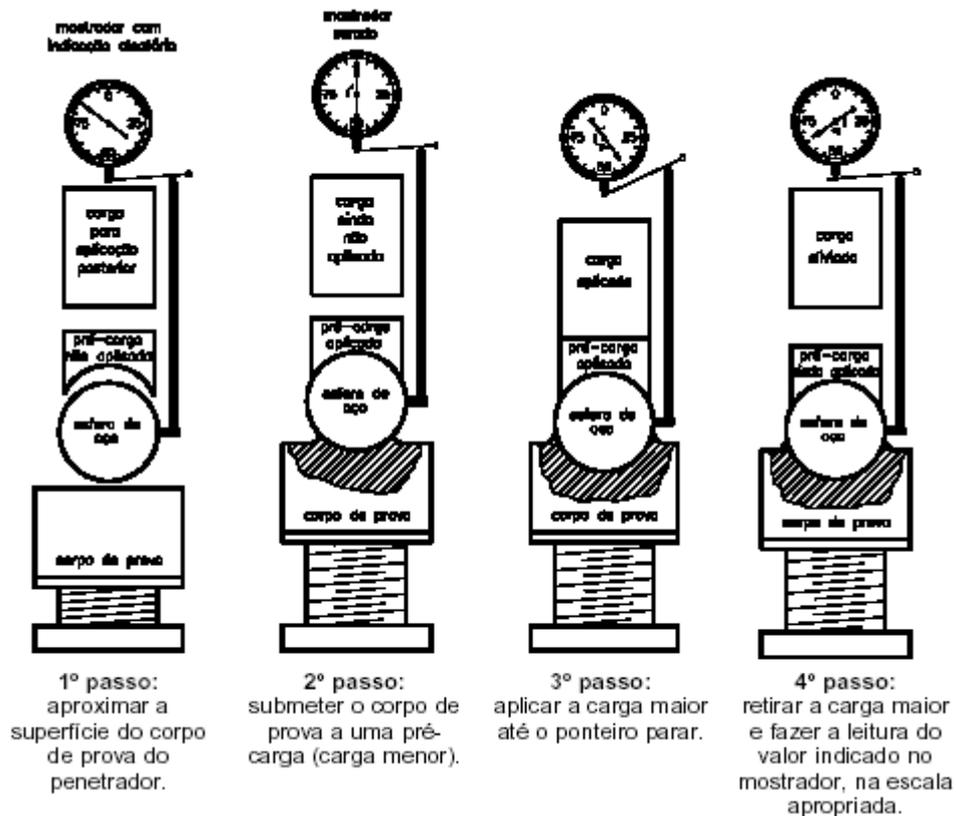
Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material.

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).



Descrição do processo

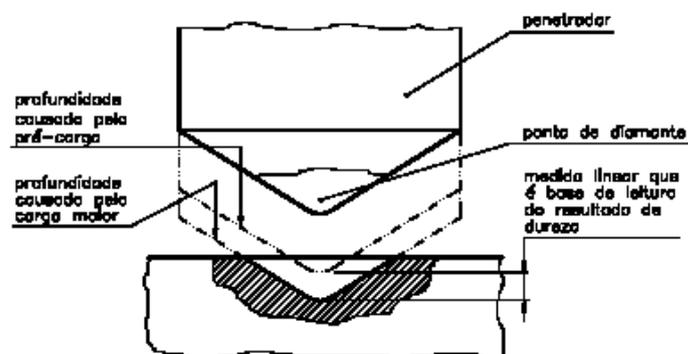


Quando se utiliza o penetrador cônico de diamante, deve-se fazer a leitura do resultado na escala externa do mostrador, de cor preta. Ao se usar o penetrador esférico, faz-se a leitura do resultado na escala vermelha.

Nos equipamentos com mostrador digital, uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada.

O valor indicado na escala do mostrador é o valor da dureza Rockwell. Este valor corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga.

Em outras palavras: a profundidade da impressão produzida pela carga maior é a base de medida do ensaio Rockwell. Veja a seguir a representação esquemática da profundidade produzida por um penetrador cônico de diamante.



A escala do mostrador é construída de tal modo que uma impressão profunda corresponde a um valor baixo na escala e uma impressão rasa corresponde a um

valor alto na escala. Desse modo, um valor alto na escala indica que se trata de um material de alta dureza.

Equipamento para ensaio de dureza Rockwell

Pode-se realizar o ensaio de dureza Rockwell em dois tipos de máquinas, ambas com a mesma técnica de operação, que diferem apenas pela precisão de seus componentes.



Máquina padrão de Dureza Rockwell

A máquina padrão mede a dureza Rockwell normal e é indicada para avaliação de dureza em geral.

A máquina mais precisa mede a dureza Rockwell superficial, e é indicada para avaliação de dureza em folhas finas ou lâminas, ou camadas superficiais de materiais.

Na máquina Rockwell normal, cada divisão da escala equivale a 0,02 mm; na máquina Rockwell superficial, cada divisão equivale a 0,01 mm.

As escalas de dureza Rockwell foram determinadas em função do tipo de penetrador e do valor da carga maior.

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 3 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.

Os quadros a seguir mostram as escalas mais utilizadas nos processos industriais.

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

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL E APLICAÇÕES					
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
15 N	preta	15	diamante cone 120°	65 a 90 HR 15N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
30 N	preta	30	diamante	40 a 80 HR 30N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
45 N	preta	45	diamante	35 a 70 HR 45N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
15 T	vermelha	15	esfera aço 1,5875 mm	50 a 94 HR 15T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
30 T	vermelha	30	esfera aço 1,5875 mm	10 a 84 HR 30T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
45 T	vermelha	45	esfera aço 1,5875 mm	10 a 75 HR 45T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG

Para entender a informação contida na coluna **Faixa de Utilização**, é necessário saber como são representados os valores de dureza Rockwell.

Representação da dureza Rockwell

O número de dureza Rockwell deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada.

Veja, por exemplo, a interpretação do resultado 64HRC:

- 64 é o valor de dureza obtido no ensaio;
- HR indica que se trata de ensaio de dureza Rockwell;
- a última letra, no exemplo C, indica qual a escala empregada.

Verificando o entendimento:

Interprete o seguinte resultado: 50HR15N?

Resposta:

50 é o valor de dureza Rockwell superficial na escala 15N.

O número obtido no ensaio Rockwell corresponde a um valor adimensional, que somente possui significado quando comparado com outros valores da mesma escala.

Utilizando as escalas de dureza Rockwell

Suponha que lhe peçam para fazer um ensaio de dureza Rockwell na escala C. Recorrendo aos quadros apresentados anteriormente, que trazem as escalas de dureza Rockwell, é possível identificar as condições de realização do ensaio.

- Uma vez que o ensaio deve ser feito na escala C, você já sabe que se trata de um ensaio de dureza Rockwell normal.
- O ensaio é de dureza Rockwell normal, logo a máquina a ser utilizada é a padrão.
- O penetrador para esta escala é o cônico de diamante.
- O penetrador deve ter 120° de conicidade.
- A carga maior do ensaio é de 150 kgf.
- A leitura do resultado é feita na escala preta do relógio.

Verificando o entendimento:

Uma empresa adquiriu um material com a seguinte especificação: 70HR15T. Quais as condições do ensaio para confirmar se o material está de acordo com a especificação?

Resposta:

Tipo de máquina:

Tipo de penetrador:

Dimensão do penetrador:

Pré-carga:

Carga maior:

Cor da escala onde é feita a leitura do resultado:

A representação HR15T indica que as informações deverão ser procuradas na escala Rockwell superficial. Logo, a máquina deve ser a mais precisa.

O penetrador será uma esfera de aço com 1,5875 mm de diâmetro. Será aplicada uma pré-carga de 3 kgf e a carga maior será de 15 kgf. O resultado deverá ser lido na escala vermelha.

Profundidade de penetração

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.

É possível obter a medida aproximada desta profundidade (P), a partir do valor de dureza indicado na escala da máquina de ensaio, utilizando as fórmulas a seguir:

- Penetrador de diamante:

HR normal: $P = 0,002 \times (100 - HR)$

HR superficial: $P = 0,001 \times (100 - HR)$

- Penetrador esférico:

HR normal: $P = 0,002 \times (130 - HR)$

HR superficial: $P = 0,001 \times (100 - HR)$

Por exemplo, a profundidade aproximada de penetração que será atingida ao ensaiar um material com dureza estimada de 40HRC é de 0,12 mm.

Como se chegou a este resultado? Consultando as tabelas com as escalas de dureza Rockwell, ficamos sabendo que a escala C se refere à dureza Rockwell normal e que esta escala utiliza penetrador de diamante. O passo seguinte foi escolher a fórmula: $P = 0,002 \times (100 - HR)$ e fazer as contas.

Verificando o entendimento

Qual deve ser a espessura mínima de uma chapa que será submetida ao ensaio de dureza Rockwell para um material com dureza esperada de 80HRB?

Resposta:

A primeira coisa que deve ser feita é descobrir a profundidade aproximada atingida pelo penetrador.

Para isso, deve ter ido ao quadro com a escala B (dureza Rockwell normal), e constatado que esta escala usa penetrador esférico.

Com essas informações, deve ter escolhido a fórmula: $P = 0,002 \times (130 - 80)$ para encontrar o valor da profundidade aproximada. Feitos os cálculos, deve ter concluído que esta profundidade é de aproximadamente 0,1 mm.

Uma vez que a espessura do corpo de prova equivale, em geral, a pelo menos 17 vezes a medida da profundidade, a espessura mínima da chapa deve ser de 1,7 mm.

Como se vê, o ensaio de dureza Rockwell tornou possível avaliar a dureza de materiais que não poderiam ser submetidos ao ensaio Brinell. Mesmo assim, há situações em que nem o ensaio Brinell nem o Rockwell são recomendáveis. Por isso, muitas vezes recorre-se a outro tipo de ensaio de dureza, o ensaio Vickers.

DUREZA VICKERS

Na comparação entre os métodos de ensaio de dureza, verifica-se que o ensaio Rockwell representou um avanço em relação ao ensaio Brinell, já que possibilitou avaliar a dureza de vários metais, que antes não podiam ser ensaiados quanto à dureza.

Entretanto, o ensaio Rockwell também mostra limitações. Por exemplo, suas escalas não têm continuidade. Por isso, materiais que apresentam dureza no limite de uma escala e no início de outra não podem ser comparados entre si quanto à dureza.

Outra limitação importante é que o resultado de dureza no ensaio Rockwell não tem relação com o valor de resistência à tração, como acontece no ensaio Brinell.

Vários pesquisadores tentaram encontrar uma solução para superar essas dificuldades. Coube a Smith e Sandland, em 1925, o mérito de desenvolver um método de ensaio que ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers. Este método leva em conta a relação ideal entre o diâmetro da esfera do penetrador Brinell e o diâmetro da calota esférica obtida, e vai além porque utiliza outro tipo de penetrador, que possibilita medir qualquer valor de dureza, incluindo desde os materiais mais duros até os mais moles.

Isso não quer dizer que o ensaio Vickers resolva todos os problemas de avaliação de dureza dos materiais. Mas, somado aos outros dois métodos já estudados, é um bom caminho para atender às necessidades de processos industriais cada vez mais exigentes e sofisticados.

Na seqüência, veremos como é realizado este ensaio e como se calcula a dureza Vickers, além de constatar as vantagens e limitações deste método, em comparação com os dois anteriores.

Cálculo da dureza Vickers

O ensaio desenvolvido por Smith e Sandland ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

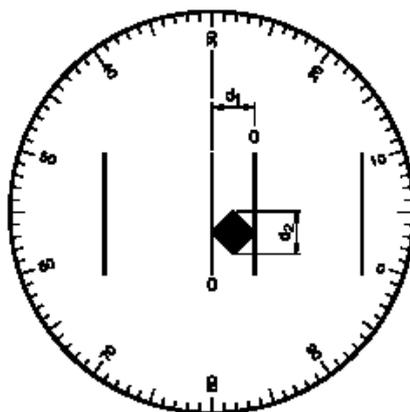
A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga.



O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte:

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

A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais (d1 e d2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide.



Conhecendo as medidas das diagonais, é possível calcular a área da pirâmide de base quadrada (A), utilizando a fórmula:

$$A = \frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}$$

Voltando à fórmula para cálculo da HV, e substituindo A pela fórmula acima, temos:

$$A = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \operatorname{sen}68^\circ}} \Rightarrow HV = \frac{F \times 2 \operatorname{sen}68^\circ}{d^2} \Rightarrow HV = \frac{1,8544 F}{d^2}$$

Na fórmula anterior, a força deve ser expressa em quilograma-força (kgf) e o “d” corresponde à diagonal média, ou seja:

$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

e deve ser expresso em milímetro (mm). Se a máquina der o resultado em micron (μ), esse valor deve ser convertido em milímetro.

Por exemplo, para encontrar o valor de dureza Vickers de um material que apresentou 0,24 mm e 0,26 mm de medida de diagonal da impressão, após aplicação de uma força de 10 kgf, basta utilizar as fórmulas apresentadas.

Primeiro, é preciso calcular o valor da diagonal média, que corresponde a:

$$d = \frac{d1 + d2}{2} \Rightarrow d = \frac{0,24 + 0,26}{2} \Rightarrow d = 0,25 \text{ mm}$$

Agora, só falta substituir os termos da fórmula de cálculo de dureza pelos valores conhecidos e fazer os cálculos:

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} = \frac{1,8544 \times 10}{0,25^2} = \frac{18,544}{0,0625} \Rightarrow HV = 296,7$$

Assim, ficamos sabendo que o valor de dureza Vickers (HV) para o material ensaiado é 296,7.

Outra forma de obter os valores de dureza Vickers é consultar tabelas montadas para determinadas cargas, em função da diagonal média.

Representação do resultado do ensaio

A dureza Vickers é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo HV e de um número que indica o valor da carga aplicada. No exercício anterior, a representação do valor da dureza é: 296,7 HV 10.

A representação 440 HV 30 indica que o valor da dureza Vickers é 440 e que a carga aplicada foi de 30 kgf.

O tempo normal de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos. Quando a duração da aplicação da carga é diferente, indica-se o tempo de aplicação após a carga. Por exemplo, na representação: 440 HV 30/20, o último número indica que a carga foi aplicada por 20 segundos.

Testando o entendimento:

Como se representa uma dureza Vickers 108, obtida num ensaio em que foi aplicada uma força de 5 kgf por 10 segundos?

Resposta:

Como 10 segundos está dentro do tempo normal de carga, deve ser representado: 108 HV 5.

Cargas usadas no ensaio Vickers

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. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada.

Por uma questão de padronização, as cargas recomendadas são: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120 kgf.

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. Neste caso, o ensaio feito na máquina Vickers é o ensaio de dureza Brinell.

Para aplicações específicas, voltadas principalmente para superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) ou para a determinação de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o ensaio de microdureza Vickers.

A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10 gf. Na microdureza, como a carga aplicada é pequena, a impressão produzida é microscópica, como mostra a figura ampliada na próxima página, à direita.



Máquina de micro dureza Vickers

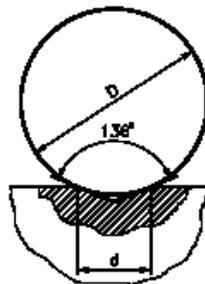


Impressão em microconstituíntes individuais

Comparando Brinell e Vickers

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de 136° da ponta de diamante produz uma impressão que mantém a relação ideal de 0,375 entre o diâmetro da calota esférica (d) e o diâmetro da esfera do penetrador Brinell (D), seja qual for a carga aplicada.

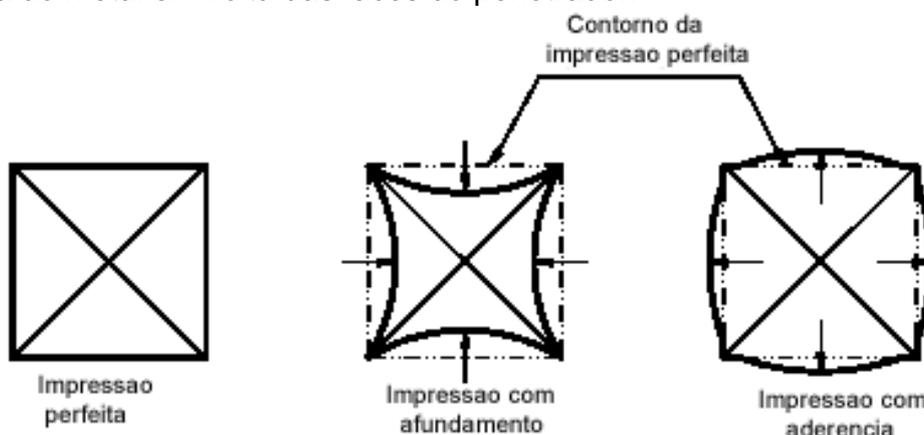
É isso o que mostra o desenho abaixo.



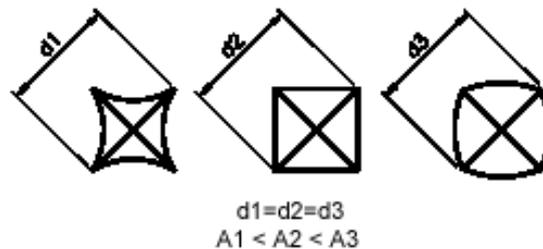
O uso de cargas diferentes é necessário para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível com o visor da máquina.

Defeitos de impressão

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.



Como o cálculo do valor de dureza Vickers utiliza a medida da média de duas diagonais, esses erros afetam o resultado da dureza: teremos um valor de dureza maior do que o real nos casos de afundamento e um valor de dureza menor do que o real, nos casos de aderência.

É possível corrigir esses defeitos alterando-se o valor da carga do ensaio para mais ou para menos, dependendo do material e do tipo de defeito apresentado.

Vantagens e limitações do ensaio Vickers

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 a maioria das peças, mesmo as acabadas.

O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável.

Este ensaio aplica-se a materiais de qualquer espessura, e pode também ser usado para medir durezas superficiais. A espessura da amostra deve ter pelo menos o valor de 1,5 x a diagonal da impressão, segundo o ASTM.

Por outro lado, devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medida ou de aplicação de carga, que alteram muito os valores reais de dureza.

A distância entre impressões deve ser de 2,5 x a diagonal de impressão e a distância das bordas deve ser pelo menos 2,5 x a diagonal.

A preparação do corpo de prova para microdureza deve ser feita, obrigatoriamente, por metalografia, utilizando-se, de preferência, o polimento eletrolítico, para evitar o encruamento superficial.

Quando se usam cargas menores do que 300 gf, pode haver recuperação elástica, dificultando a medida das diagonais.

A máquina de dureza Vickers requer aferição constante, pois qualquer erro na velocidade de aplicação da carga traz grandes diferenças nos valores de dureza.