

## Ensaaios de Dureza

Ao escrever a lápis ou lapiseira, você sente com facilidade a diferença entre uma grafite macia que desliza suavemente sobre o papel, e uma grafite dura que deixa o papel marcado. Entretanto, a dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, originando diversas interpretações.

Num bom dicionário, você encontra que dureza é qualidade ou estado de duro, rijez.. Duro, por sua vez, é definido como difícil de penetrar ou de riscar, consistente, sólido..

Essas definições não caracterizam o que é dureza para todas as situações, pois ela assume um significado diferente conforme o 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 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.

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.

Os ensaios de dureza são normalmente realizados em temperatura ambiente e são classificados de acordo com a forma com estes são realizados. Os principais ensaios de dureza são: a) por risco; b) por choque ou rebote e c)

por penetração.

### **Avaliação da dureza: como tudo começou**

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.

**a) Dureza por risco.** Esse tipo de ensaio de dureza é pouco utilizado no caso dos materiais metálicos, sendo mais utilizados em mineralogia. Dentre os ensaios de dureza por riscos existentes, o de dureza Mohs é o mais conhecido. O ensaio de dureza Mohs foi introduzido em 1822 e é baseado na capacidade que um material tem de riscar o outro.

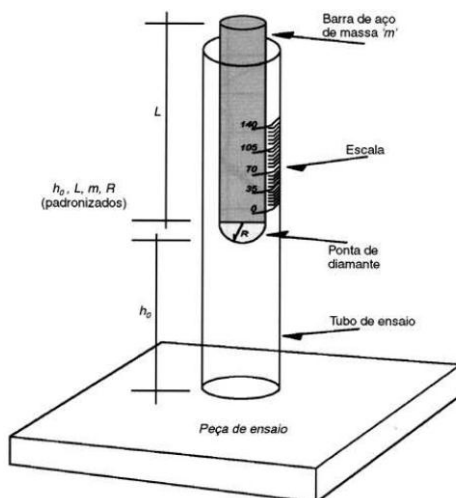
Este método deu origem à escala de dureza Mohs, que apresenta dez minérios-padrões, ordenados numa escala crescente do grau 1 ao 10, de acordo com sua capacidade de riscar ou ser riscado.

Escala Mohs		Extensão da Escala Mohs	
Dureza nº	Mineral de Referência	Dureza nº	Mineral de Referência
1	Talco	1	Talco
2	Gipsita	2	Gipsita
3	Calcita	3	Calcita
4	Fluorita	4	Fluorita
5	Apatita	5	Apatita
6	Feldspato (Ortósio)	6	Ortósio
7	Quartzo	7	Sílica pura vidrosa
		8	Quartzo
8	Topázio	9	Topázio
9	Safira ou Corindo	10	Granada
10	Diamante	11	Zirconita fundida
		12	Alumina fundida
		13	Carboneto de Silício
		14	Carboneto de Boro
		15	Diamante

Esta escala não é conveniente para os metais, porque a maioria deles apresenta durezas entre 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. 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.

**b) Dureza por choque ou rebote.** Nesse tipo de ensaio de dureza a impressão de dureza é causada pela queda livre de um êmbolo com um penetrador (com uma ponta padronizada de diamante) na superfície plana do corpo de prova. O valor da dureza é proporcional à energia consumida para deformar o corpo de prova e é representado pela altura alcançada pelo êmbolo no rebote. Quanto mais dúctil o material, menor a altura alcançada pelo êmbolo, pois quanto mais dúctil o material maior a energia gasta na deformação. O método mais importante da dureza por choque ou rebote é a dureza Shore. Nesse ensaio é utilizada uma barra de aço de massa igual 250 g, com uma ponta arredondada de diamante, a qual é colocada dentro de um tubo de vidro, com uma escala graduada entre 0 e 140. A barra é liberada de uma altura padrão de 256 mm. A **figura 1** mostra esquematicamente o equipamento utilizado para medir dureza Shore.



**Figura 1.** Esboço do equipamento para medir dureza Shore. (Garcia, A. Ensaios dos Materiais)

**c) Dureza por penetração.** Os ensaios de dureza por penetração mais importantes são os ensaios de dureza Brinell, de dureza dureza Rockwell e de Vickers (e de microdureza Vickers).

## 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  $d$ .

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 ( $A_c$ ).

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

Em linguagem matemática:

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

A área da calota esférica é dada pela fórmula:

Utilizando-se a relação matemática entre a profundidade ( $p$ ) e o diâmetro da calota ( $d$ ) para chegar à fórmula matemática que permite o cálculo da dureza

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

HB, representada a seguir:

onde  $p$  é a profundidade da calota.

Acompanhe um exemplo de aplicação desta fórmula:

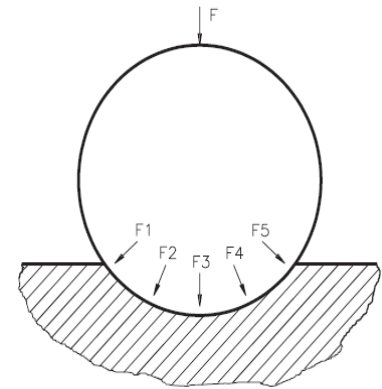
· Uma amostra foi submetida a um ensaio de dureza Brinell no qual se usou uma esfera de 2,5 mm de diâmetro e aplicou-se uma carga de 187,5 kgf. As medidas dos diâmetros de impressão foram de 1 mm. Qual a dureza do material ensaiado?

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

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \Rightarrow HB = \frac{2 \times 187,5}{\pi \times 2,5 (2,5 - \sqrt{2,5^2 - 1^2})} =$$

$$HB = \frac{375}{3,14 \times 2,5 (2,5 - \sqrt{6,25 - 1})} \Rightarrow HB = \frac{375}{7,85 (2,5 - 2,29)} =$$

$$HB = \frac{375}{7,85 \times 0,21} \Rightarrow HB = \frac{375}{1,6485} \Rightarrow HB = 227$$



A unidade  $\text{kgf/mm}^2$ , 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.

A localização de uma impressão de dureza Brinell: deve manter uma distância mínima de **2,5d** da superfície da amostra; a espessura da amostra deve ser de, no mínimo, **10d** e a distância entre as impressões deve ser de, no mínimo, **5d**.

Para se fazer o ensaio de dureza Brinell deve-se escolher cargas **Q** e esferas de diâmetros **D** tais que se verifiquem a seguinte relação:  $\frac{Q}{D^2} = cte$

Os cálculos anteriores são dispensáveis, se você dispuser de uma tabela apropriada.

Veja a seguir um exemplo de tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão d.

## NORMA

A norma brasileira para a realização do ensaio de dureza Brinell é a **NBR-6394 (ABNT)** e a norma internacional mais utilizada é a **ASTM E10-93**.

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

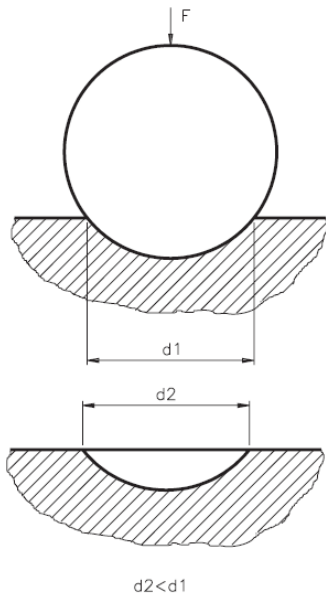
Os valores indicados entre parênteses são somente referenciais, pois estão além da faixa normal do ensaio Brinell.

### **Vantagens e limitações do ensaio Brinell:**

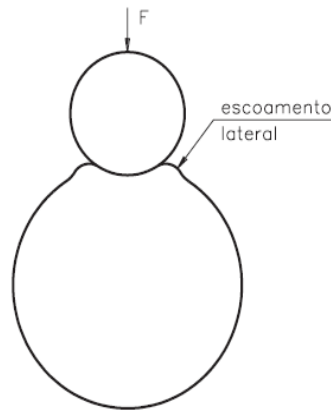
O ensaio Brinell é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas.

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

É feito em equipamento de fácil operação. Por outro lado, o uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada. Usando-se esferas de aço temperado só é



possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera.

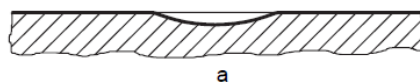


A recuperação elástica é uma fonte de erros, pois o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga. Isto é mais sensível quanto mais duro for o metal.

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.



a



b



c

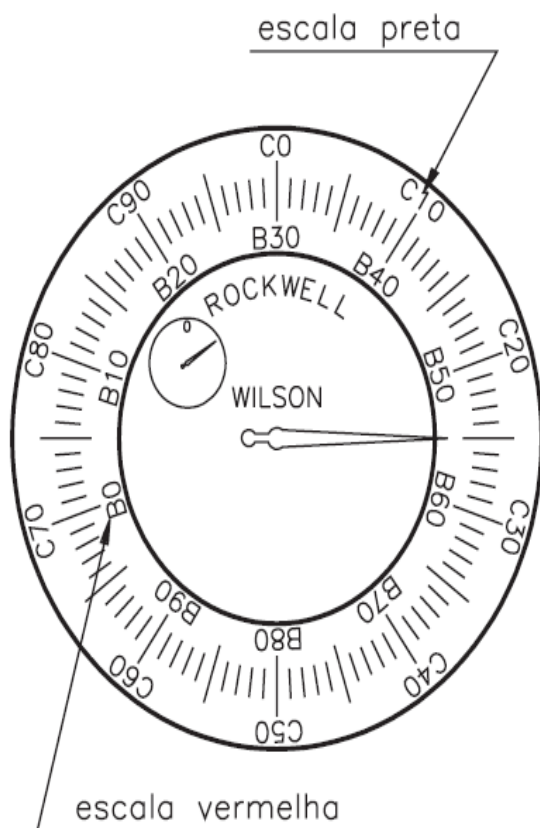
Em certas situações em que é necessário avaliar a dureza de um material ou produto, outros tipos de ensaio podem ser mais aconselháveis. Você vai estudar dois deles nas duas próximas aulas.

## 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.

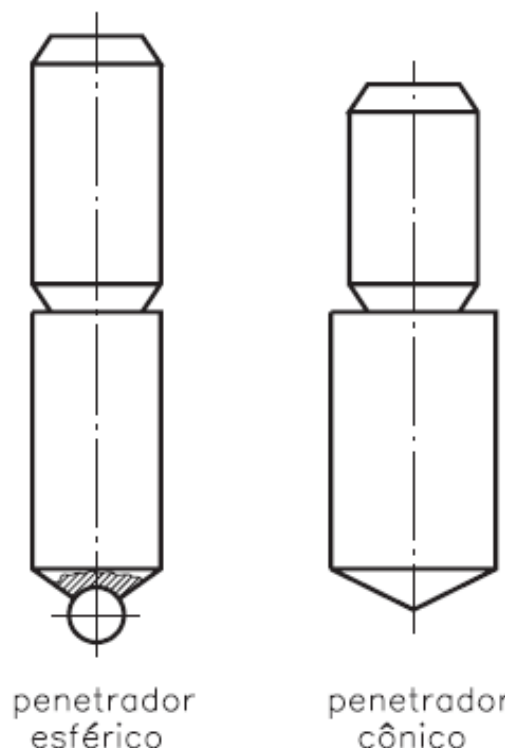
Todas essas razões justificam dedicar uma aula ao estudo deste método de ensaio. No final, você ficará sabendo como é feito o ensaio Rockwell, qual o equipamento empregado e como utilizar as diferentes escalas de dureza Rockwell.



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

### Em que consiste o ensaio 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





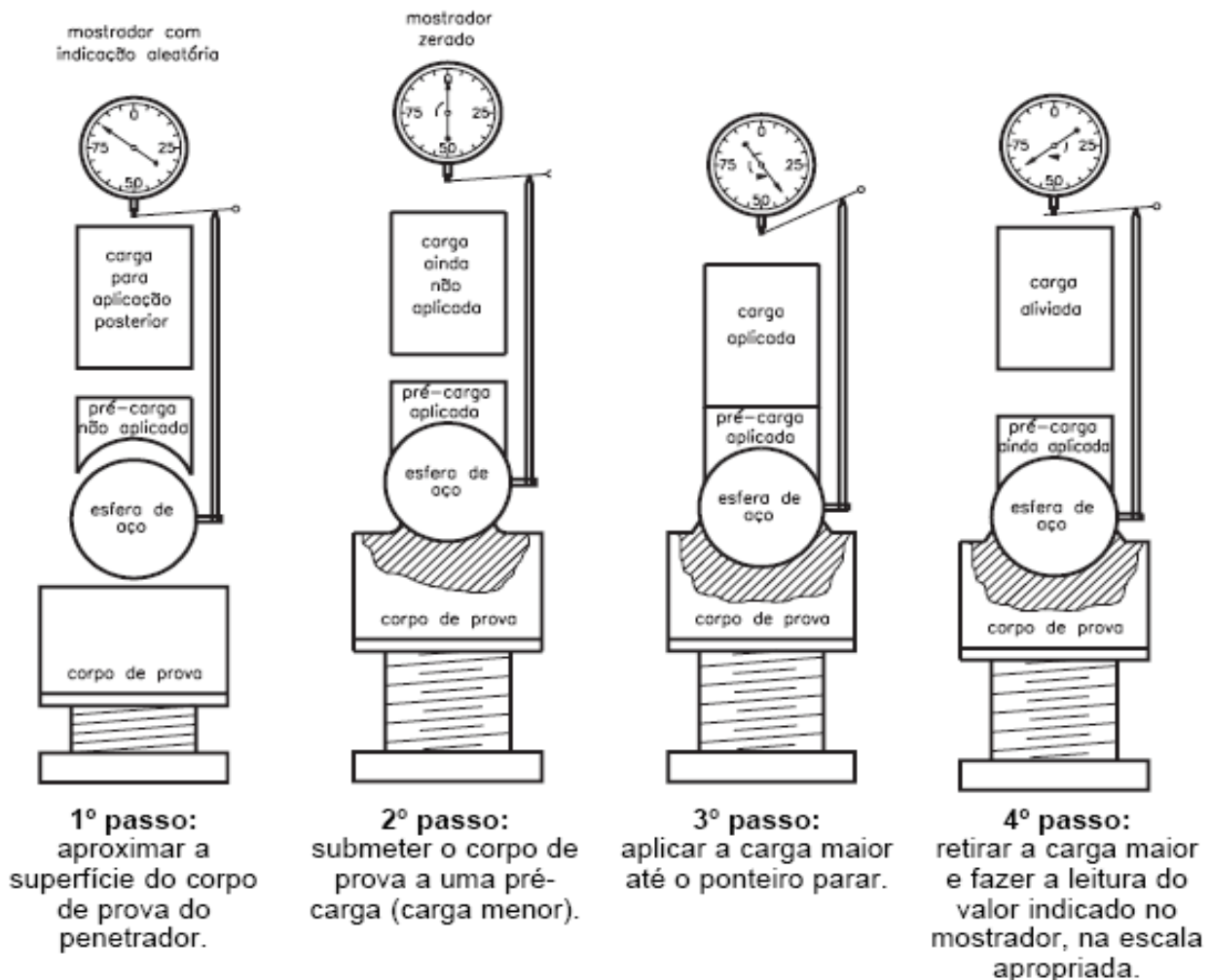
uma escala predeterminedada, adequada à faixa de dureza do material. Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).

### 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.



**Atenção!!** 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.

A máquina padrão mede a dureza Rockwell normal e é indicada para valiação 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. E por falar em escalas, analise os quadros a seguir, que mostram as escalas mais utilizadas nos processos industriais.

Para entender a informação contida na coluna Faixa de utilização nas duas tabelas seguintes, você precisa 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.

Pare e resolva!

### Verificando o entendimento

Como você interpreta o seguinte resultado: 50HR15N?

Resposta: .....

Se você escreveu que 50 é o valor de dureza Rockwell superficial na escala 15N, acertou.

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

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

A norma brasileira para a realização do ensaio é a **NBR-6671 (ABNT)** e a norma internacional mais utilizada é a **ASTM E18-94**.

**Observações gerais sobre os ensaios de dureza:** os copos de prova ou as peças devem ter, na região a ser medida a dureza, superfície plana, com bom acabamento (retifica ou polimento) e a superfície deve estar sempre limpa. Se estes requisitos não forem cumpridos, as medidas ficam comprometidas. De um modo geral, as medidas de dureza ou de microdureza devem ser repetidas. Uma única medida de dureza pode não ser representativa da peça ou corpo de prova.

### 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. Como fazer isso? Acompanhe a demonstração.

- 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.

Ficou claro? Então resolva o próximo exercício para comprovar o entendimento:

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

Tipo de penetrador: .. O penetrador será uma esfera de aço.

Dimensão do penetrador: .. com 1,5875 mm de diâmetro.

Pré-carga: .. Será aplicada uma pré-carga de 3 kgf.

Carga maior: ... a carga maior será de 15 kgf.

Cor da escala onde é feita a leitura do resultado: . 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:  $P = 0,002 \cdot (100 - HR)$

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

• Penetrador esférico:

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

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

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:  $P = 0,002 \cdot (100 - HR)$  e fazer as contas. Tente você também!

Como você viu, 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. Neste caso, utiliza-se um outro tipo de ensaio de dureza, o ensaio Vickers.

## **Dureza Vickers**

Acima, você ficou sabendo que o ensaio de dureza 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.

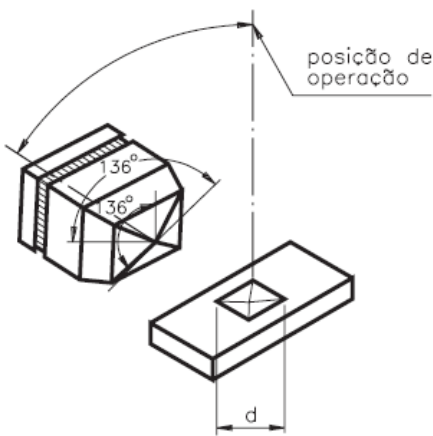
Vários pesquisadores tentaram encontrar uma solução para superar essas dificuldades.

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.

## 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.

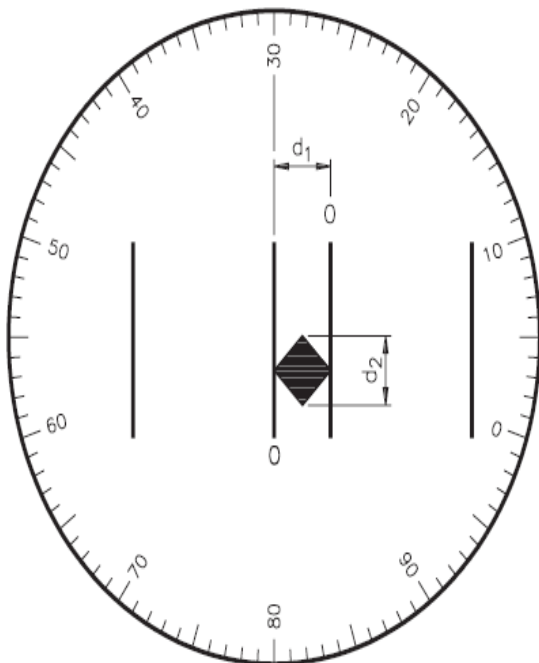
O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado.

Essa relação, expressa em linguagem

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

matemática é a seguinte:

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 ( $d_1$  e  $d_2$ ) 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

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

fórmula:

Voltando

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

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

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

seja:  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  e deve ser expresso em milímetro (mm). Se a máquina der

o resultado em micron ( $\mu$ ), 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:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \Rightarrow d = \frac{0,24 + 0,26}{2} \Rightarrow d = 0,25 \text{ mm}$$

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

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

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.

### **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.

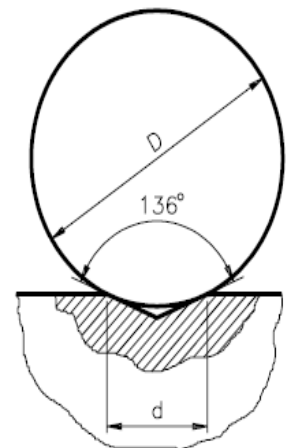
A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10 gf.

Na microdureza, como a carga aplicada é pequena, a impressão produzida é microscópica.

A norma brasileira para a realização do ensaio de dureza Vickers é a **NBR-6672 (ABNT)**.

### Comparando Brinell e Vickers

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de  $136^\circ$  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.

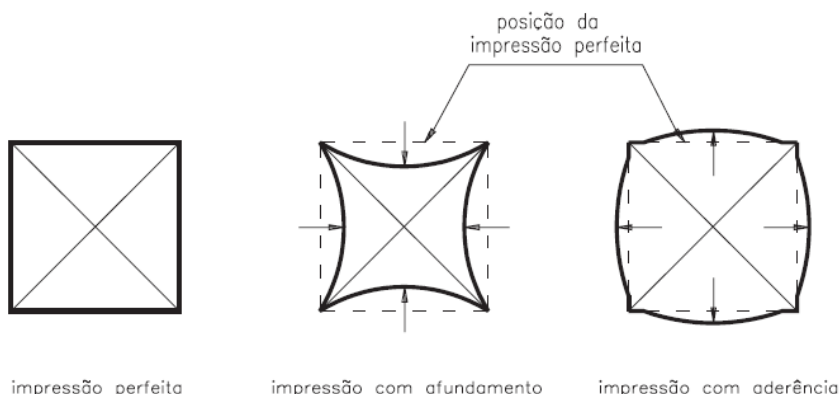


É isso o que mostra o desenho ao lado.

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.



impressão perfeita

impressão com afundamento

impressão com aderência

## Ensaio Jominy. (Ensaio de Temperabilidade).

Antes de descrever o ensaio Jominy vamos descrever alguns pontos importantes, que são temperabilidade, martensita e tratamento térmico de têmpera.

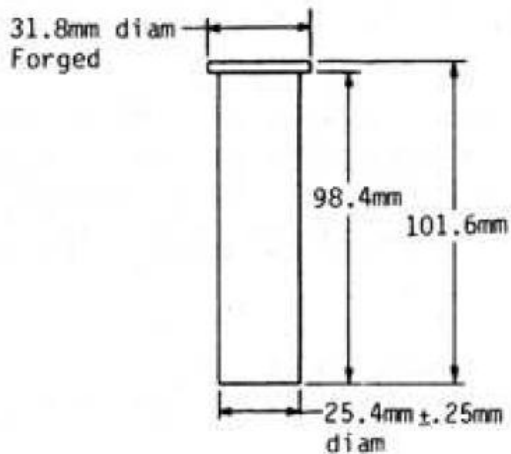
1. Temperabilidade. É capacidade que um aço tem de formar uma fase dura e frágil chamada martensita. Quanto maior a fração volumétrica de martensita, mais duro será o aço. Quanto maior o teor de carbono também será maior a temperabilidade do aço (a adição de elementos de liga também pode favorecer um aumento da temperabilidade do aço, acentuando o efeito do carbono). A temperabilidade de um aço pode também ser definida pelo valor da dureza HRC ou pelo valor da dureza ao longo de uma dada distância no ensaio Jominy.

2. Martensita. É uma fase metaestável que se forma a partir da austenita (fase que está presente nos aços em temperaturas em torno de 850o C) durante o resfriamento rápido de aços.

3. Tratamento térmico de têmpera. Esse tratamento tem a seguinte seqüência: aquecesse o aço em temperaturas, geralmente, entre 850 a 900o C. Deixa-se a peça no forno até que toda a peça atinja a temperatura desejada. Logo a seguir tira-se a peça do forno e resfria-se rapidamente a mesma em água ou óleo. Esse tratamento térmico visa a obtenção de martensita e, portanto, deve causar um aumento de dureza na peça. Por isso, o tratamento de têmpera está sempre associado a aumentos de dureza.

O **Ensaio Jominy** nada mais é do que um ensaio para se avaliar a capacidade de um aço formar martensita. Isto é, verificar o aumento de dureza que o material adquire devido ao tratamento térmico de têmpera. A norma **ASTM A 255** descreve todo o procedimento para a realização do ensaio Jominy.

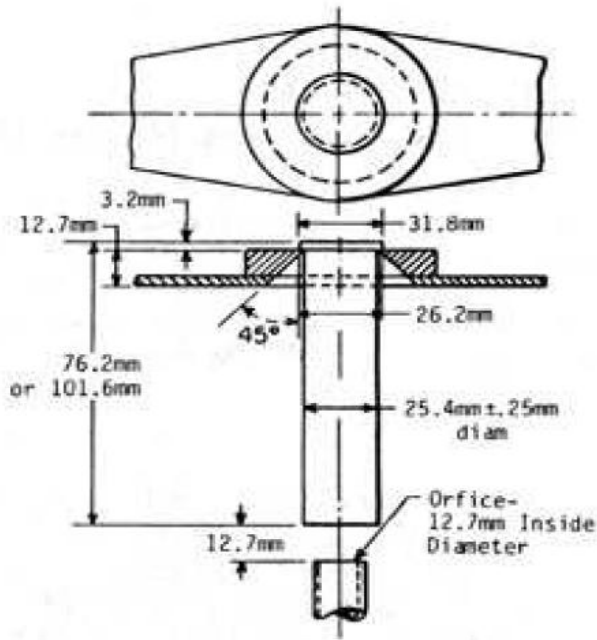
No ensaio Jominy, o corpo de prova tem forma e dimensões padrão, as quais são apresentadas do esquema da **figura 5**.



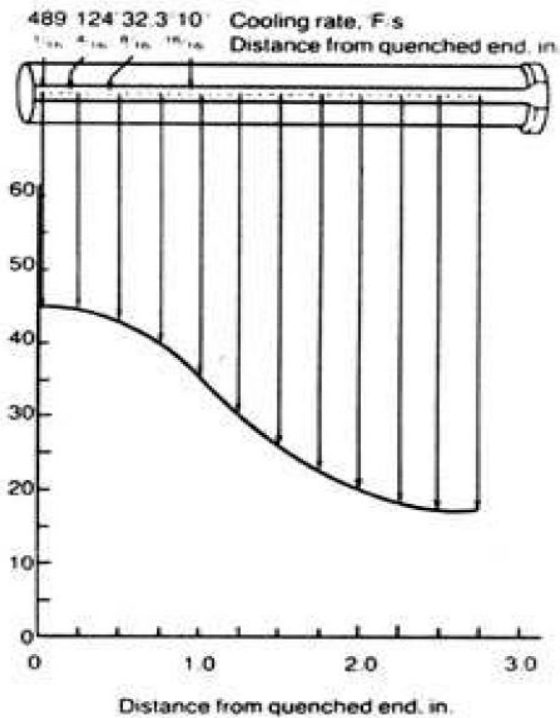
**Figura 5.** Dimensões do corpo de prova para o ensaio Jominy.

O corpo de prova de ensaio Jominy é colocado no forno em uma temperatura em torno de 900o C por cerca de 30 minutos. Após esse tempo o corpo de prova é retirado rapidamente do forno e colocado em um dispositivo onde ocorrerá o resfriamento do mesmo. Esse dispositivo é composto por um suporte para o corpo de prova na parte superior e por um sistema de resfriamento com água na parte inferior. O esquema da **figura 6** ilustra o dispositivo de resfriamento do corpo de prova. Esse dispositivo de resfriamento propicia que as diferentes regiões do corpo de prova tenham também diferentes taxas de resfriamento (**figura 7**). A base do corpo de prova será resfriada rapidamente pela água corrente, o que não ocorre com o topo do mesmo.

Após o resfriamento do corpo de prova, este é retificado e são feitas medidas de dureza ao longo de seu comprimento. A medida de dureza feita é Rockwell C (**HRC**). A dureza é sempre maior dureza junto à base do corpo de prova, onde as taxas de resfriamento são mais elevadas. Se o material apresentar dureza elevada, mesmo em taxas de resfriamento mais baixas, significa que o aço apresenta elevada temperabilidade. A **figura 7** o gráfico da dureza ao longo do corpo de prova.



**Figura 6.** Esquema do dispositivo para realização do ensaio Jominy.



**Figura 7.** Medidas de dureza ao longo do corpo de prova.

Os resultados do ensaio permitem comparar a temperabilidade de diferentes aços e também servem como uma maneira de avaliar o material recebido numa aquisição (controle de qualidade).

## Aço 1045

Composição química (porcentagem em peso)

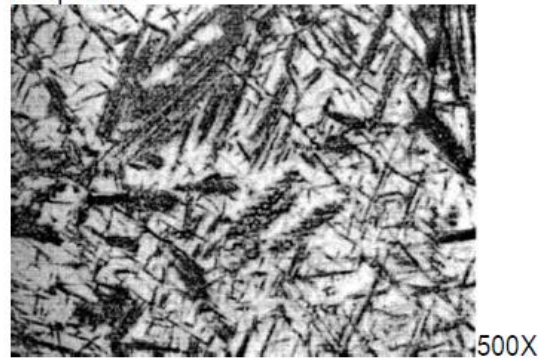
C	Mn	P, max	S, max	Si	Ni	Cr	Mo	Outros elementos
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	-	-	-	-	-

Micrografia

Normalizado



Temperado



## Aço 4140

Composição química (porcentagem em peso)

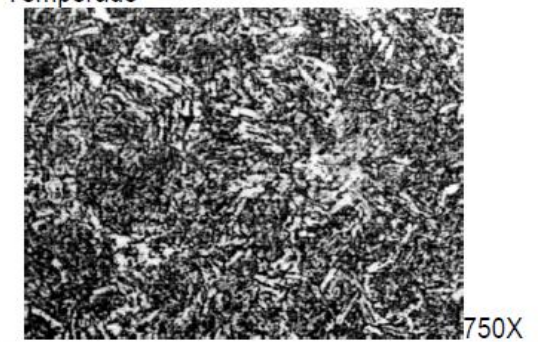
C	Mn	P, max	S, max	Si	Ni	Cr	Mo	Outros elementos
0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,20-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-

Micrografia

Normalizado



Temperado



## Bibliografia.

1. Vicente Chiaverini. **Tecnologia Mecânica**. Vol. 1. 2a edição. Makron Books. 1986. São Paulo.
2. Sérgio Augusto de Souza. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5a edição. Editora Edgar Blücher Ltda. 1982. São Paulo.
3. Amauri Garcia; J. A. Spim, C. A. dos Santos. **Ensaio dos Materiais**. LTC. 2000. Rio de Janeiro.

4. Angelo Fernando Padilha. **Materiais de Engenharia-Microestrutura e Propriedades**. Hemus. 1997.São Paulo.
5. **Metals Handbook**. Vol 7. 8a edição. 1973. American Society for Metals.
6. George Krauss. Steels: **Heat Treatment and Processing Principles**. ASM. 1989.USA.

## EXPERIMENTO:

### 1. Ensaio de Dureza Rockwell – Temperabilidade.

Serão avaliadas as durezas Rockwell C (HRC, penetrador cone de diamante e a carga aplicada é de 60 kgf) em um corpo de prova de ensaio Jominy.

Tabela da Dureza em função da Distância do Topo do corpo de prova de ensaio Jominy.

Dureza ABNT4140 (Turma )	Distância da Base (mm)	Dureza ABNT1045 (Turma xx )	Distância da Base (mm)
		65,0	2,0
		62,0	7,0
		60,0	12,0
		58,0	17,0
		57,0	22,0
		56,0	27,0
		55,5	32,0
		56,5	37,0
		56,0	42,0
		56,5	47,0
		56,0	52,0
		55,5	57,0
		55,5	62,0

Gráfico da Dureza em função da Distância do Topo do corpo de prova de ensaio Jominy.

Comparar resultados do aço ABNT 1045 com ABNT 4140.

O aço 1045 apresenta menor temperabilidade que o ABNT 4140 (como se chegou a essa conclusão?).

Isso não se deve ao teor de carbono, que é muito próximo nos dois aços, mas aos elementos de liga presentes no aço ABNT 4140.

## 2. Ensaio de Dureza Rockwell nas amostras ensaiadas por tração:

### Fazer medidas ao longo da deformação da amostra

A tabela a seguir apresenta os valores estimados de dureza obtidos a partir da dureza Vickers medidos em chapas de mesmo lote ensaiados pelos alunos. (pode utilizar como referência para comparação e discussão dos resultados).

Material	Dureza HV	HRB	HB	HRsuperficial	Resist. Equiv.
Aço Inox	180	89	180	89	600 MPa
Latão	135	74	135	85	450 MPa
Aço Carbono	100	62	79	79	
Alumínio	55		20-30		100 MPa

### 3. Relatório (entregar <sup>junto com</sup> ~~separado do~~ relatório de ensaio de tração)

Com base nos resultados da tabela e na observação o encaminhamento do relatório deve seguir a sequência:

1. Capa com nome e número dos componentes do grupo mais o nome de “guerra”.
2. Primeira parte do relatório, apresentar a curva obtida de dureza utilizando os corpos de prova de ensaio Jominy. Comparar e discutir o resultado com o do aço 1045 fornecido acima.
3. Discussão: com base em normas de ensaio de dureza, analisar as limitações de se fazer ensaios em chapas finas e qual seria o procedimento mais adequado.
4. Realizar medidas de dureza Rockwell em amostras da chapa metálica recebida (metade da chapa do corpo de prova do ensaio de tração). Fazer de 8 a 10 medidas; tirar média e desvio padrão das medidas feitas na *região não deformada*; comparar com valor tabelado acima; comparar/discutir com valores obtidos por outros grupos de materiais diferentes. Analisar e discutir as medidas de dureza da região deformada.

### Entrega do relatório: