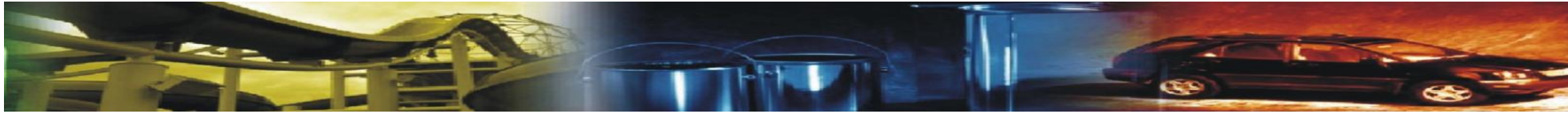


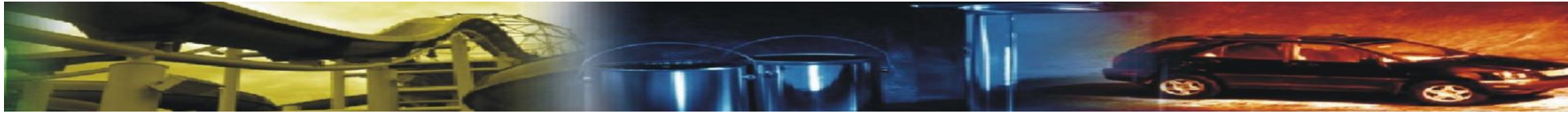
Técnicas de Caracterização de Materiais

PG-MEC - TM703

Prof Adriano Scheid



Ensaaios Mecânicos



Propriedades Mecânicas em Tração



Designation: A 370 – 03a

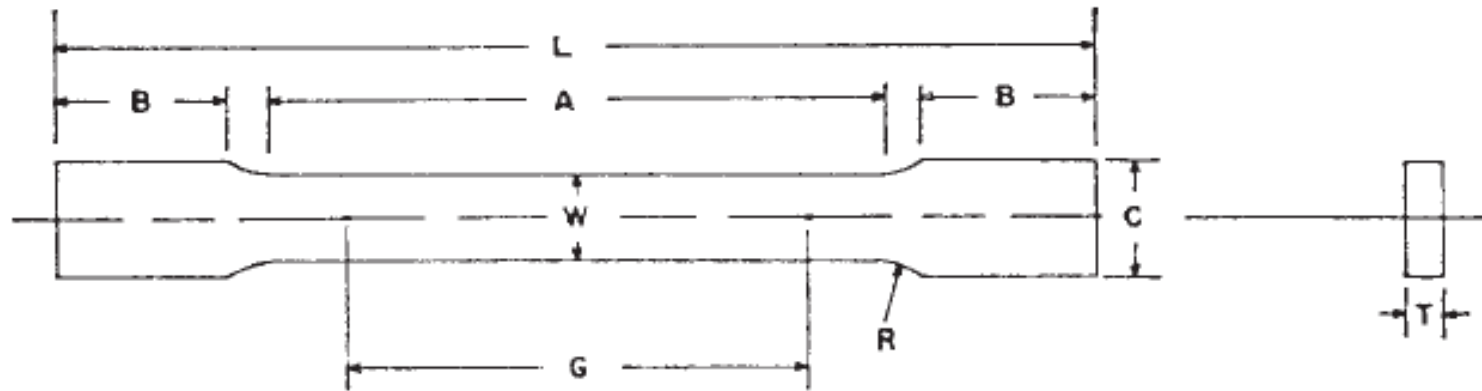
**Standard Test Methods and Definitions for
Mechanical Testing of Steel Products¹**

Aspectos Importantes:

- 1- Padronização de Corpos de Prova,
- 2- Acabamento superficial dos Corpos de Prova,
- 3- Velocidade de Ensaio (máquinas hidráulicas / fuso),
- 4- Calibração dos Equipamentos (Extensômetro, Célula de Carga, Paquímetros e Micrômetros).



Propriedades Mecânicas em Tração

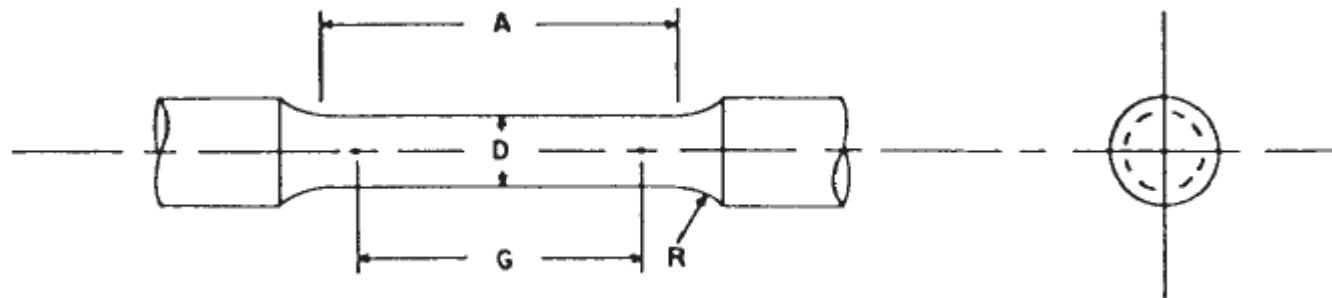


DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		¼-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ⅛ – ¼	40 + 3 – 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)	Thickness of Material					
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	¼	6
L—Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	10

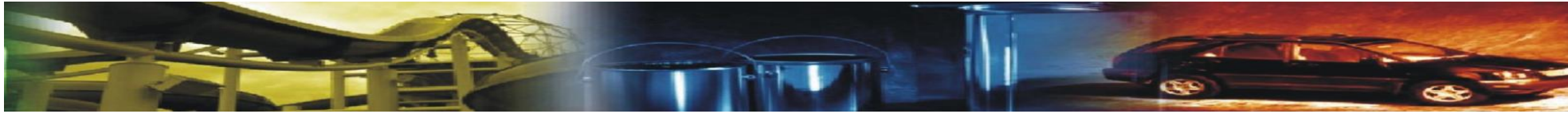


Propriedades Mecânicas em Tração



DIMENSIONS

Nominal Diameter	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard							
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
	0.500	12.5	0.350	8.75	0.250	6.25	0.160	4.00	0.113	2.50
<i>G</i> —Gage length	2.00± 0.005	50.0 ± 0.10	1.400± 0.005	35.0 ± 0.10	1.000± 0.005	25.0 ± 0.10	0.640± 0.005	16.0 ± 0.10	0.450± 0.005	10.0 ± 0.10
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	0.500± 0.010	12.5± 0.25	0.350± 0.007	8.75 ± 0.18	0.250± 0.005	6.25 ± 0.12	0.160± 0.003	4.00 ± 0.08	0.113± 0.002	2.50 ± 0.05
<i>R</i> —Radius of fillet, min	3⁄8	10	1⁄4	6	3⁄16	5	5⁄32	4	3⁄32	2
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	2¼	60	1¾	45	1¼	32	¾	20	5⁄8	16

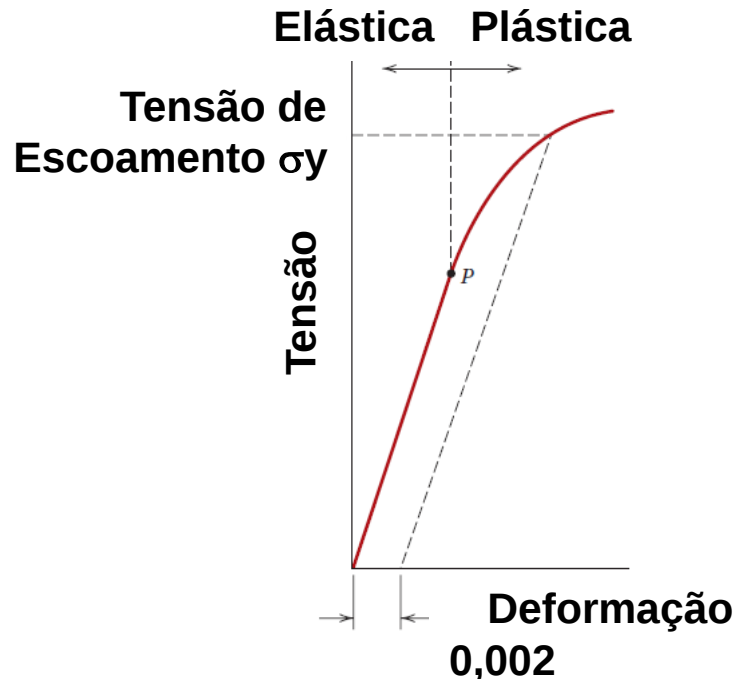


Propriedades Mecânicas em Tração

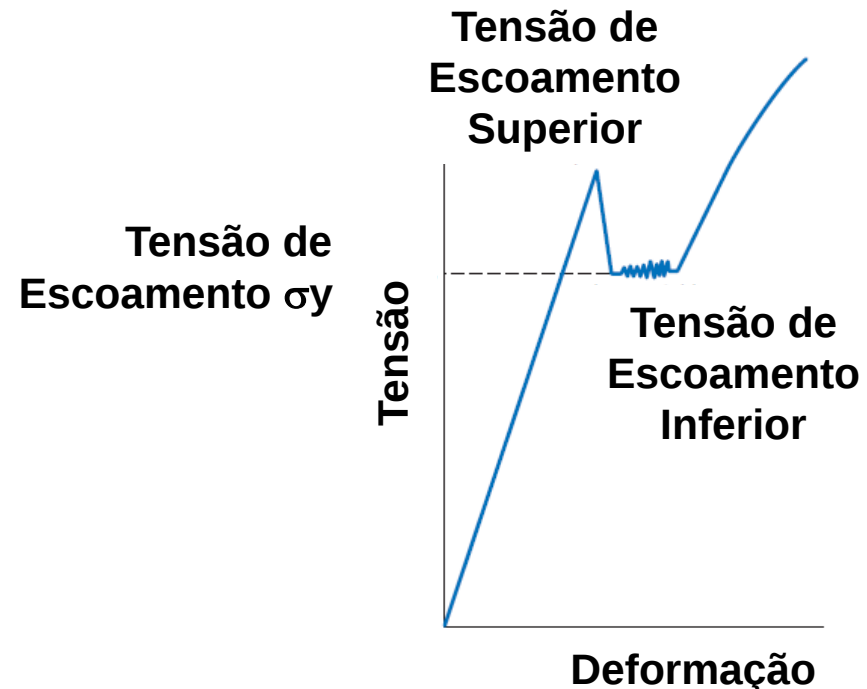
Limite de Escoamento

Os projetos são concebidos para que o componente trabalhe no regime elástico, sob pena de perder as dimensões ou deixar de funcionar adequadamente se deformado plasticamente.

Limite de Proporcionalidade ou
Limite de Escoamento de Engenharia



Limite de Escoamento Nítido





Propriedades Mecânicas em Tração

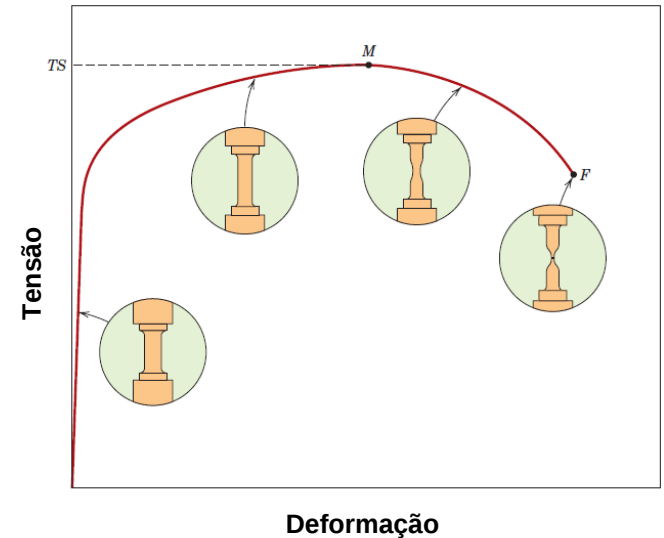
Limite de Resistência à Tração

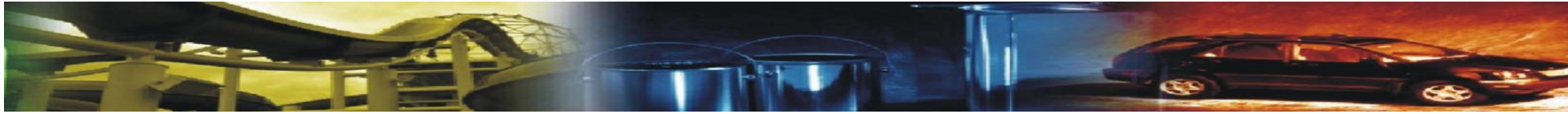
A tensão máxima ou limite de Resistência à tração é a máxima tensão suportada pelo material submetido a ensaio de tração.

A partir do escoamento, o material:

a- se deforma plasticamente até o máximo M da curva (deformação uniforme) com encruamento associado.

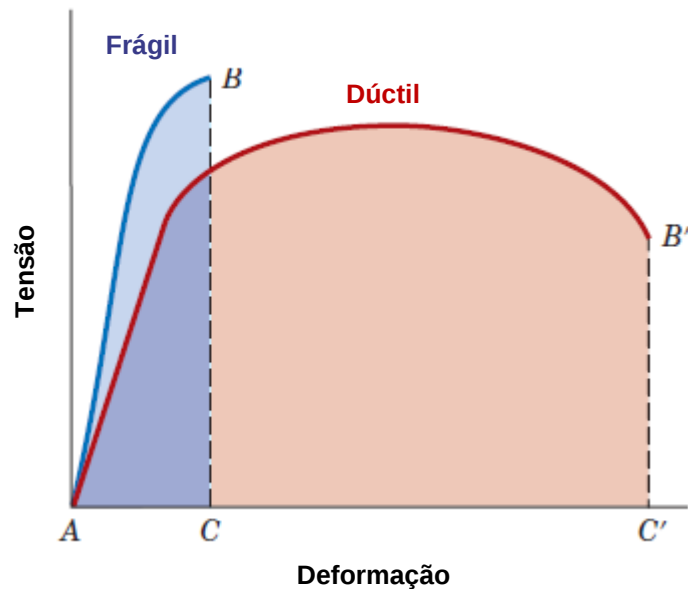
b- Entre M e F , a tensão cai, como resultado do coalescimento de microcavidades, o que resulta na estrição do corpo de prova.





Propriedades Mecânicas em Tração

A ductilidade é uma medida do grau de deformação plástica até a fratura. A ductilidade é medida pelo Alongamento (EL) ou pela Estricção / Redução de Área (RA):

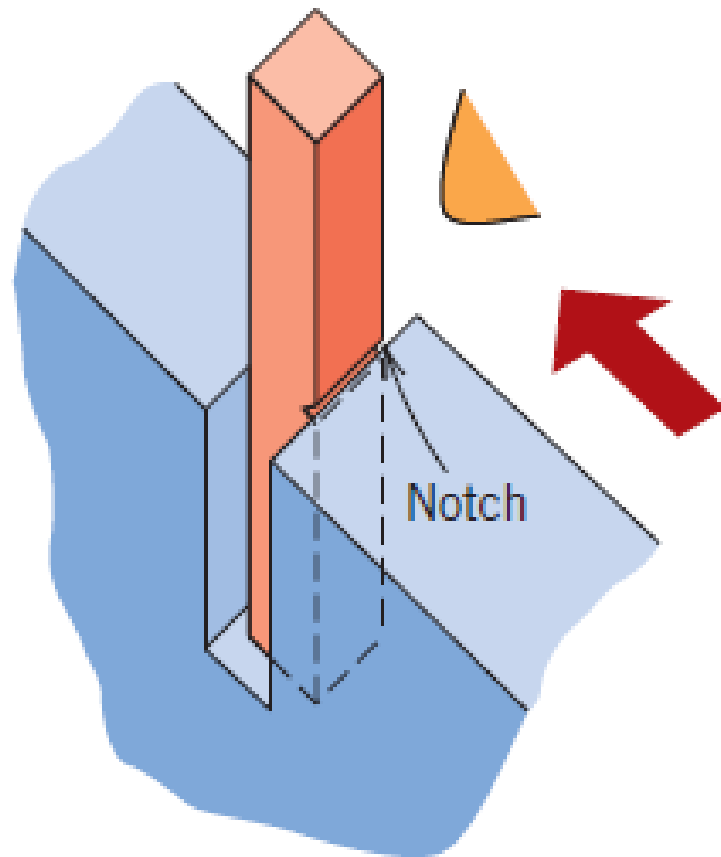


$$\% \text{EL} = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

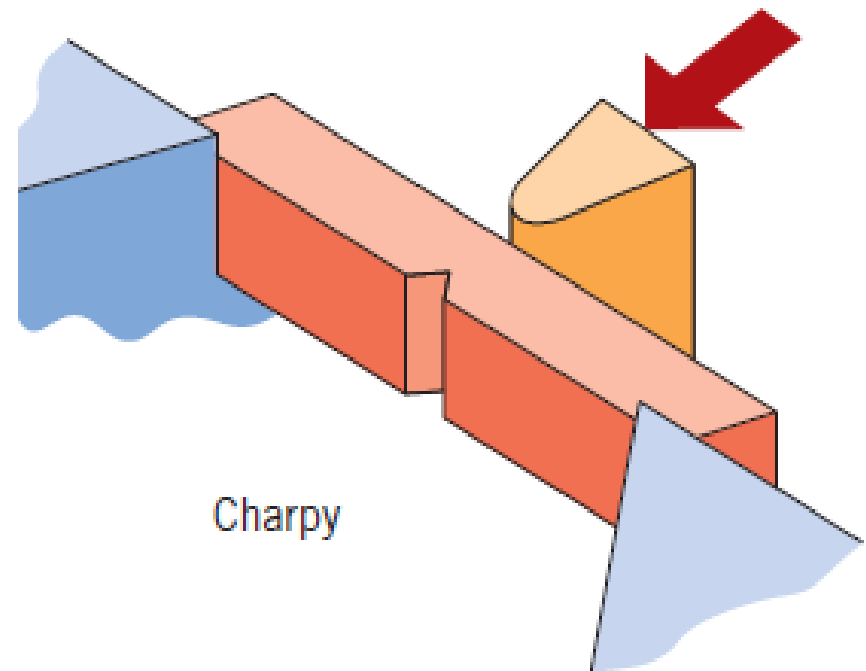
$$\% \text{RA} = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

Ensaio de Impacto

Tenacidade em Impacto Charpy-Izod (ASTM A 370)



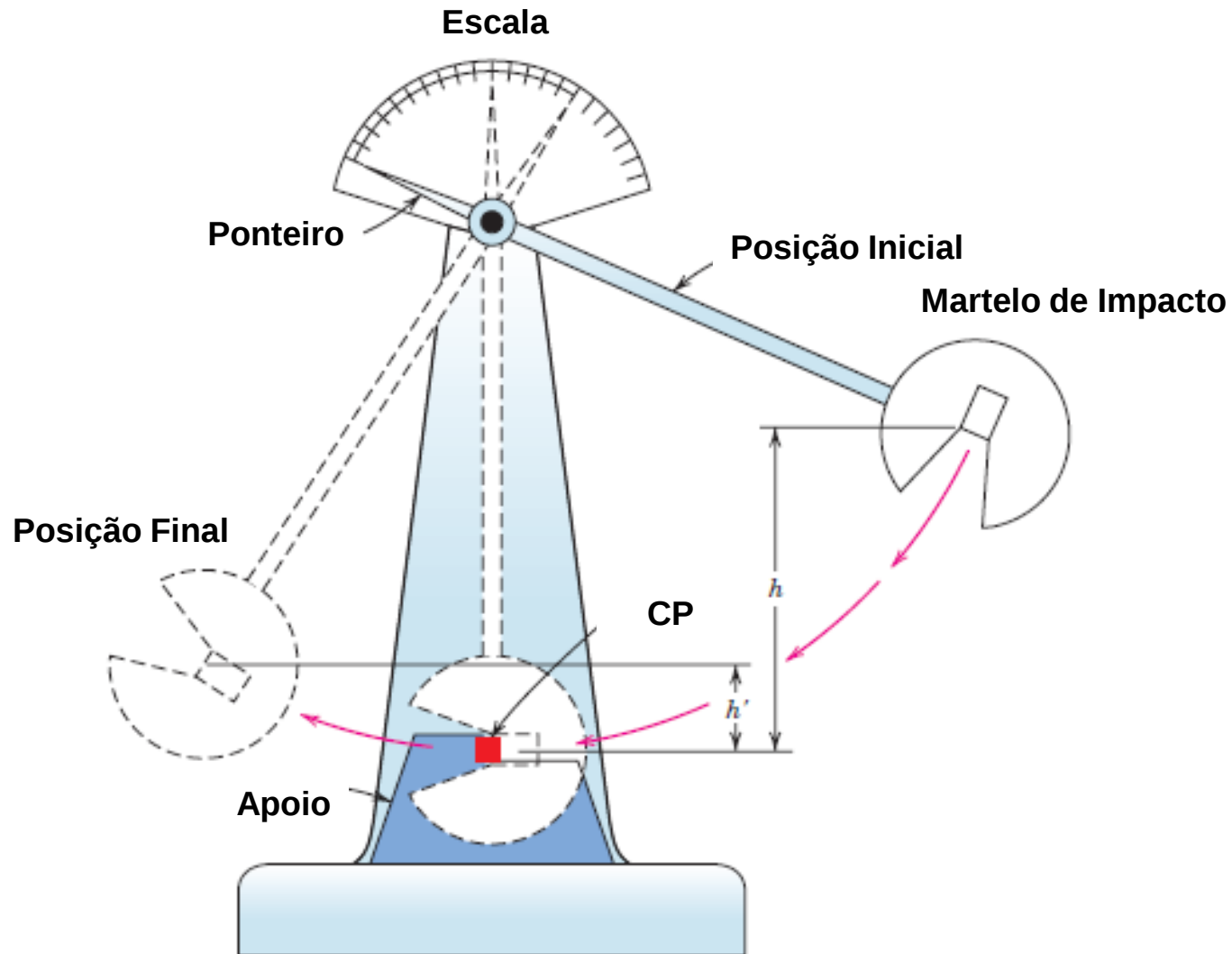
Izod



Charpy

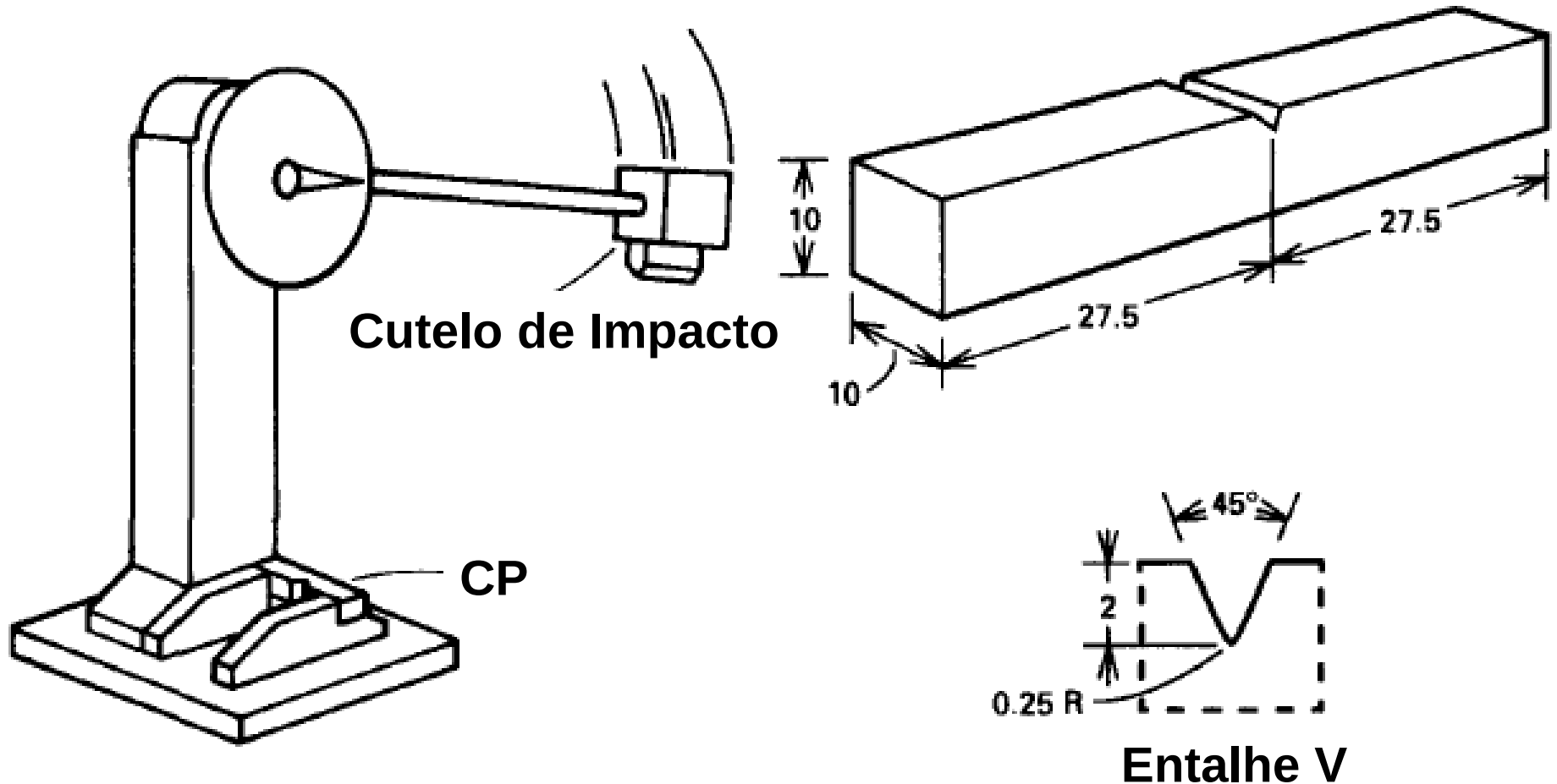
Ensaio de Impacto

Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)



Ensaio de Impacto Charpy

Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)



Ensaio de Impacto Charpy

Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)

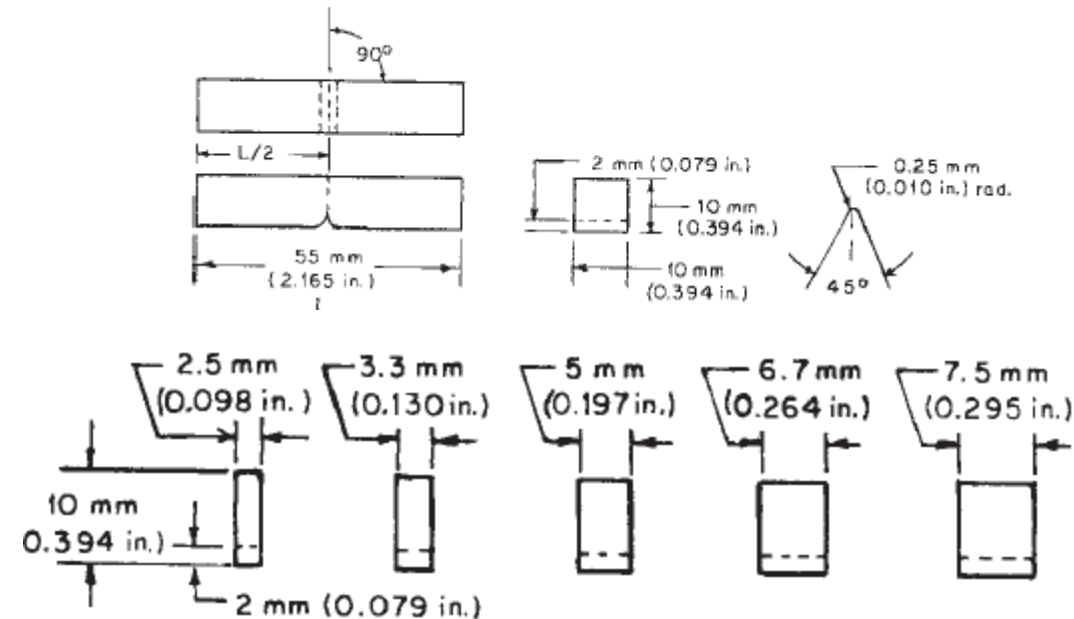
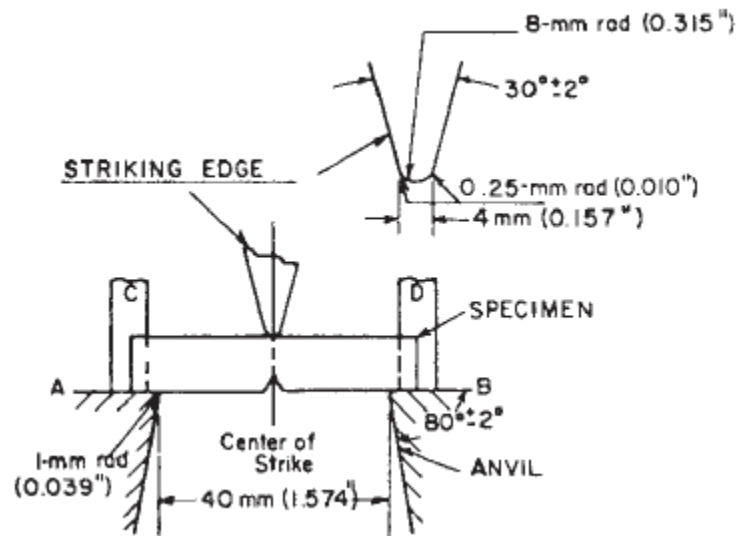
Aspectos Importantes:

- 1- Padronização de Corpos de Prova,
- 2- Acabamento superficial dos Corpos de Prova / Entalhe,
- 3- Tipo de Cutelo de Impacto,
- 4- Calibração dos Equipamentos (Comprimento do eixo de rotação ao centro de impacto, Massa do pêndulo, Perdas por atrito, Termopares / Termômetros).

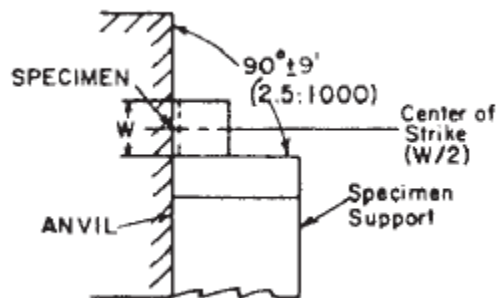
Ensaio de Impacto Charpy

Tenacidade em Impacto Charpy (ASTM A 370)

(a) Standard Full Size Specimen



NOTE 1—Permissible variations shall be as follows:



Notch length to edge	$90 \pm 2^\circ$
Adjacent sides shall be at	$90^\circ \pm 10 \text{ min}$
Cross-section dimensions	$\pm 0.075 \text{ mm } (\pm 0.003 \text{ in.})$
Length of specimen (L)	$+ 0, - 2.5 \text{ mm } (+ 0, - 0.100 \text{ in.})$
Centering of notch (L/2)	$\pm 1 \text{ mm } (\pm 0.039 \text{ in.})$
Angle of notch	$\pm 1^\circ$
Radius of notch	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Notch depth	$\pm 0.025 \text{ mm } (\pm 0.001 \text{ in.})$
Finish requirements	$2 \mu\text{m } (63 \mu\text{in.})$ on notched surface and opposite face; $4 \mu\text{m } (125 \mu\text{in.})$ on other two surfaces

Tenacidade ao Impacto

Avaliações do Ensaio de Impacto

Energia Absorvida em Corpo de Prova Padronizado

Aspecto da Superfície de Fratura

Contração Lateral (medida da ductilidade)

Temperatura de Transição Dúctil-Frágil

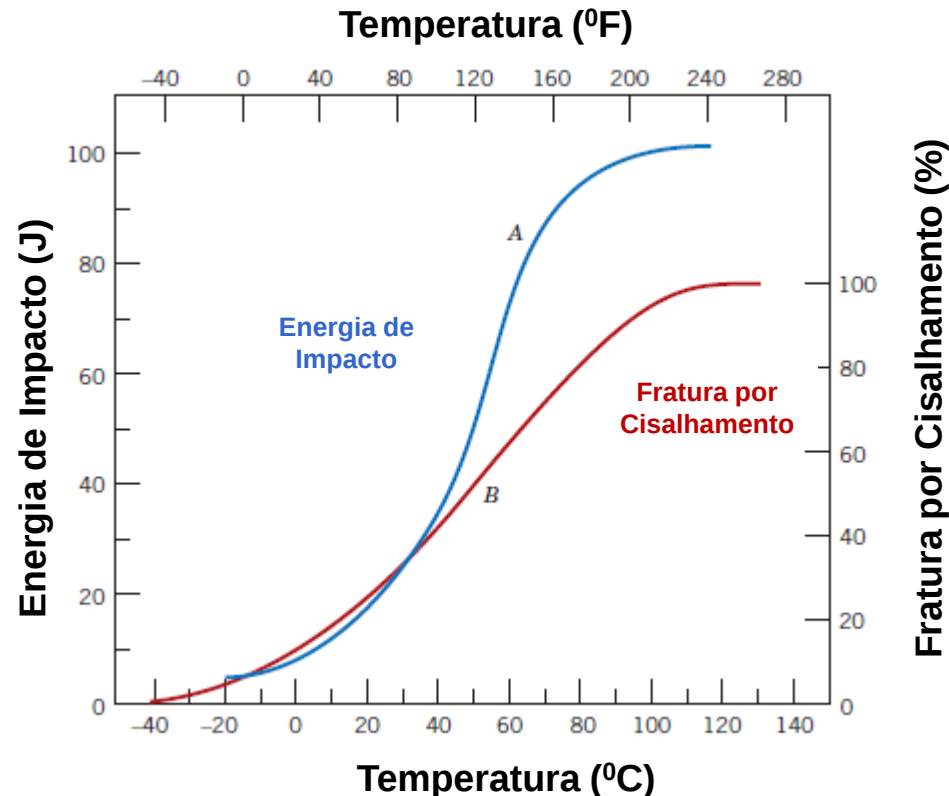
Ensaio usado para:

- Avaliar a influência de elementos de liga**
- Avaliar diferentes tratamentos térmicos**
- Controle de Qualidade e testes de aceitação de materiais.**

Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

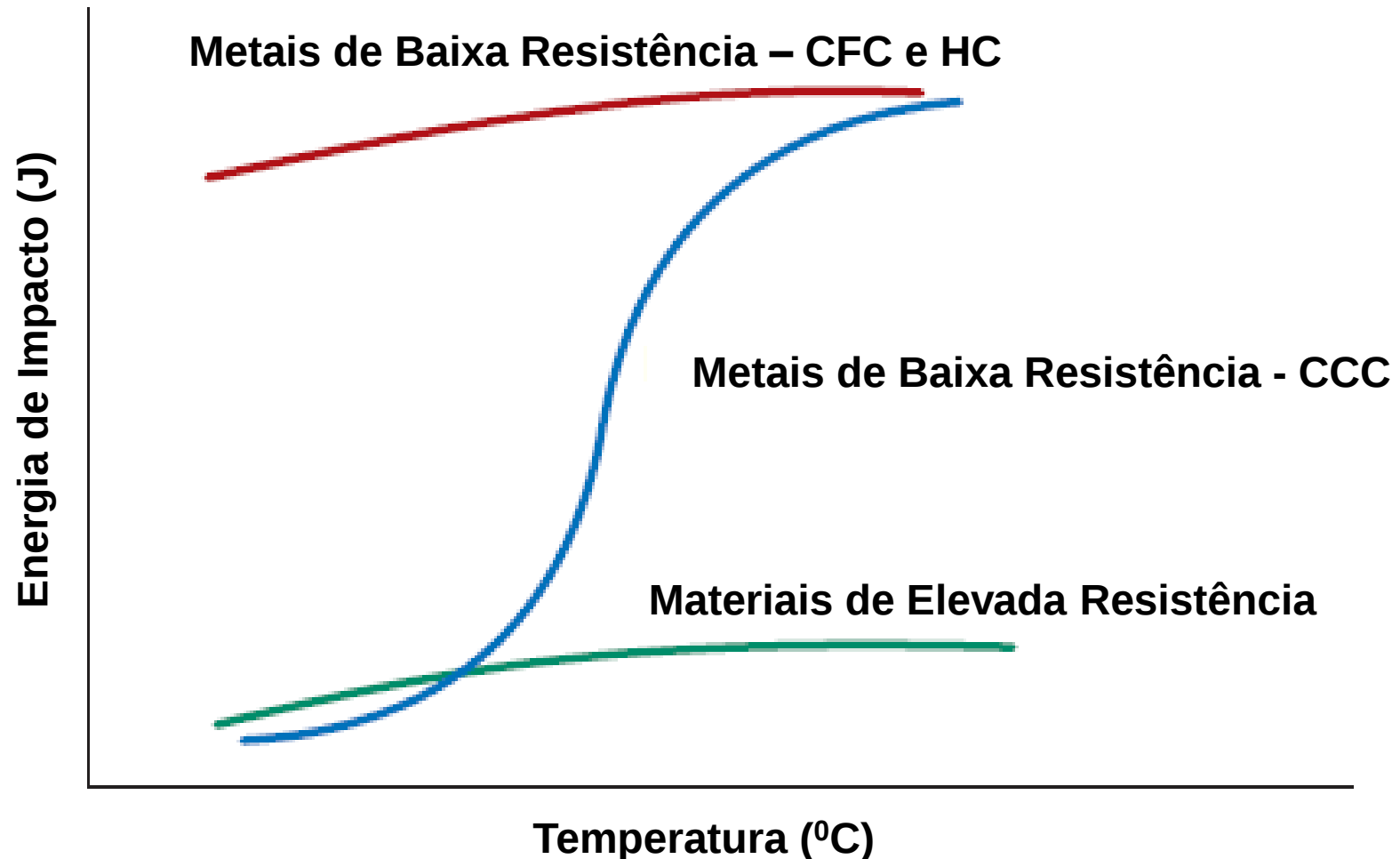
Este tipo de comportamento ocorreu primeiramente em grandes e contínuas estruturas como vasos de pressão, tubulações, navios de guerra, pontes e outras estruturas restritas, freqüentemente construídas por soldagem.

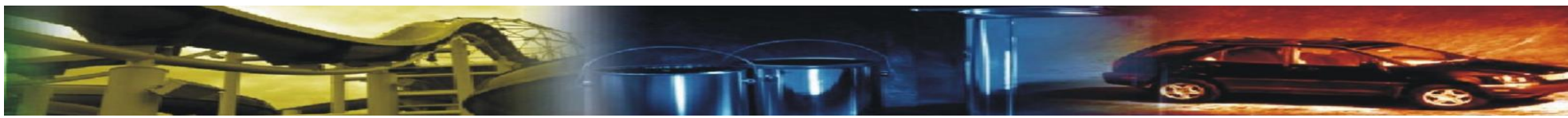
Histórico: 250 navios na 2ª guerra mundial apresentaram fratura frágil, tendo aços dúcteis como matéria-prima. Destes, 19 romperam ao meio.



Tenacidade ao Impacto - Transição Dúctil-Frágil

Fatores que afetam a transição Dúctil-Frágil em aços.





Propriedades Mecânicas

Ensaio de Dureza

Dureza - Conceito:

“Resistência à deformação plástica localizada causada por um indentador”

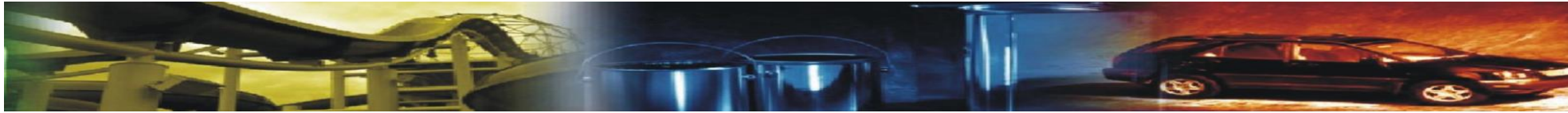
Principais Métodos:

- Rockwell
- Brinell
- Vickers
- Knoop

Ensaio de Dureza

Aspectos Importantes:

- 1- Preparação de Corpos de Prova: Superfície isenta de óxidos, graxas, óleos, sujeiras. Superfície Plana e perpendicular ao Penetrador**
- 2- Seleção do método de Dureza em função da operacionalização, homogeneidade do material, espessura, objetivo do controle, entre outros.**
- 3- Cuidado com o manuseio dos indentadores (instalação e desinstalação),**
- 4- Calibração dos Equipamentos (Direta: força, dimensional do penetrador e sistema ótico (escala) ou relógio comparador. Indireta: Uso de blocos padrão de dureza certificados em cada escala a ser usada).**
- 5- Verificação de funcionamento (blocos padrão).**

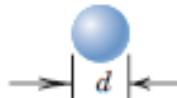
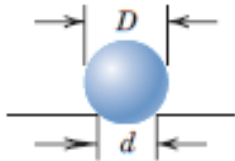


Forma do Indentador

Carga

Fórmula para o Número de Dureza

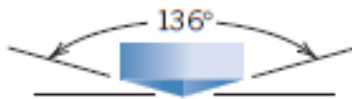
Brinell



P

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

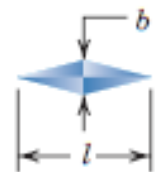
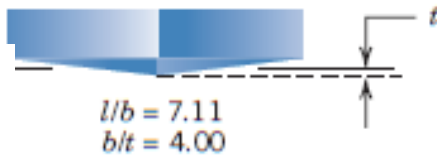
Vickers



P

$$HV = 1.854P/d_1^2$$

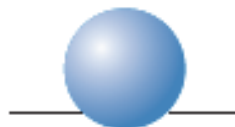
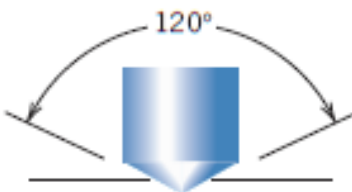
Knoop



P

$$HK = 14.2P/l^2$$

Rockwell

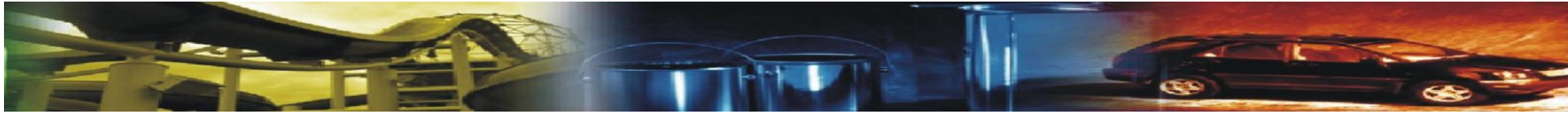


60 kg
100 kg
150 kg

Rockwell Normal

15 kg
30 kg
45 kg

Rockwell Superficial



Análise Metalográfica

Análise Metalográfica

Histórico

Henry Clifton Sorby – 1863 observou pela primeira vez uma microestrutura em microscópio.

Metalografia é o ramo a ciência que estuda e interpreta a estrutura interna dos metais e ligas metálicas, relacionando a mesma com a composição química, propriedades físicas e mecânicas.

A Metalografia é largamente usada para a avaliação de:

- 1- Vazios (rechupes, microrechupes e poros)**
- 2- Segregações**
- 3- Estruturas: Tamanho e forma dos grãos**
- 4- Inclusões: Tipo, Tamanho, forma, distribuição**
- 5- Fases e constituintes**
- 6- Defeitos (trincas e fraturas)**
- 7- Extensão de tratamentos superficiais e revestimentos**

Análise Metalográfica

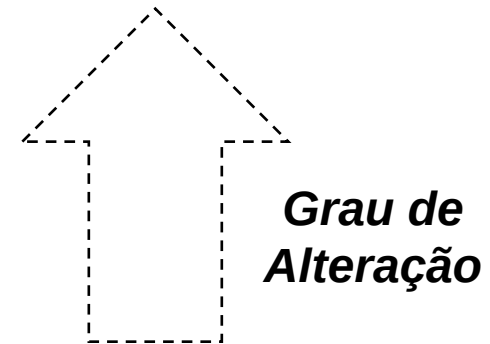
Seleção dos Corpos de Prova

A seção a ser retirada para a metalografia deve ser representativa da peça e é função dos dados e fenômenos a serem analisados. O corte poderá ser longitudinal, transversal ou oblíquo.

Os principais métodos usados para o corte, classificados quanto ao grau de alteração da superfície são:

- Maçarico
- Cisalhamento
- Serragem
- Abrasão a seco ou a úmido
- Eletroerosão
- Químico ou eletrolítico

Máximo



Mínimo

Análise Metalográfica

Montagem Metalográfica

A montagem metalográfica é necessária para facilitar a preparação, pois as amostras são, em geral, **muito pequenas, facilmente desagregáveis, irregulares, porosas.**

Razões adicionais para a montagem:

- 1- Padronização dos Corpos de Prova,
- 2- Lixamento e polimento com aparelhos automáticos
- 3- Evitar o arredondamento de cantos ou arestas
- 4- Evitar o rasgamento de lixas de panos de polimento
- 5- Evitar acidentes com o metalógrafo.

Análise Metalográfica

Embutimento em Resinas

É a técnica mais usada para a montagem metalográfica. Pode ser dividida em:

A quente -> Resinas Termoplásticas -> Acrílicos

-> Resinas Termofixas -> Baquelite

A frio -> Resinas autopolimerizantes -> Epóxi

-> Poliéster

-> Metil Metacrilato

Análise Metalográfica

Marcação e Identificação

Na preparação de grande número de amostras em procedimentos experimentais de mestrado e doutorado, é importante a identificação clara e não destrutível das mesmas.

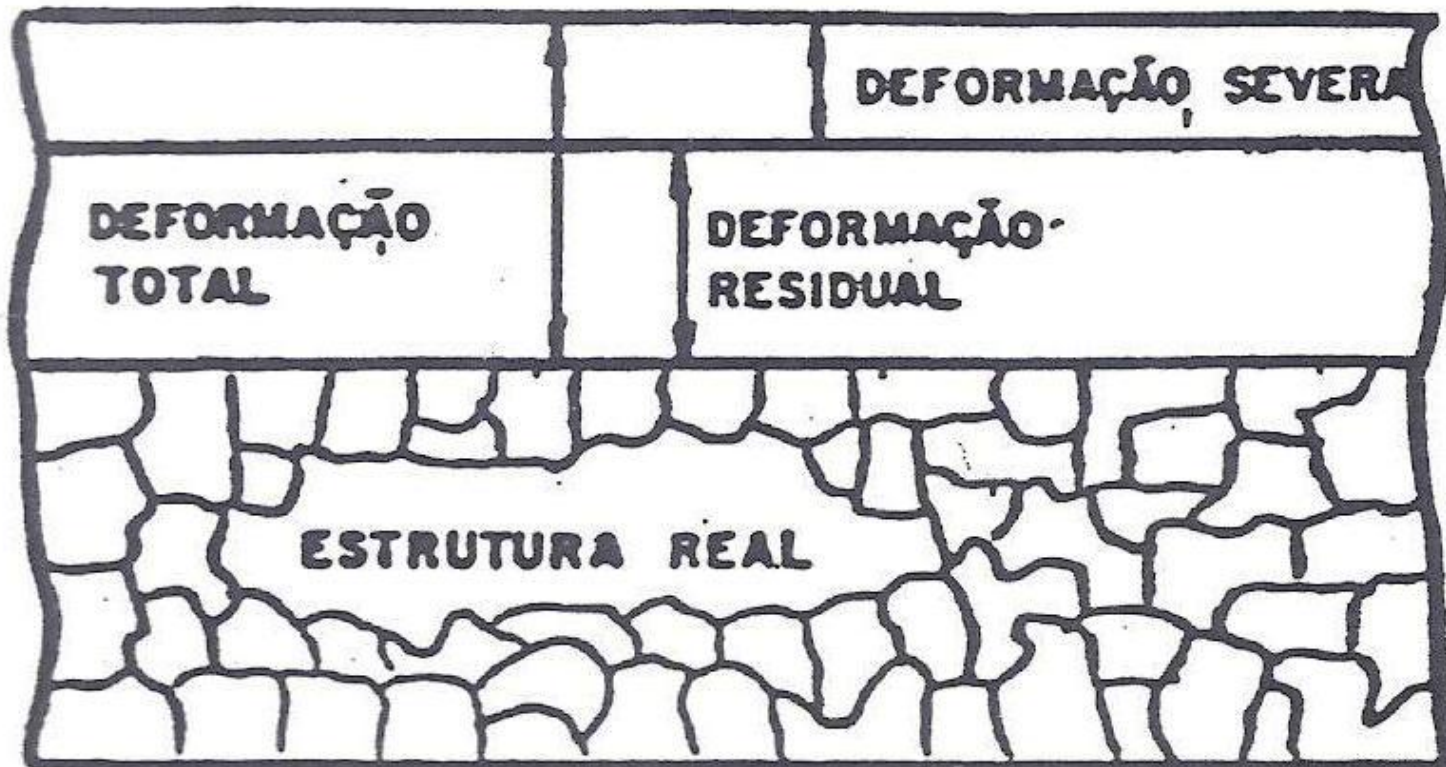
As maneiras mais usadas para a identificação são:

- Gravador vibratório
- Gravador com fresa
- Lápis elétrico
- Punção

Análise Metalográfica

Lixamento Metalográfico

Lixamento é o corte por grãos abrasivos. O objetivo do lixamento é a remoção de todo o material deformado na etapa de corte obtendo-se, ao final, uma superfície plana e livre de deformações.

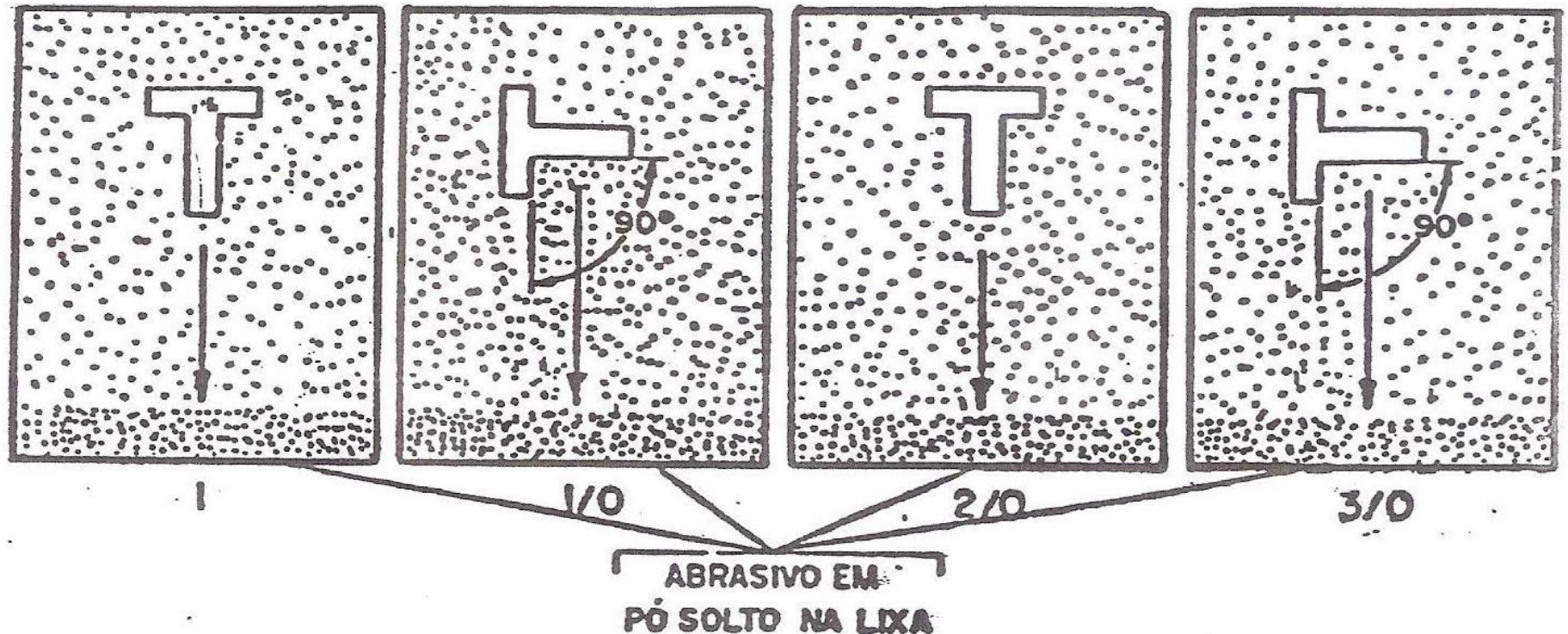


Análise Metalográfica

Lixamento Metalográfico

O lixamento deve ser realizado em papel abrasivo, com a rotação de 90° a cada avanço para a próxima lixa.

A seqüência usual de lixas é: #100, #220, #320, #400, #600, #1000.



Análise Metalográfica

Polimento Metalográfico

O polimento, assim como o lixamento, é o corte por grãos abrasivos. A diferença é que a granulometria dos abrasivos utilizados é menor e varia de 0,25 a 10µm.

Abrasivos: São geralmente usados abrasivos de Alumina (Al_2O_3) ou pasta de diamante.

Procedimento manual: O polimento é realizado a partir da rotação da amostra sobre discos cobertos com panos (feltro ou nylon) com uma suspensão abrasiva.

O lubrificante mais usado para polimento com pasta de diamante é o álcool ou álcool + 1% de glicerina. Já para polimento com alumina é usado água.

OBS: Nunca deixe a amostra parada sobre o disco em movimento rotativo, pois surgirão “rabos de cometa” na superfície polida, dificultando a análise e piorando a qualidade da metalografia.

Análise Metalográfica

Ataque Metalográfico

Geralmente, uma superfície metálica polida pode ser usada para avaliação de inclusões, trincas, poros e outros defeitos que possam ser identificados e distinguidos sem ataque apropriado.

Microestruturas (fases presentes) normalmente precisam de um ataque específico para a sua observação adequada.

Ataque:

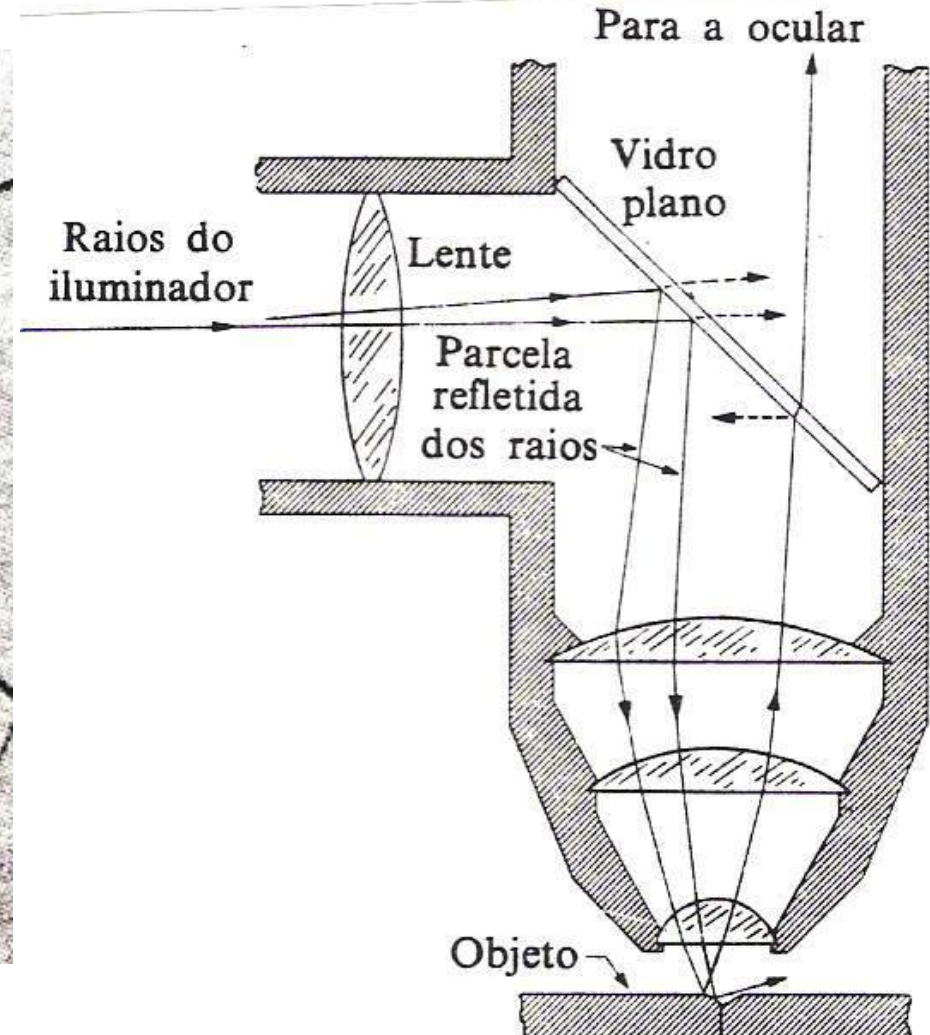
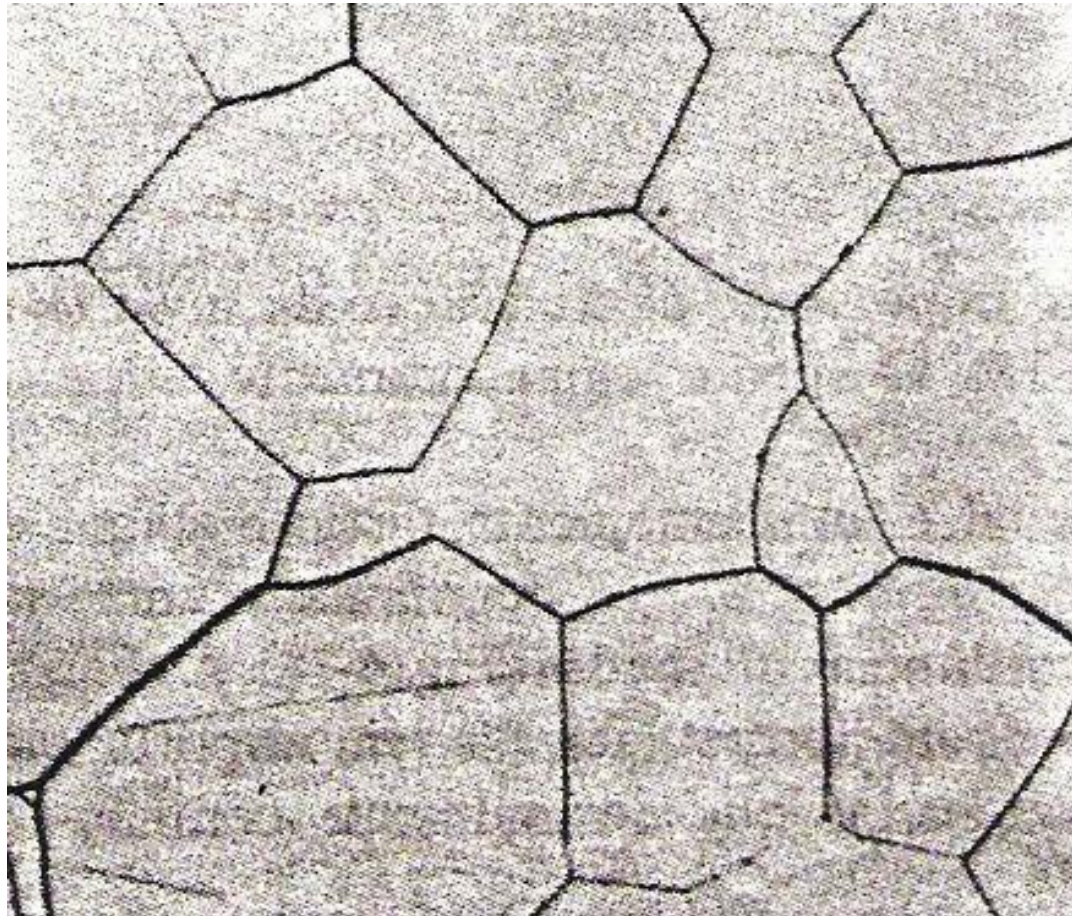
“É a dissolução, coloração ou qualquer outro efeito que permita distinguir as diversas fases ou constituintes do material em estudo”.

O método mais comum é o ataque químico com reagentes apropriados.

Análise Metalográfica

Microscopia Ótica

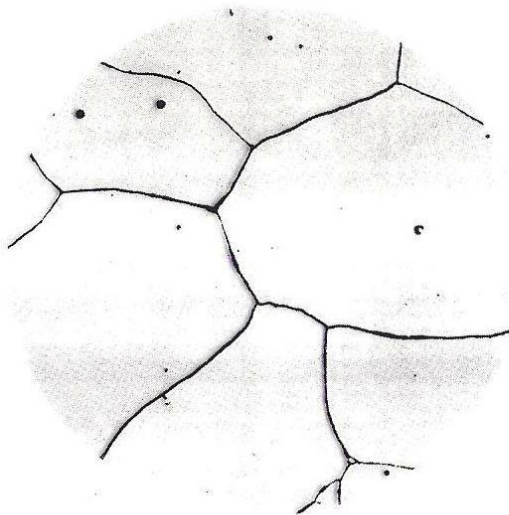
Observação dos contornos de grão do material, a partir de ataque específico.



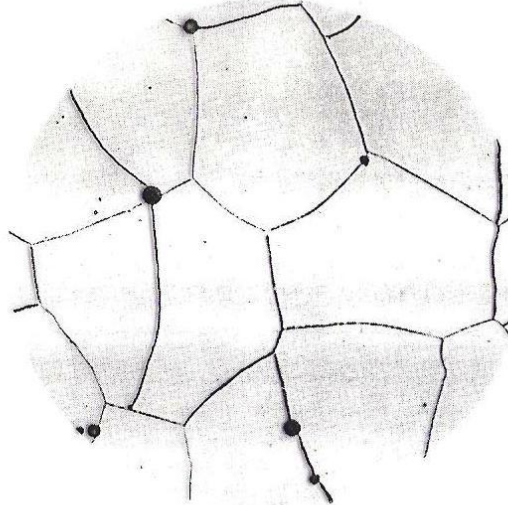
Análise Metalográfica

4

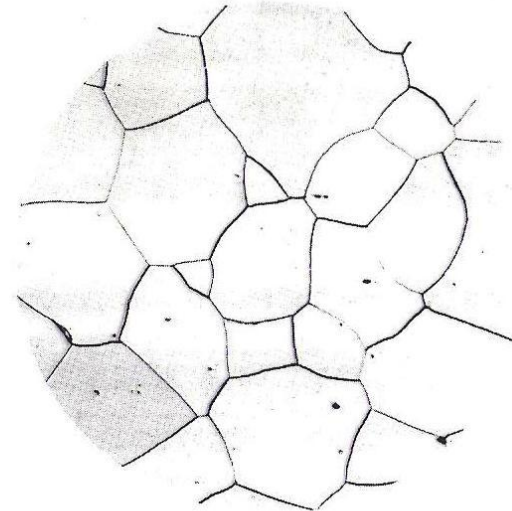
Common Grain Sizes of Low-Carbon Sheet Steel (Specimens Are Rimmed Steel)



Nital 100×
1 Nominal ASTM grain size No. 1
(specimen shown has a calculated grain size of 1.17)



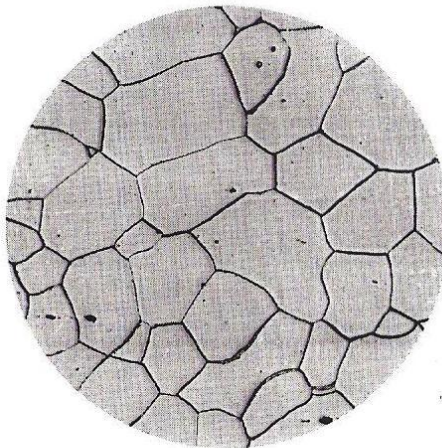
Nital 100×
2 Nominal ASTM grain size No. 2
(specimen shown has a calculated grain size of 2)



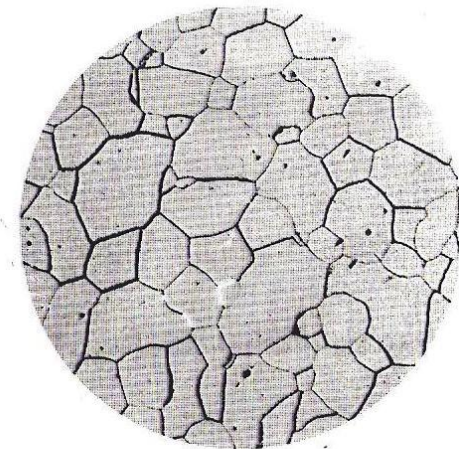
Nital 100×
3 Nominal ASTM grain size No. 3
(specimen shown has a calculated grain size of 2.95)

Nominal Number of Grains per Square Millimeter
(at 1×) and per Square Inch (at 100×) for
the Ten Grain Sizes Shown

Grain-size No.	Nominal number of grains		Grain-size No.	Nominal number of grains	
	Per sq mm at 1×	Per sq in. at 100×		Per sq mm at 1×	Per sq in. at 100×
ASTM Grain Sizes (ASTM E112)			Calculated Grain Sizes Shown		
1	15.5	1.0	1.17	17.4	1.13
2	31.0	2.0	2	31.0	2.00
3	62.0	4.0	2.95	59.9	3.86
4	124	8.0	4.04	128	8.23
5	248	16.0	4.98	245	15.8
6	496	32.0	6.08	524	33.8
7	992	64.0	7.13	1090	70.0
8	1980	128	8.03	2030	131
9	3970	256	8.97	3890	251
10	7940	512	10	7940	512



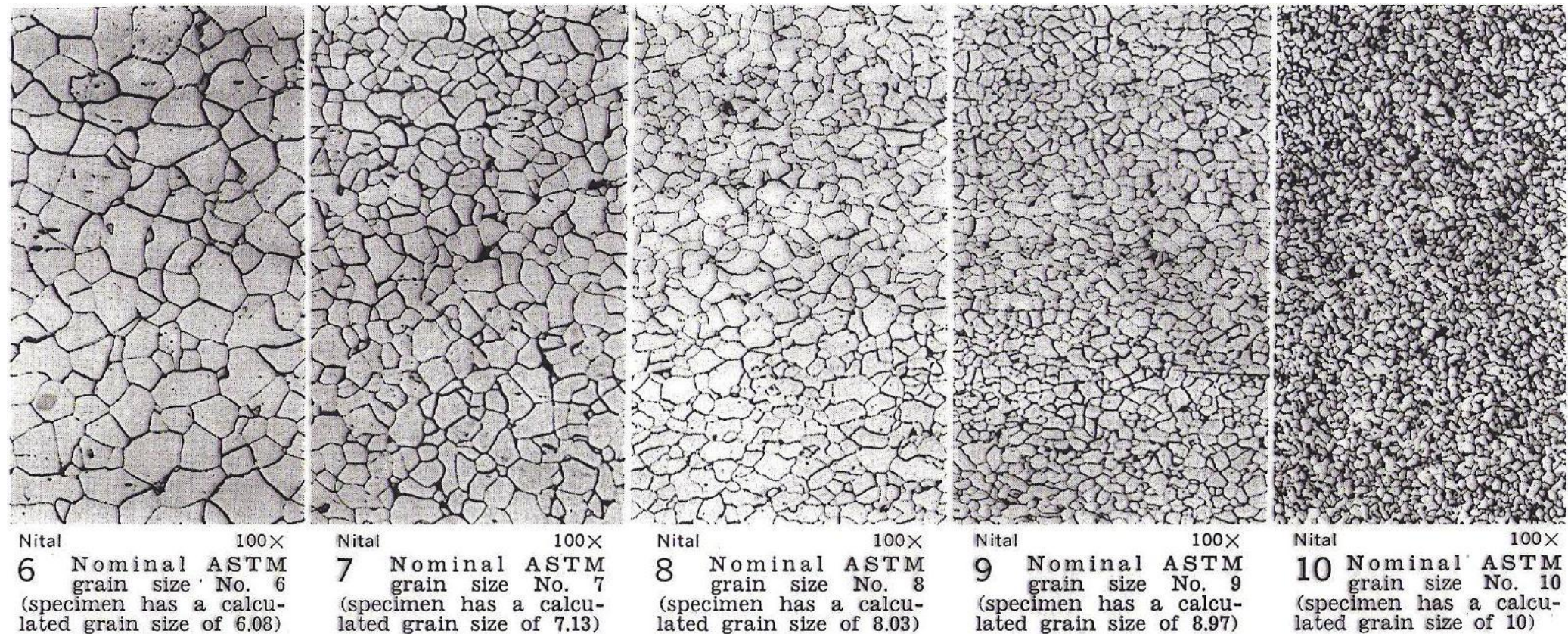
Nital 100×
4 Nominal ASTM grain size No. 4
(specimen shown has a calculated grain size of 4.04)



Nital 100×
5 Nominal ASTM grain size No. 5
(specimen shown has a calculated grain size of 4.98)

Análise Metalográfica

Padrão ASTM para Tamanho de Grão



Standard methods for estimating the average grain size of metals are presented in ASTM E112, together with formulas for calculating grain size and a table of size relationships for all ASTM grain-size numbers (00 to 14.0, with half sizes).

Análise Metalográfica

AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE INCLUSÕES NOS AÇOS

ASPECTOS MICROGRÁFICOS COM AMPLIAÇÃO DE 100 X, SEGUNDO A JERNKONTRET DE ESTOCOLMO (ASSOCIAÇÃO DOS SIDERURGISTAS SUÊCOS)
CENTRO E TRANSFERIDO PELA SERVIÇO METALOGRAFICO DO IPT - SÃO PAULO

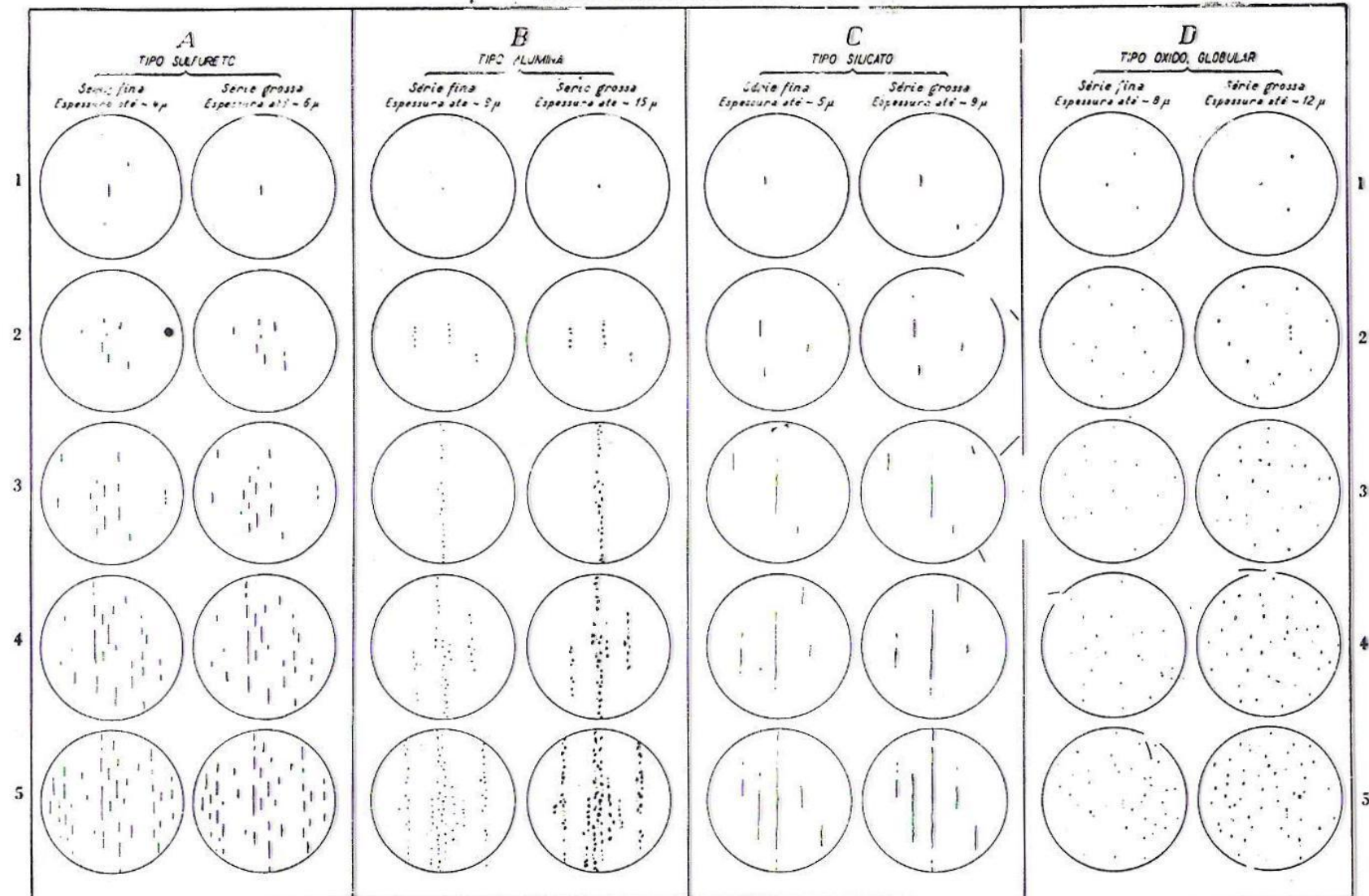


Fig.307 — Classificação para avaliação micrográfica das inclusões dos aços adotada pela Associação dos Siderúrgicos Suêcos (Jernkontoret) de Estocolmo. O quadro original é linearmente 4,3 vezes maior do que esta figura.

Macrografia

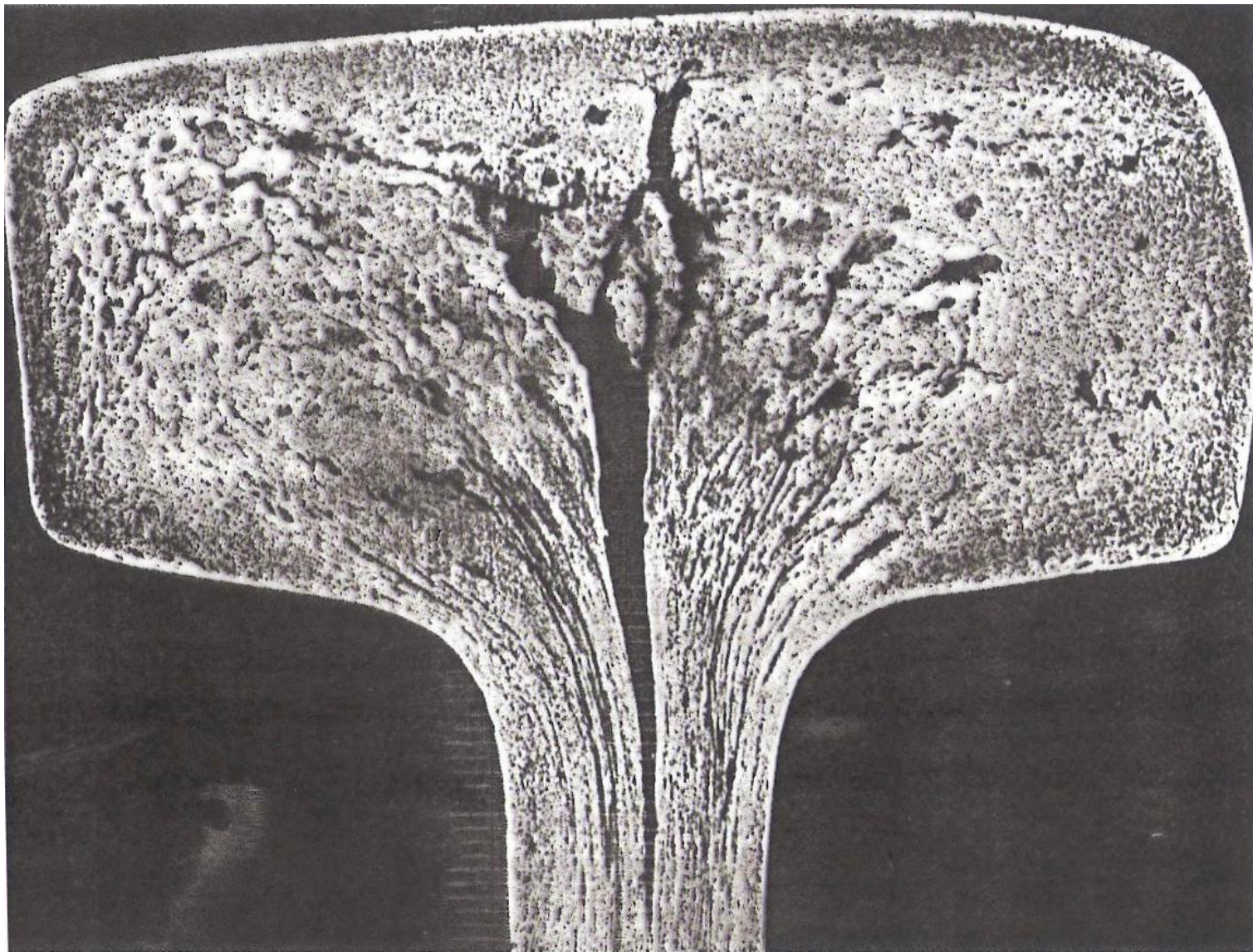
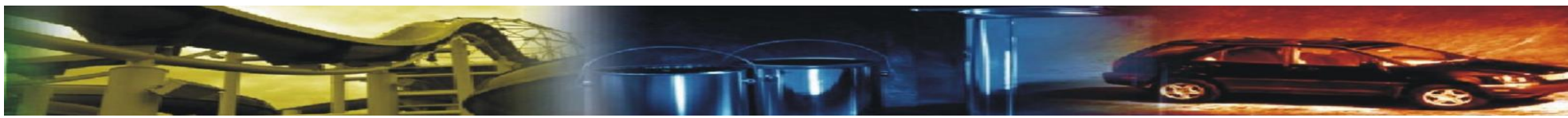


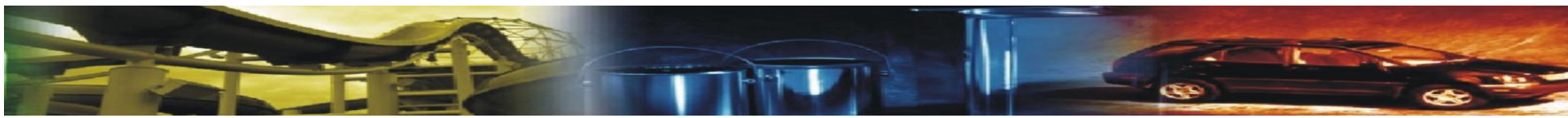
Fig. 144 — Detalhe do boleto do trilho apresentado na fig. 142 — Notam-se numerosas fissuras e também grande quantidade de concentrações de impurezas que favorecem a formação de trincas e facilitam seu desenvolvimento. Ataque: iodo. 2,5 x.



Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

Prof. Scheid



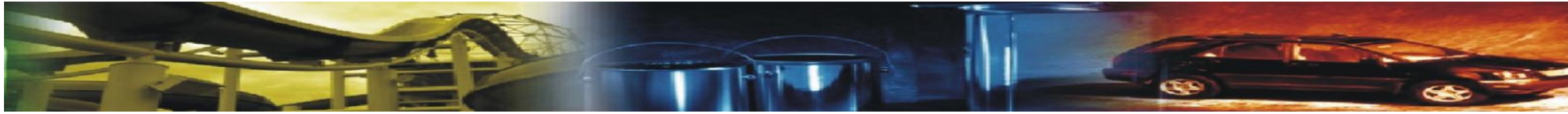
Microscopia Eletrônica de Varredura

Desde a sua invenção na década de 60, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) tem se tornado essencial aos analistas de materiais e pesquisadores no desenvolvimento de novos materiais e análise de falhas. Permite a observação de estruturas tridimensionais que são facilmente interpretadas.

Princípio de Operação:

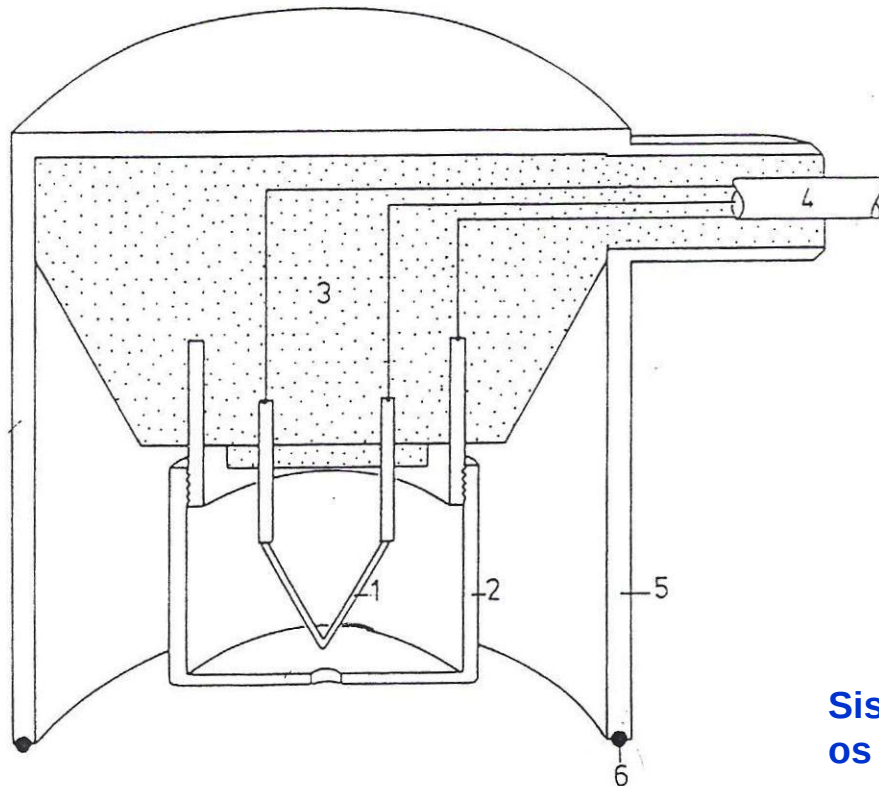
Existem três grandes seções:

- 1- Coluna eletro-óptica
- 2- Sistema de vácuo
- 3- Sistema de exibição e eletrônica



Descrição – Canhão de elétrons

O sistema ótico do instrumento é a coluna eletro-ótica. Não há luz no MEV, tendo como fonte geradora da imagem uma emissão de elétrons. O feixe de elétrons emitido é produzido em um canhão de elétrons.



Principais partes do canhão de elétrons:

- 1- Filamento de Tungstênio
- 2- Cilindro (sistema Wehnelt) – Cátodo
- 3- Isolamento
- 4- Fonte
- 5- Envoltório da Coluna
- 6- Vedação de vácuo

Sistema Wehnelt é, na prática, uma capa com um furo por onde os elétrons emitidos pelo cátodo saem formando o feixe.



Canhão de elétrons

Um filamento de Tungstênio é aquecido até 2700°C, gerando elétrons excitados e aptos a escapar. Este fenômeno é chamado emissão termoiônica.

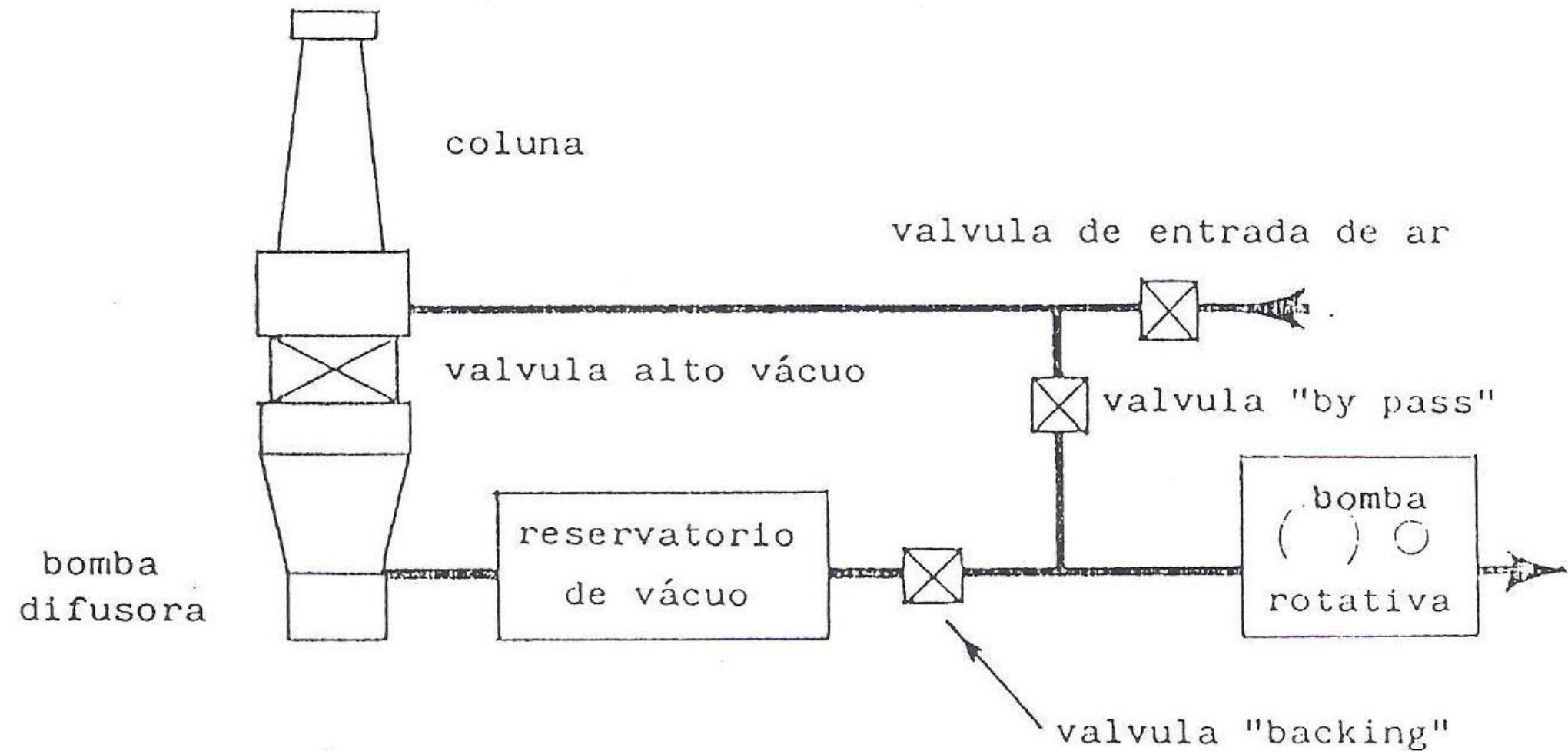
Aplicando-se uma tensão entre 2 e 25KV entre o filamento e o disco anódico, os elétrons serão acelerados para fora do filamento. A partir do “vácuo” existente na coluna, os elétrons podem percorrer grandes distâncias.

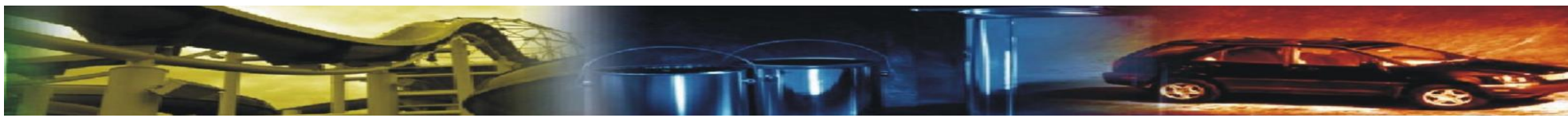
Sistema de vácuo

No interior da coluna do microscópio existe vácuo (mínimo 10^{-4} Torr), a fim de permitir que o feixe de elétrons seja dispersado e também que ocorra a oxidação do filamento emissor que opera em elevada temperatura.



Esquema do MEV com sistema de vácuo





Coluna

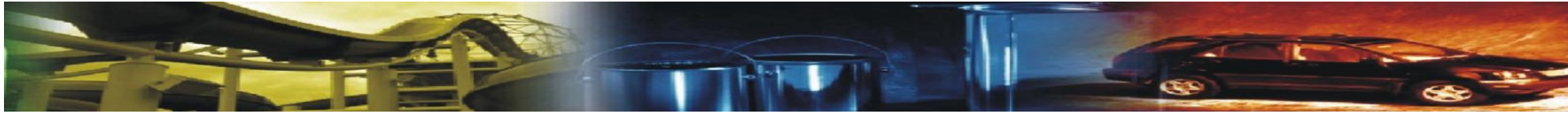
É a parte do equipamento que gera a imagem do corpo de prova. Um feixe de elétrons é gerado e focalizado pelo sistema de lente eletromagnética sobre o corpo de prova.

O feixe com diâmetro mínimo entre 40 a 50 μm “varre” ou explora o corpo de prova e os sinais produzidos pela amostra são detectados e amplificados, gerando imagem em tela.

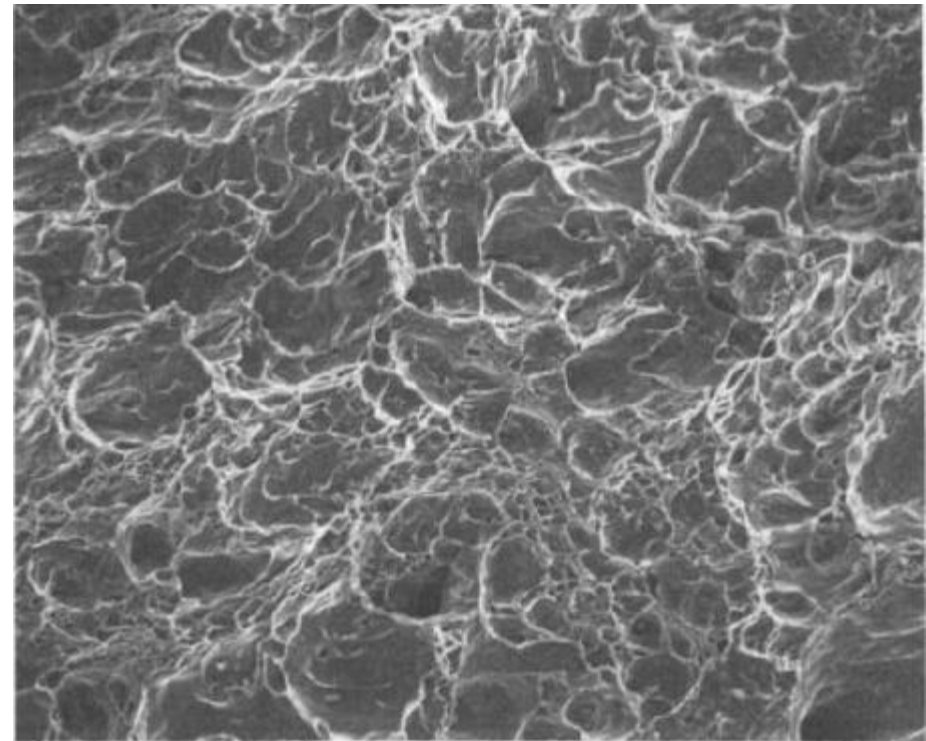
Lente Eletromagnética

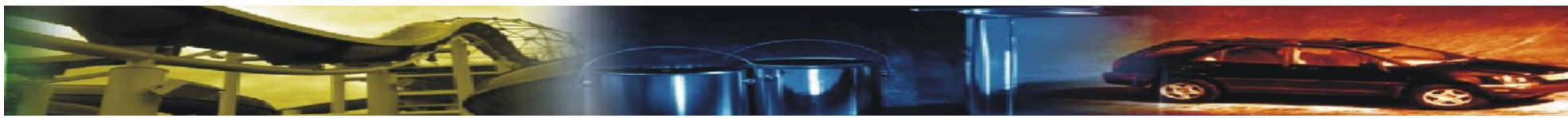
Entre o Wehnelt e o ânodo (amostra) forma-se um campo elétrico que atua como lente convergente focalizando os elétrons emitidos pelo filamento.



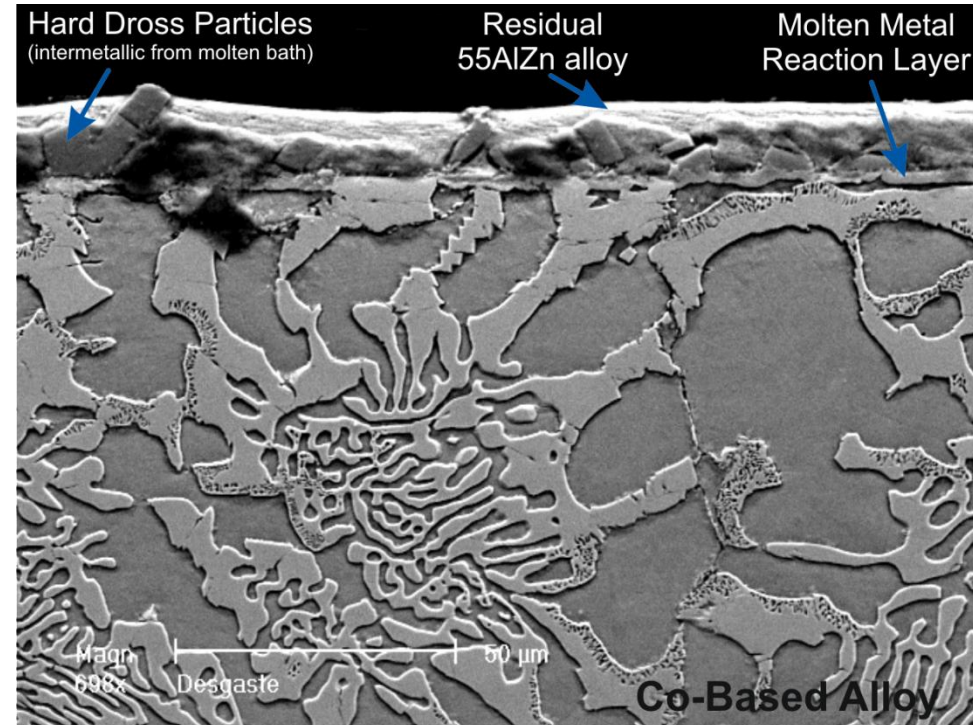
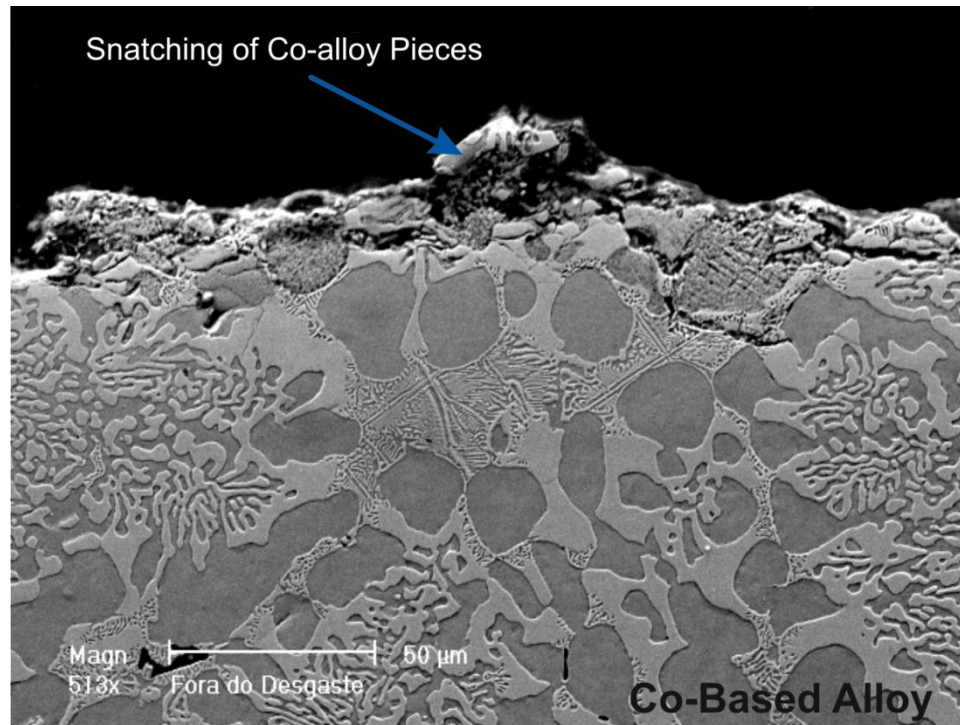


Imagens de Superfícies de Fratura



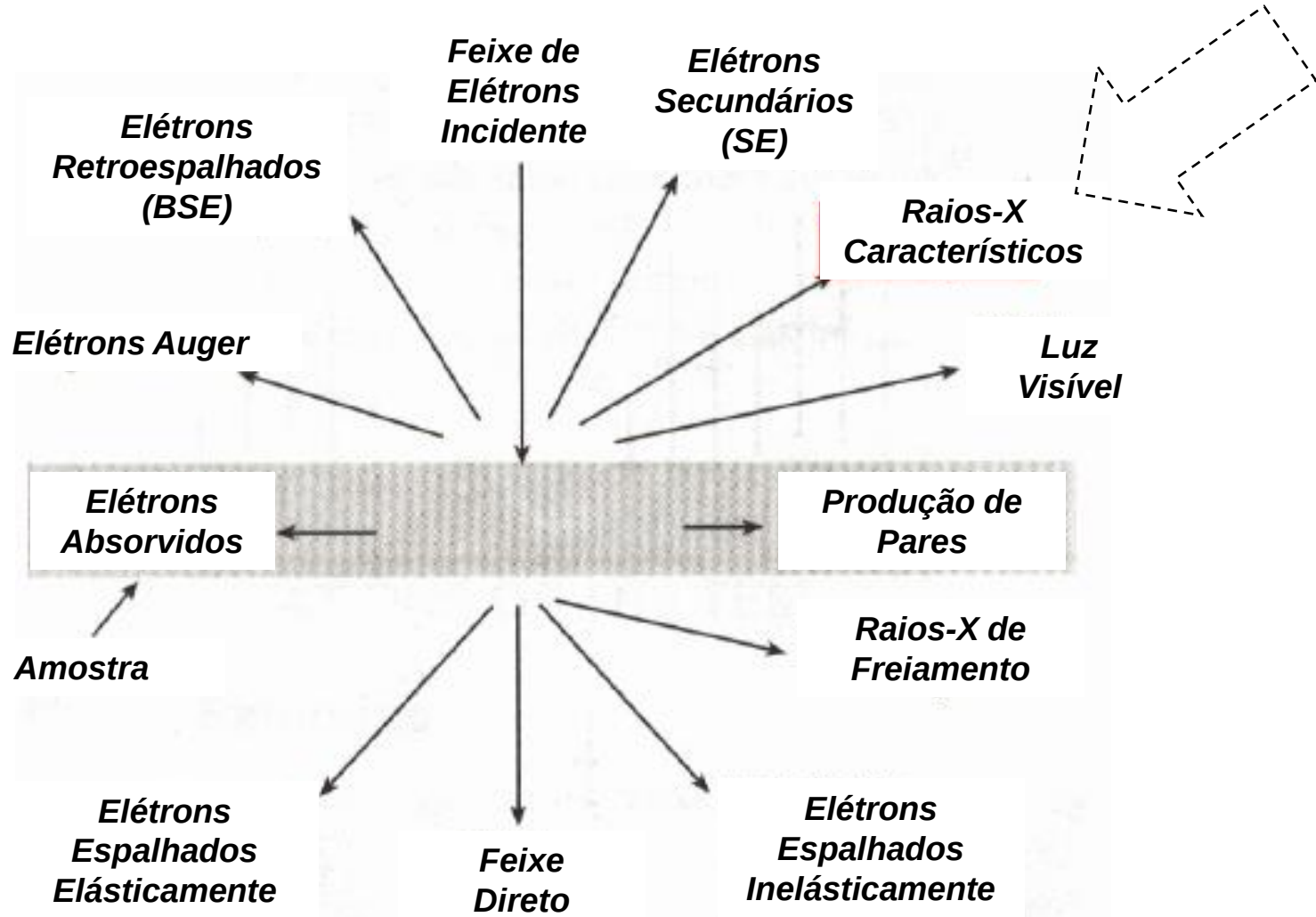


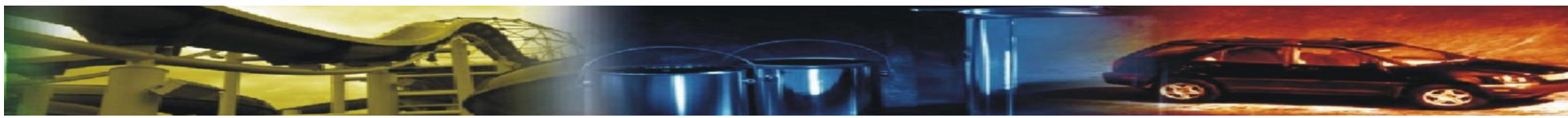
Microestruturas





EDS – Energy Dispersive Spectrometry





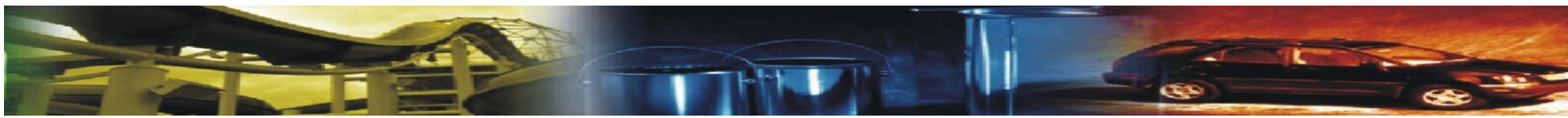
Interações entre as Radiações (Elétrons – Matéria / Fótons – Matéria)

- a) Raios-X característicos
- b) Elétrons Auger
- c) Conversão interna

a) Raios-X característicos

Quando ocorre a captura eletrônica ou outro processo que remova elétrons de orbitais, imediatamente elétrons de orbitais superiores preenchem o vazio deixado pelo elétron que foi removido originalmente. Ao passar de um estado menos ligado (mais externo) para outro mais ligado (mais interno), ocorre liberação de energia na forma de radiação eletromagnética.

O termo “característico” está relacionado à emissão que ocorre devido a uma transição, com característica monoenergética (discreta) e por apresentarem correlação com as características do átomo em questão, permitindo a identificação do elemento em envolvido.

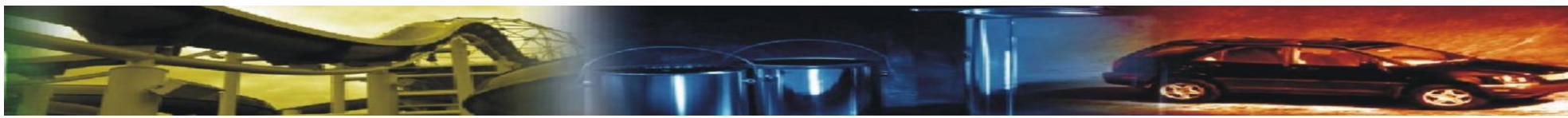


Interações em Processos de Decaimento ou Outros

b) Elétrons Auger

Neste tipo de interação, em um átomo excitado em sua eletrosfera, o excesso de energia não é liberado na forma de raios-X característicos e pode ser transferida a um elétron de uma camada mais externa. Quando ocorre a transição, os raios-X característicos gerados colidem com elétrons de camadas mais externas, retirando-os. Estes são denominados **elétrons Auger** e apresentam energia discreta, associadas aos níveis de energia de transição entre as camadas eletrônicas).

O processo pode ser entendido como se, ao ser emitido, o raio-x característico colidisse com elétrons do próprio elemento, retirando-os por efeito fotoelétrico.

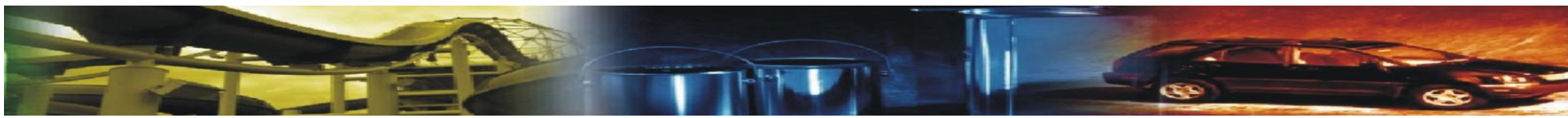


Interações em Processos de Decaimento ou Outros

c) Conversão interna

A conversão interna compete com a emissão gama e consiste na transferência da energia de excitação nuclear à elétrons das primeiras camadas (K e L), por meio de interação Coulombiana, retirando-os dos orbitais (Não aplicado a EDS).

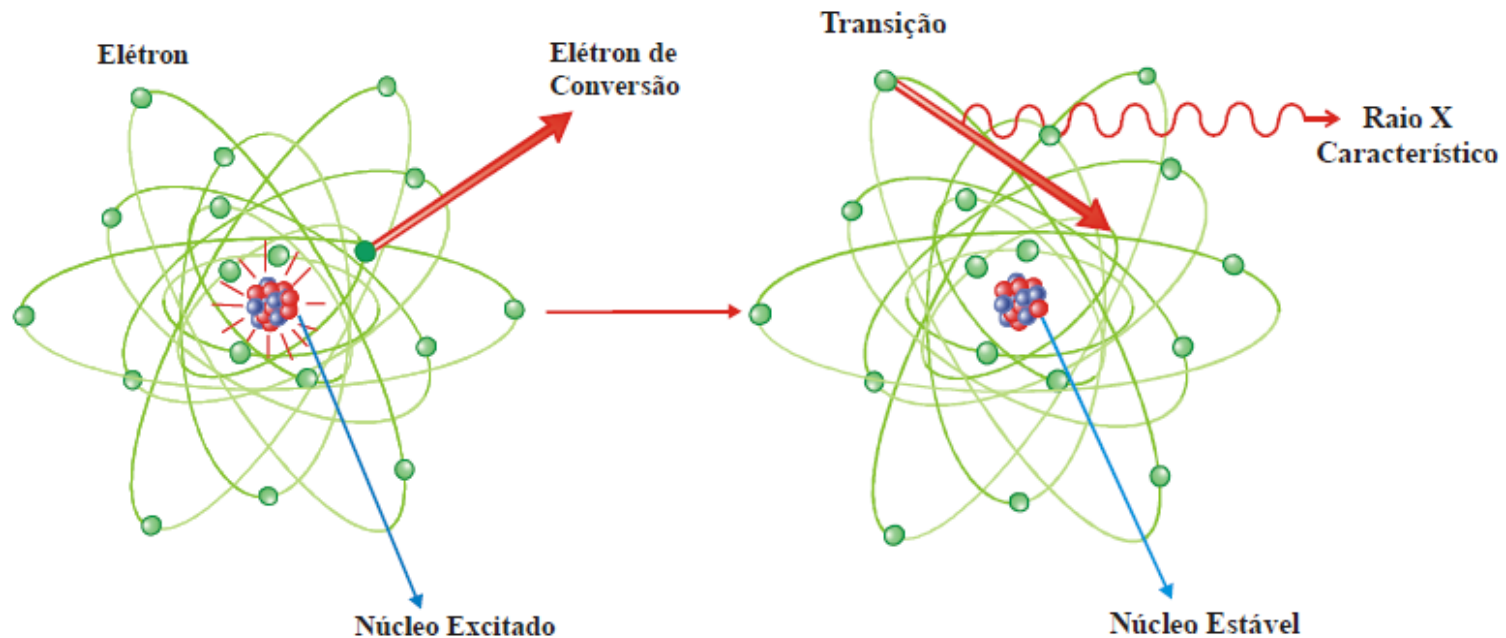
Os elétrons de conversão são monoenergéticos (espectro discreto) e permitem identificar o elemento químico. Uma vez que este processo gera um vazio (vacância), ocorrerá subsequentemente a emissão de raios-X característicos.

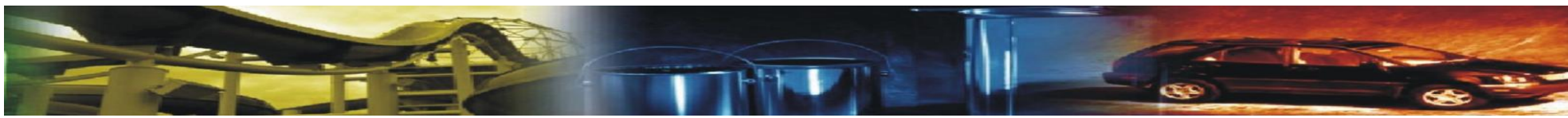


Interações em Processos de Decaimento

c) Conversão interna

O espectro de energia apresenta, neste caso, picos de energia correspondente aos elétrons de conversão, raios-X característicos e raios γ .

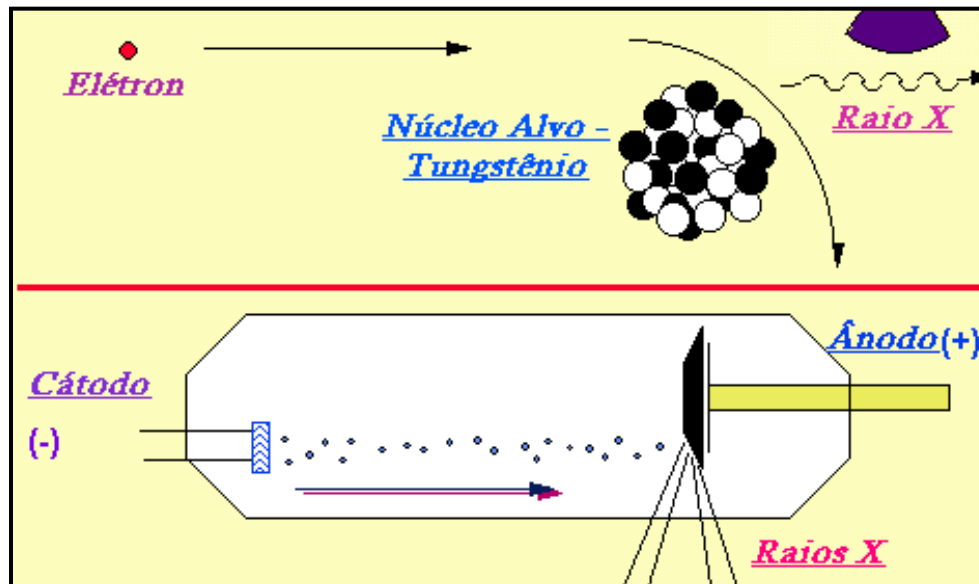


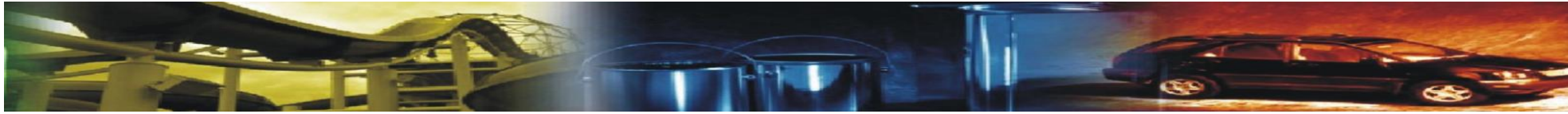


RADIAÇÃO PRODUZIDA PELA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Radiação de Freamento (Bremsstrahlung)

Quando partículas carregadas, principalmente elétrons, interagem com o campo elétrico do núcleo atômico em elementos pesados, ocorre a redução da energia cinética e mudança de direção das partículas. A diferença de energia é emitida na forma de ondas eletromagnéticas, as quais são chamadas de raios-X de freamento ou Bremsstrahlung.





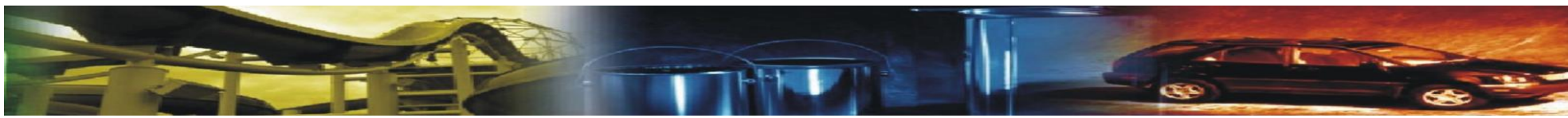
INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Radiação de Freamento

As radiações constituídas por partículas carregadas como α , β e elétrons acelerados, ao interagir com a matéria, podem converter uma parte da sua energia de movimento (cerca de 5%) em radiação eletromagnética. Esta radiação é denominada raios-X de freamento e é resultado da ação de campos elétricos da partícula incidente e do núcleo atômico.

Esquema dos principais tipos de interação.

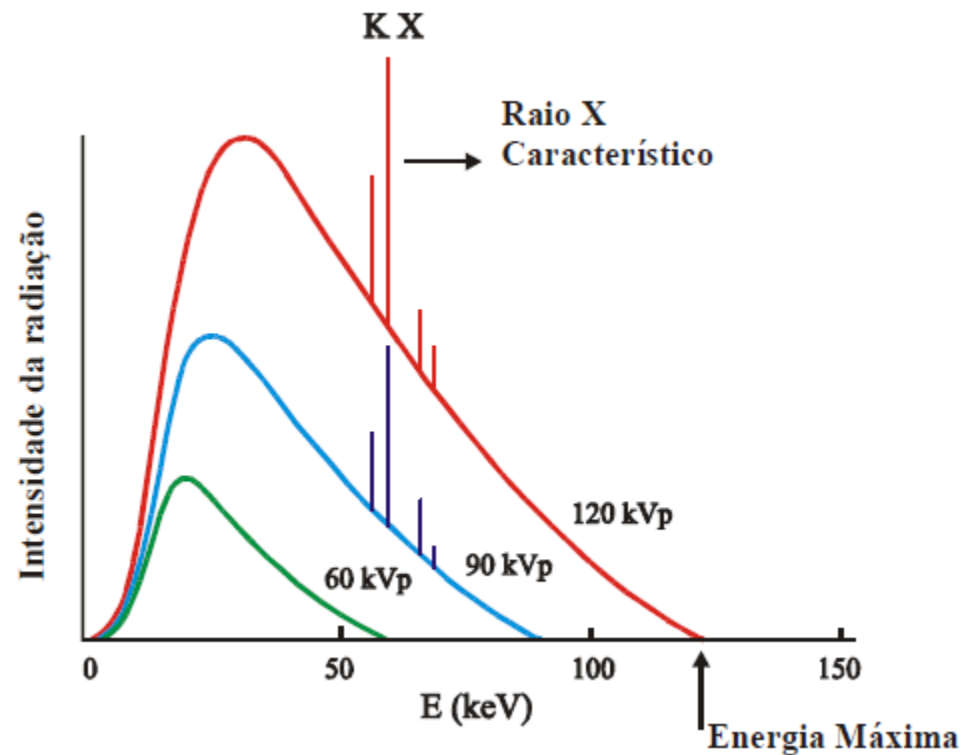


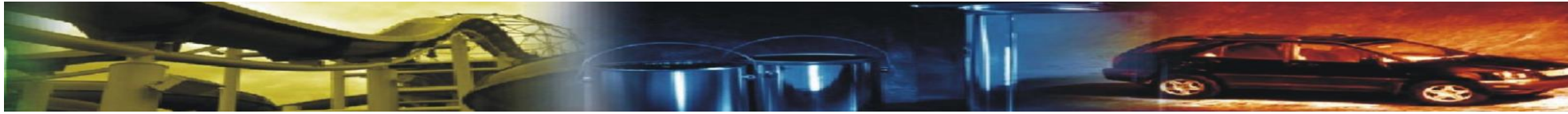


RADIAÇÃO PRODUZIDA PELA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Radiação de Freamento (Bremsstrahlung)

A energia depende diretamente da energia da partícula incidente. O espectro apresenta também picos de raios-X característicos do elemento que compõe o núcleo alvo.





INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

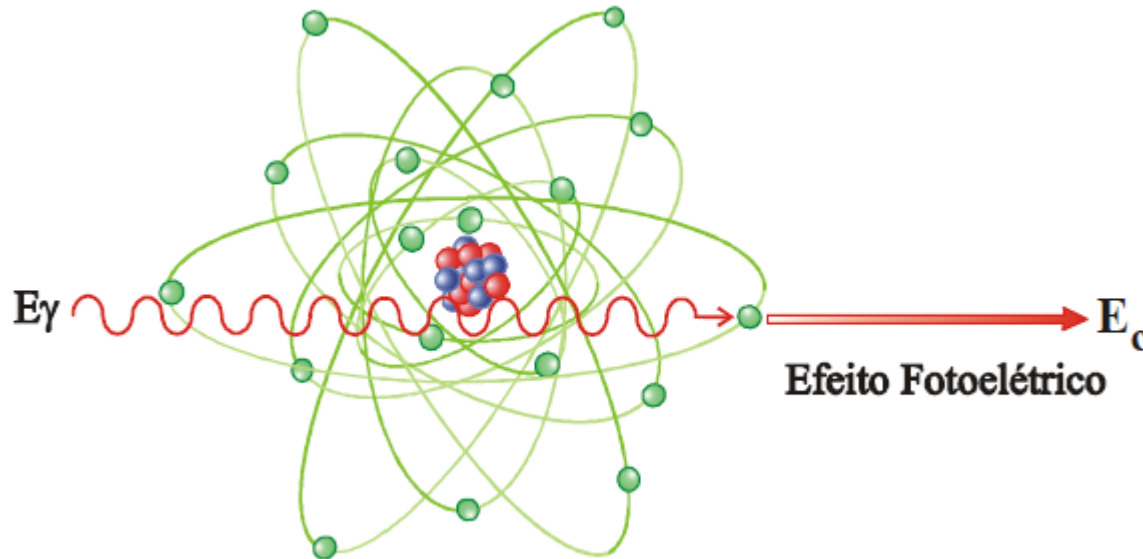
a) Efeito Fotoelétrico

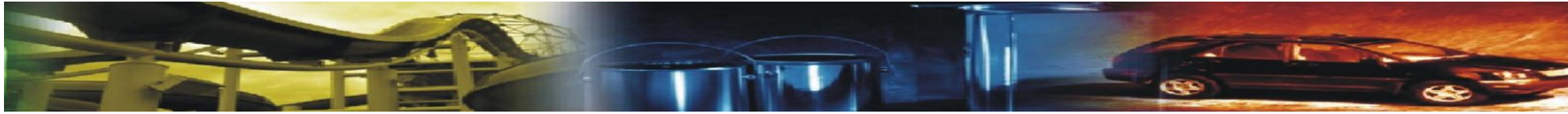
É caracterizado pela transferência total da energia da radiação gama ou X para um único elétron orbital, o qual é expelido com uma energia cinética (E_c) bem definida, onde:

$$E_c = h\nu - B_e$$

Sendo h a constante de Planck, ν a frequência da radiação e B_e a energia de ligação do elétron orbital.

Ocorre para baixas energias e elevado Z .



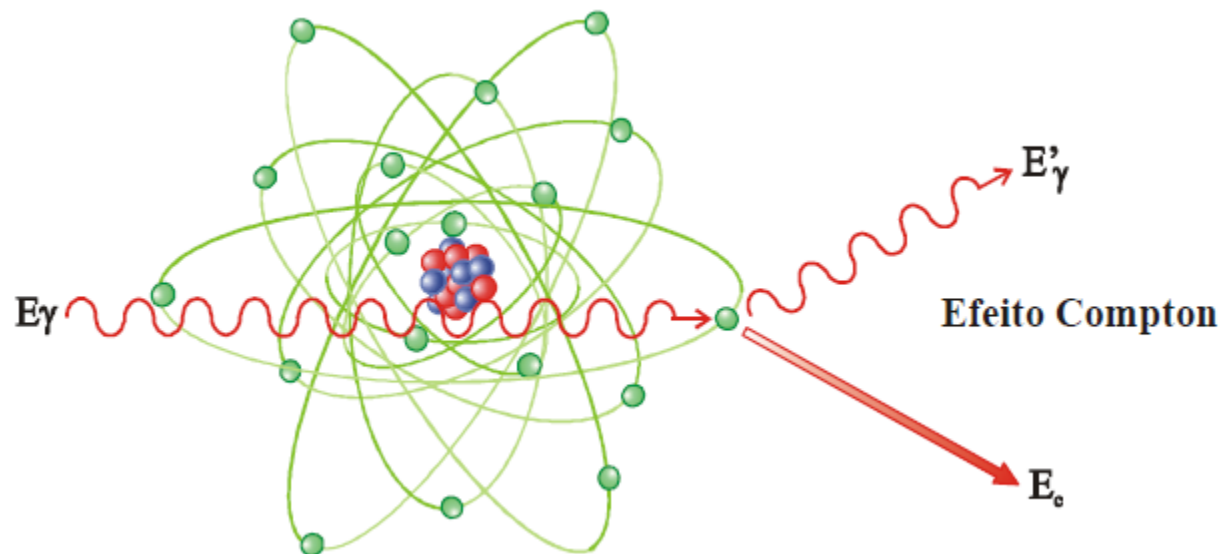


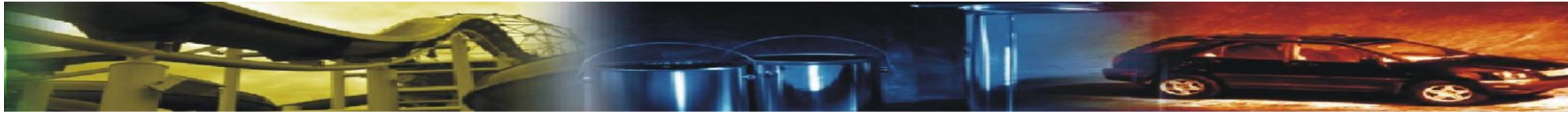
INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

b) Efeito Compton

No efeito Compton, o fóton é espalhado por um elétron com baixa energia de ligação, que recebe somente parte da sua energia. Assim, o fóton continua a sua existência dentro do material em outra direção. Poderão ser gerados fótons com energia baixa até a máxima energia da radiação.

$$E_{\gamma} = E_c + E'_{\gamma}$$





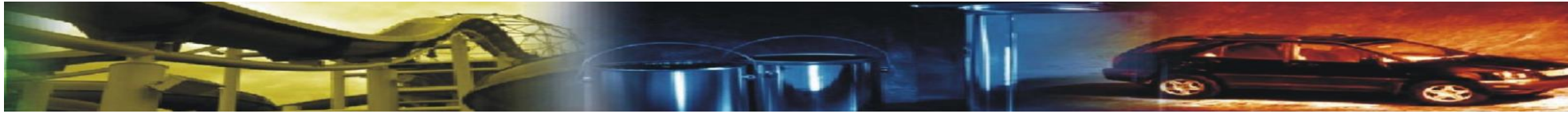
INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

c) Produção de Pares

Uma das formas predominantes de absorção de radiação eletromagnética de alta energia é a produção de par elétron-pósitron. Este efeito ocorre quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos com número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron ($2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$).

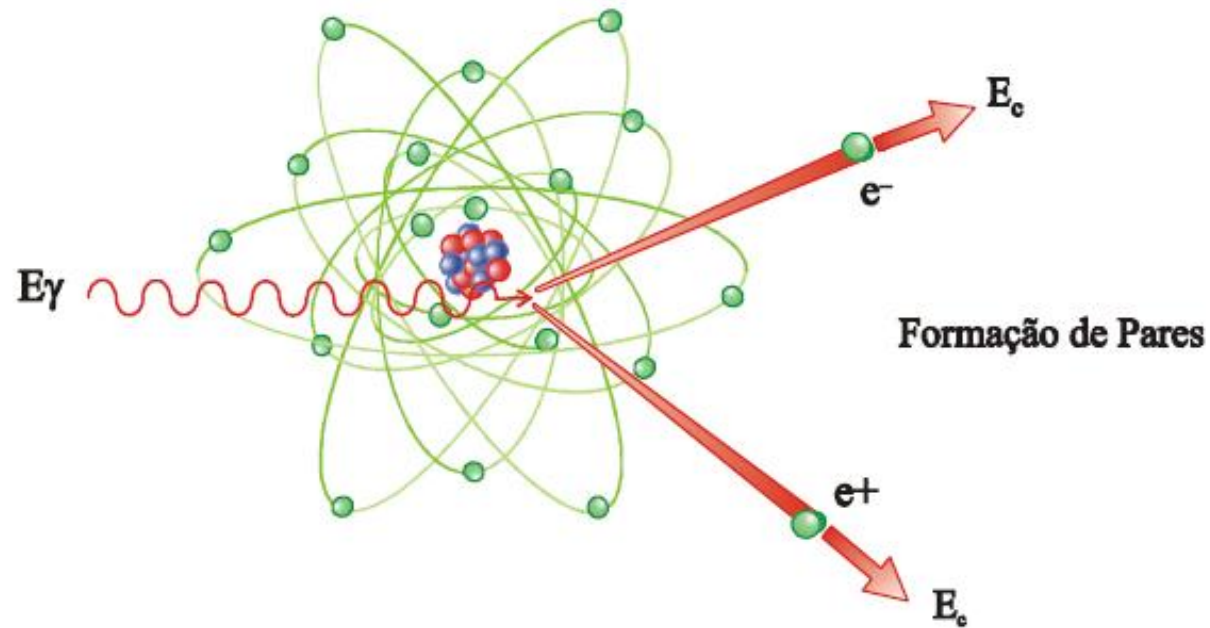
$$\gamma = e^- + e^+ + \text{energia cinética}$$

As duas partículas transferem a sua energia cinética para o material e então o pósitron volta a se combinar com o elétron, liberando outros dois fótons com energias 0,511 keV.



INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

c) Produção de Pares





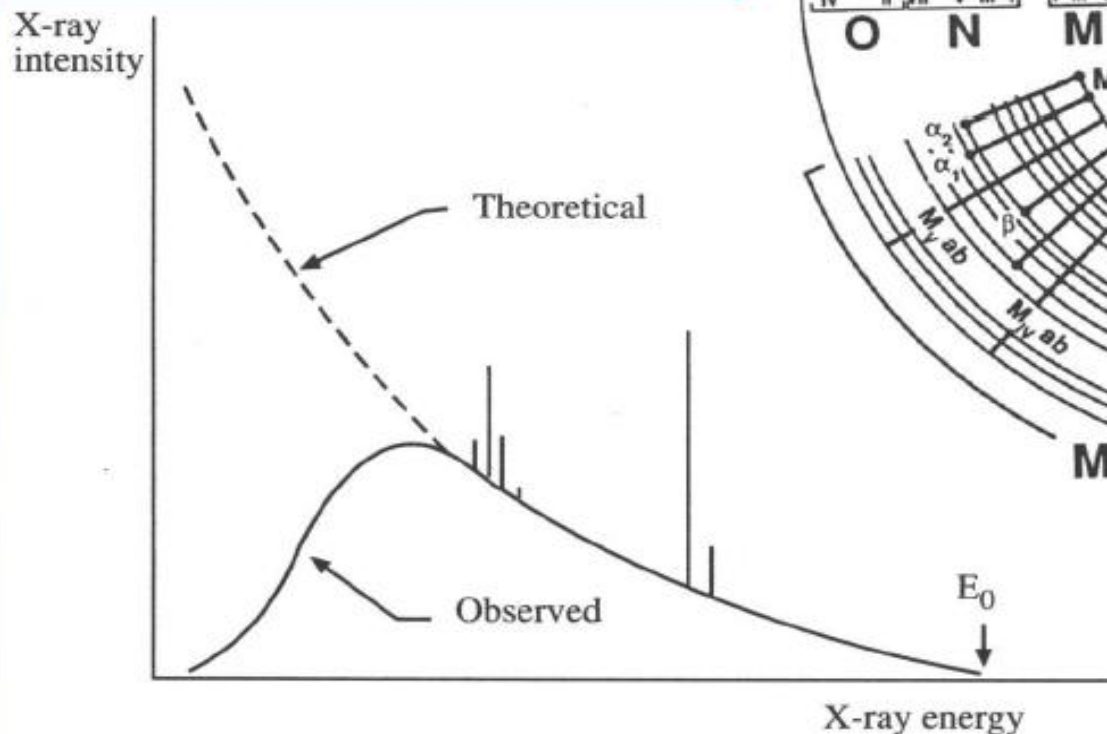
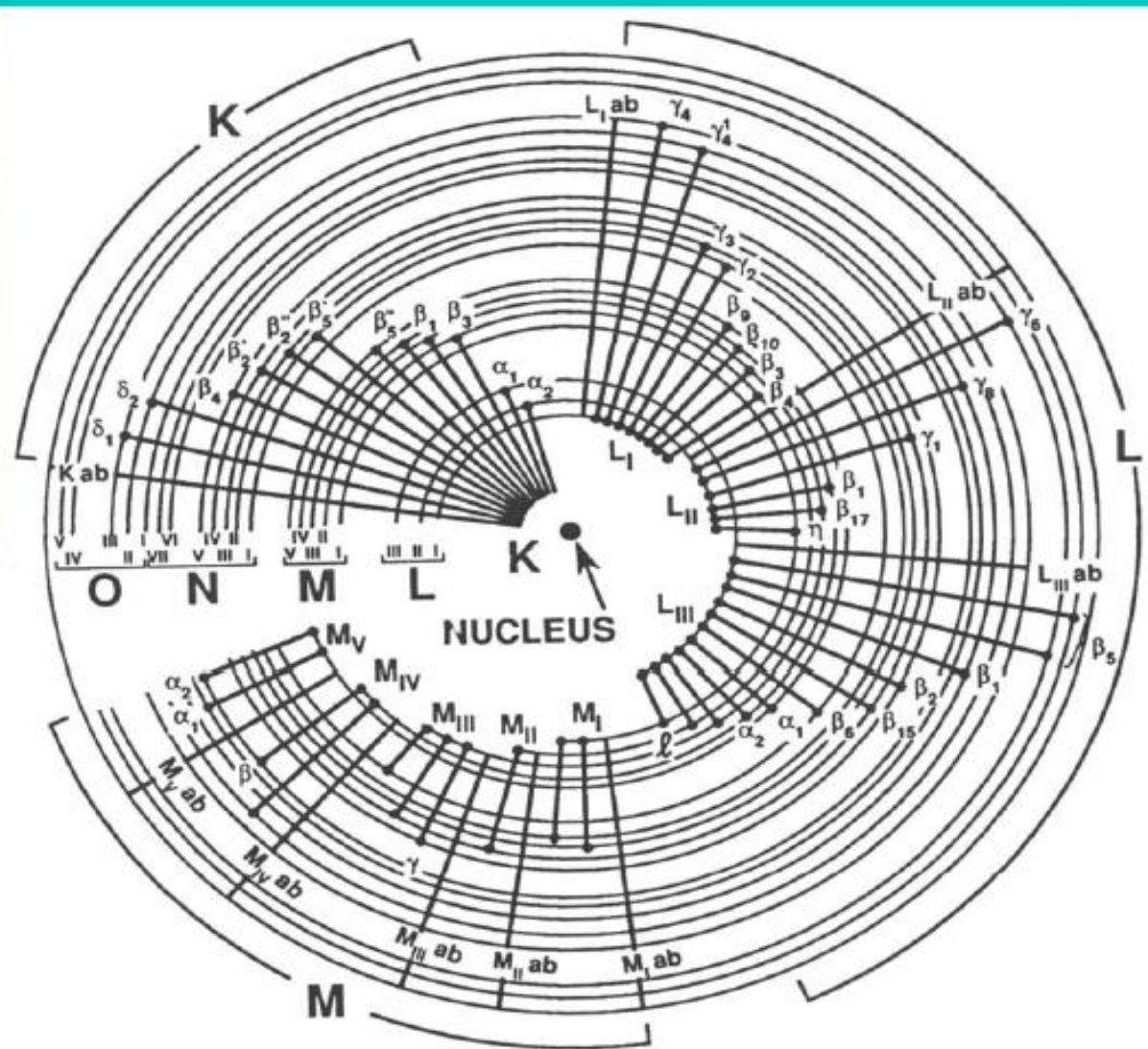
TIPO	DESIGNAÇÃO	EVENTO GERADOR	ENERGIA	
			valores	distribuição
fóton	raios X característicos	desexcitação da eletrosfera, alterada por captura eletrônica	eV a dezenas de keV	discreta
		desexcitação da eletrosfera, alterada por interação com partículas carregadas externas		
		desexcitação da eletrosfera, alterada por conversão interna		
		desexcitação da eletrosfera, alterada por interação com fótons externos		
	raios X de freamento	interação de elétron externo com campo eletromagnético nuclear ou eletrônico	eV a centenas de MeV	contínua
	raios gama	desexcitação nuclear	keV a MeV	discreta
		aniquilação de pósitron em interação com elétron	0,511 MeV	discreta
elétron	foto-elétron	elétron arrancado da camada eletrônica por interação com fóton, com transmissão total de energia	keV a MeV	discreta (hv-B)
	elétron-Compton	elétron arrancado da camada eletrônica por interação com fóton, com transmissão parcial de energia	keV a MeV	contínua
	radiação β^-	decaimento em núcleo instável por excesso de nêutrons.	keV a MeV	contínua
	elétron de conversão	transmissão de energia de excitação nuclear diretamente para a camada eletrônica; concorre com emissão gama.	dezenas de keV a MeV	discreta ($E_\gamma - B$)
	elétron Auger	desexcitação da eletrosfera por transmissão de energia a elétrons mais externos (menos ligados); concorre com raios-X característicos.	eV a dezenas de keV	discreta
	raios δ	elétrons arrancados da eletrosfera de átomos por interação com partículas carregadas com os átomos.	eV a MeV	contínua
	elétron de formação de par	transformação de energia em matéria por interação de um fóton de alta energia ($>1,022$ MeV) com o campo eletromagnético do núcleo.	eV a MeV	contínua



K, L, M, N: a camada em que ocorreu a ionização, de onde foi retirado o elétron,

α , β , γ : Camada a partir da qual saiu o elétron para preencher o vazio deixado pela ionização, sendo α a mais provável transição,

1,2,3: transição entre as subcamadas.



Energy Table

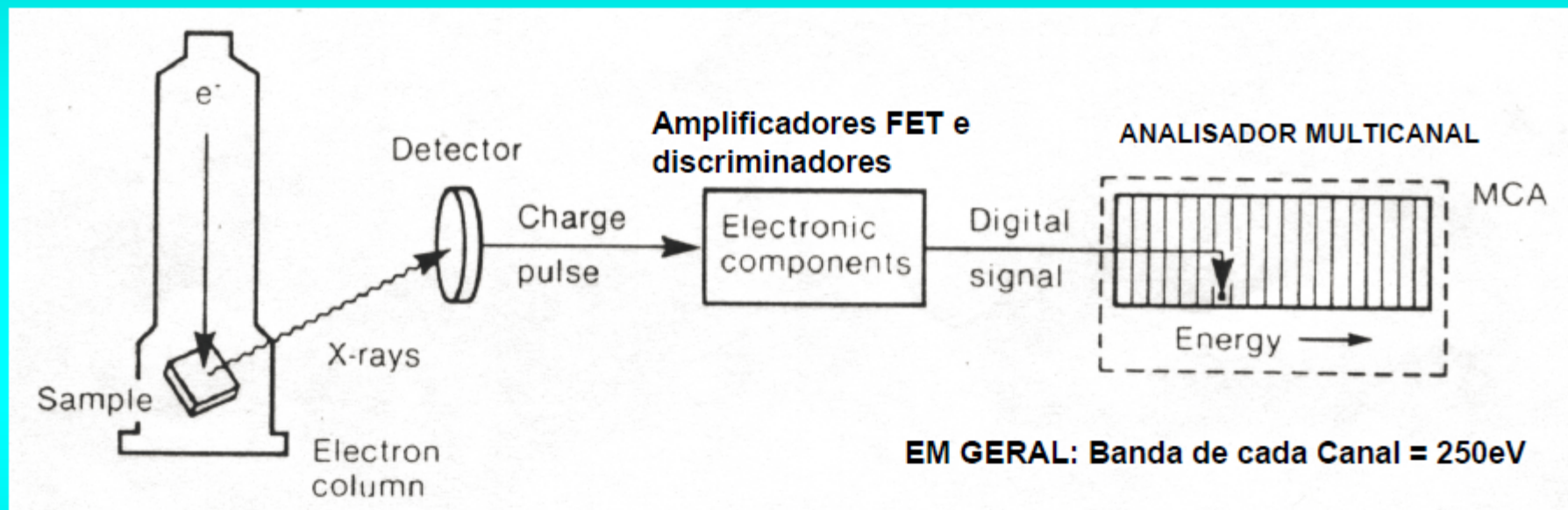
element	K α	K β 1	K β 2	L α 1	L β 1	L β 2	L γ 1	L α 2	L β 2	L γ 2	M α 1
1 H											
2 He											
3 Li											
4 Be											
5 B	0.183		0.192								
6 C	0.277		0.284								
7 N	0.392		0.400								
8 O	0.525		0.532								
9 F	0.677		0.687								
10 Ne	0.849		0.867								
11 Na	1.041	1.067	1.072								
12 Mg	1.254	1.296	1.303								
13 Al	1.487	1.553	1.560								
14 Si	1.740	1.829	1.840								
15 P	2.013	2.136	2.144								
16 S	2.308	2.464	2.471								
17 Cl	2.622	2.816	2.820								
18 Ar	2.957	3.191	3.203								
19 K	3.313	3.590	3.606								
20 Ca	3.691	4.013	4.038	0.341	0.345				0.353	0.349	
21 Sc	4.089	4.461	4.489	0.396	0.400						
22 Ti	4.509	4.932	4.965	0.452	0.458						
23 V	4.950	5.428	5.464	0.511	0.519						
24 Cr	5.412	5.947	5.989	0.573	0.583			0.742	0.693	0.599	
25 Mn	5.895	6.491	6.538	0.639	0.649						
26 Fe	6.400	7.058	7.111	0.705	0.718				0.721	0.708	
27 Co	6.925	7.650	7.710	0.776	0.791				0.794	0.779	
28 Ni	7.473	8.295	8.332	0.852	0.869				0.871	0.854	
29 Cu	8.042	8.906	8.961	0.930	0.950				0.953	0.933	
30 Zn	8.632	9.572	9.661	1.012	1.035			1.198	1.045	1.022	
31 Ga	9.243	10.265	10.368	1.098	1.125			1.303	1.145	1.117	
32 Ge	9.876	10.983	11.104	1.188	1.219			1.413	1.248	1.217	
33 As	10.532	11.727	11.865	1.282	1.317			1.529	1.359	1.324	
34 Se	11.209	12.498	12.655	1.379	1.419			1.653	1.475	1.434	
35 Br	11.909	13.292	13.471	1.481	1.526			1.782	1.599	1.553	
36 Kr	12.634	14.113	14.325	1.588	1.637			1.916	1.730	1.677	
37 Rb	13.376	14.961	15.204	1.694	1.752			2.054	1.866	1.807	
38 Sr	14.142	15.837	16.108	1.807	1.872			2.217	2.009	1.941	
39 Y	14.934	16.739	17.036	1.923	1.996			2.377	2.154	2.080	
40 Zr	15.748	17.669	18.000	2.042	2.125	2.219	2.303	2.541	2.305	2.222	
41 Nb	16.584	18.622	18.987	2.166	2.257	2.367	2.462	2.710	2.484	2.371	
42 Mo	17.446	19.609	20.004	2.293	2.395	2.518	2.624	2.861	2.627	2.524	
43 Tc	18.327	20.620	21.047	2.424	2.537			3.000	2.790	2.670	
44 Ru	19.237	21.657	22.120	2.559	2.683	2.806	2.965	3.233	2.966	2.836	
45 Rh	20.170	22.725	23.218	2.697	2.835	3.001	3.144	3.417	3.145	3.002	
46 Pd	21.125	23.820	24.349	2.839	2.990	3.172	3.329	3.608	3.330	3.173	
47 Ag	22.105	24.942	25.517	2.984	3.151	3.348	3.520	3.807	3.526	3.351	
48 Cd	23.110	26.097	26.715	3.134	3.317	3.528	3.717	4.019	3.728	3.538	
49 In	24.140	27.279	27.943	3.287	3.487	3.714	3.921	4.237	3.939	3.730	
50 Sn	25.195	28.489	29.194	3.444	3.663	3.905	4.131	4.465	4.157	3.929	
51 Sb	26.279	29.725	30.486	3.605	3.844	4.101	4.348	4.699	4.382	4.132	
52 Te	27.382	30.996	31.816	3.770	4.030	4.302	4.571	4.940	4.613	4.342	
53 I	28.515	32.296	33.169	3.939	4.221	4.508	4.801	5.192	4.854	4.599	
54 Xe	29.669	33.628	34.594	4.110				5.453	5.104	4.782	

element	K α	K β 1	K β 2	L α 1	L β 1	L β 2	L γ 1	L α 2	L β 2	L γ 2	M α 1
55 Cs	30.857	34.985	35.990	4.287	4.620	4.936	5.281	5.721	5.358	5.012	
56 Ba	32.071	36.381	37.458	4.466	4.828	5.157	5.531	5.996	5.623	5.247	
57 La	33.302	37.800	38.940	4.651	5.042	5.384	5.789	6.268	5.889	5.494	0.833
58 Ce	34.575	39.261	40.452	4.840	5.262	5.613	6.052	6.548	6.161	5.724	0.883
59 Pr	35.885	40.744	42.000	5.034	5.489	5.850	6.322	6.835	6.439	5.963	0.929
60 Nd	37.188	42.272	43.580	5.231	5.722	6.090	6.602	7.130	6.724	6.210	0.978
61 Pm	38.541	43.826	45.201	5.433	5.962	6.339	6.892	7.436	7.014	6.461	
62 Sm	39.918	45.416	46.858	5.638	6.205	6.587	7.178	7.748	7.314	6.718	1.081
63 Eu	41.328	47.035	48.526	5.846	6.457	6.843	7.481	8.061	7.620	6.961	1.131
64 Gd	42.768	48.698	50.237	6.058	6.714	7.103	7.766	8.366	7.932	7.243	1.185
65 Tb	44.233	50.380	52.007	6.273	6.978	7.367	8.102	8.717	8.253	7.516	1.240
66 Dy	45.734	52.116	53.790	6.495	7.248	7.638	8.419	9.055	8.583	7.790	1.293
67 Ho	47.268	53.983	55.724	6.720	7.526	7.912	8.747	9.400	8.917	8.068	1.348
68 Er	48.813	55.744	57.480	6.949	7.811	8.199	9.089	9.758	9.262	8.359	1.406
69 Tm	50.421	57.507	59.380	7.180	8.102	8.489	9.426	10.121	9.617	8.650	1.462
70 Yb	52.051	59.380	61.318	7.416	8.402	8.789	9.780	10.491	9.976	8.944	1.522
71 Lu	53.696	61.266	63.290	7.656	8.709	9.048	10.144	10.874	10.345	9.249	1.581
72 Hf	55.400	63.225	65.324	7.899	9.023	9.348	10.518	11.274	10.737	9.556	1.645
73 Ta	57.110	65.221	67.420	8.146	9.343	9.652	10.898	11.682	11.133	9.877	1.710
74 W	58.872	67.237	69.498	8.398	9.673	9.982	11.286	12.100	11.539	10.200	1.776
75 Re	60.658	69.304	71.668	8.653	10.010	10.276	11.686	12.531	11.955	10.531	1.843
76 Os	62.492	71.420	73.845	8.912	10.355	10.599	12.098	12.972	12.381	10.868	1.914
77 Ir	64.341	73.582	76.111	9.175	10.709	10.921	12.512	13.424	12.820	11.212	1.980
78 Pt	66.267	75.739	78.372	9.443	11.071	11.251	12.942	13.883	13.273	11.563	2.050
79 Au	68.199	77.978	80.719	9.714	11.443	11.585	13.382	14.353	13.736	11.922	2.123
80 Hg	70.167	80.249	83.100	9.989	11.823	11.924	13.830	14.843	14.215	12.287	2.195
81 Tl	72.168	82.602	85.507	10.269	12.214	12.272	14.292	15.343	14.701	12.661	2.271
82 Pb	74.243	84.921	87.885	10.552	12.614	12.623	14.765	15.855	15.205	13.041	2.346
83 Bi	76.345	87.313	90.366	10.839	13.024	12.980	15.248	16.378	15.720	13.427	2.423
84 Po	78.472	89.779		11.131	13.447	13.340	15.744				
85 At	80.614	92.319		11.427	13.876		16.252				
86 Rn	82.878	94.862		11.728	14.315		16.771				
87 Fr	85.096	97.473		12.032	14.771	14.450	17.304				
88 Ra	87.437	100.149		12.341	15.236	14.841	17.850				
89 Ac	89.779	102.807		12.653	15.714		18.409				
90 Th	92.182	105.609	109.624	12.969	16.203	15.825	18.984	20.463	19.893	18.299	2.996
91 Pa	94.645	108.473		13.292	16.703	16.025	19.568	21.172	20.592	18.768	3.083
92 U	97.167	111.297	115.658	13.616	17.220	16.428	20.167	21.771	20.947	19.165	3.171
93 Np	99.427	113.748		13.945	17.750	16.841	20.785				
94 Pu											
95 Am											
96 Cm											
97 Bk											
98 Cf											
99 Es											
100 Fm											
101 Md											
102 No											
103 Lr											

K_{AB} , L_{AB} , M_{AB} :
**ENERGIAS CRÍTICAS DE
 IONIZAÇÃO**



O ESPECTRÔMETRO DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA



O EDS DETECTA E SEPARA (DISPERSA) OS
SINAIS DE RAIOS X DE ACORDO COM SUAS
ENERGIAS:
DESTA FORMA O NOME DO ESPECTRÔMETRO

