



SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Apresentação do professor

- **Engenharia de Materiais** (UFSCar-1988);
- **Mestrado** em Engenharia Mecânica: Materiais e Processos, área de concentração: Metalurgia Física e Mecânica de Fratura (Unicamp-2008);
- **Doutorado** em Engenharia Metalúrgica e de Materiais: área de concentração: Metalurgia Física, Transformação de Fases (EPUSP-2012);
- **Pós-doutorado** em Engenharia de Materiais: Propagação de trinca por fadiga, em aço API5LX70, em meio de etanol (UFSCar, 2017);
- **Experiência industrial (1991-2013): 22 anos em indústrias de vários segmentos: automotiva, equipamentos de óleo & gás, movimentação, mineração, eólica, siderurgia e hidromecânicos;**
- **Professor da EEL-USP de 2013 a 2016;**
- **Professor da EESC-USP, desde 2016;**

Trabalhando com aços há 30 anos: Metalurgia Física/Transformação de fases relacionadas à propriedades mecânicas, Análise de falhas.

• **Qualificações: Ensaio de ultrassom (ASNT-1997) e Supervisor de radioproteção (CNEN-2003)**

Bibliografia

- Souza, Sérgio Augusto “Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos” – 5º. Edição
- Garcia, Amauri; Spim, Jaime Alvares; Santos, Carlos Alexandre “Ensaio dos Materiais”
- Canevarolo, Sebastião V. “Técnicas de Caracterização de Polímeros” – Editora Artliber

Programa

1. Introdução;
2. Base de ciência dos materiais: ligações, classificação dos materiais, estrutura e propriedades;
3. Propriedades mecânicas e influência dos processos de fabricação;
4. Ensaio de dureza e impacto;
5. Ensaio de tração;
6. Ensaio de tração em polímeros;
7. Ensaio de compressão;
8. Ensaio de torção;
9. Ensaio de flexão;
10. Ensaio de fluência;
11. Ensaio de Fadiga;
12. Aspectos da fratura de materiais.

Métodologia: serão disponibilizados no moodle (e-disciplinas):

- **Vídeoaulas** gravadas;
- **Vídeos** de ensaios;
- **Textos explicativos** quando forem necessários;
- **Questionários orientativos** para direcionamento do estudo (**não é necessário enviar** o questionário respondido);
- **Dúvidas** por e-mail para:
 - **Rubens Coutinho Toledo**, mestrando da Engenharia Mecânica, monitor do PAE (**rubenstoledo@usp.br**) ;
 - **José Benedito Marcomini**, professor, (**jmarcomini@usp.br**).

Avaliação

Duas provas, sendo a média final (MF):

$$\mathbf{MF = (P1+P2)/2}$$

P1 e P2 = notas das provas

P1: 21 DE OUTUBRO

P2: 09 DE DEZEMBRO

INTRODUÇÃO

OBJETIVOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS:

- **Determinação de propriedades mecânicas necessárias a cálculos de projeto;**
- **Pesquisa e desenvolvimento de materiais e processos de fabricação;**
- **Comparação e seleção de materiais;**
- **Avaliação do desempenho de componentes mecânicos e produtos acabados;**
- **Ensaio de rotina (controle da qualidade);**
- **Auxílio à análise de falhas.**

DESDE A ÉPOCA DOS FILÓSOFOS, O INTERESSE EM MEDIR AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS LEVOU AO DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS PARA ATINGIR ESTE OBJETIVO.

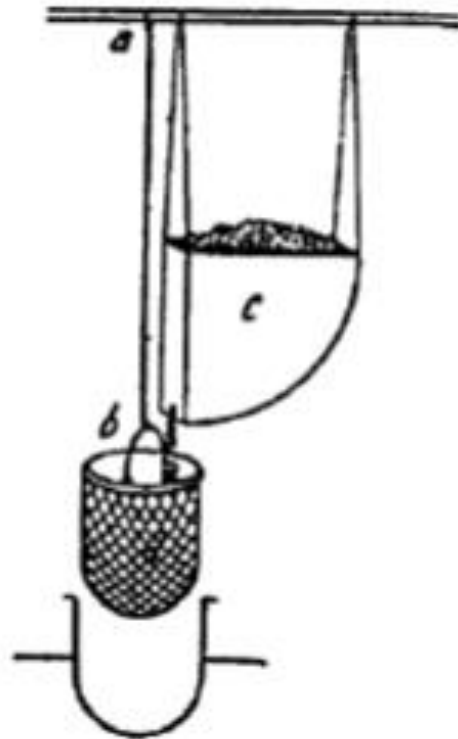
PEQUENO HISTÓRICO

- **Período pré-industrial: produção artesanal;**
- **Após a revolução industrial: produção em larga escala, desenvolvimento de processos e produtos, sistemas de controle de qualidade, produtos com maiores exigências;**
- **Necessidade de ensaios mecânicos.**

- Desenvolvimento dos **ensaios mecânicos** está relacionado ao avanço da **Mecânica dos sólidos e da Ciência dos materiais**;
- O **grande impulso** para o desenvolvimento dos **ensaios**: a partir do **século XIX** com o **aumento** do emprego de **ferro e aço na construção de pontes, máquinas a vapor, navios e edificações**;
- O **início**, porém, ocorre bem antes...

ENSAIO DE TRAÇÃO

Leonardo Da Vinci (1452-1519)



Testar as propriedades dos fios de ouro que laminava:
a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento

Esquema do ensaio de tração idealizado por Leonardo Da Vinci.

ENSAIO DE TRAÇÃO

Galileu Galilei (1564-1642)

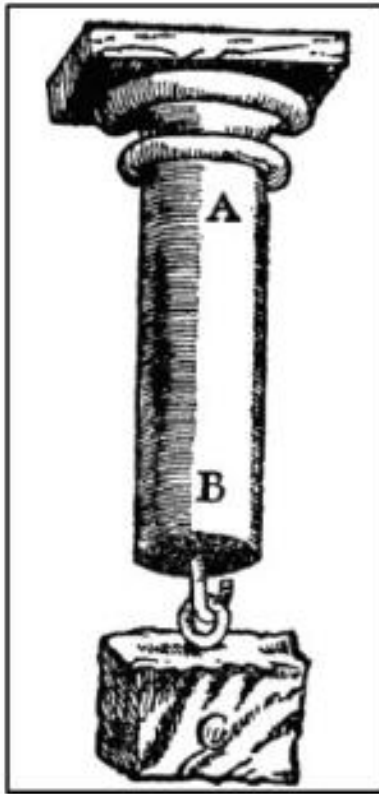


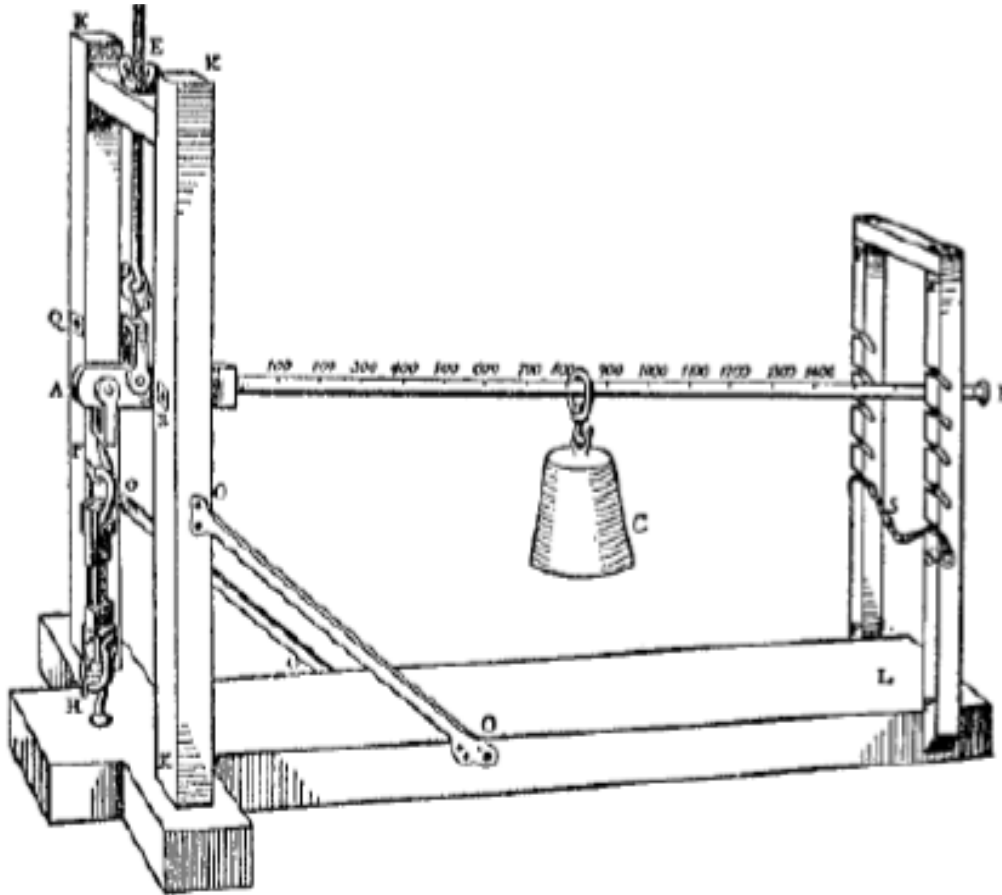
Ilustração de Galileu para o ensaio de tração.

A resistência à tração de uma barra era proporcional à área da secção transversal e independente do comprimento: “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove Scienze” (1638).

ENSAIO DE TRAÇÃO

P. Van Musschenbroek (1692-1761)

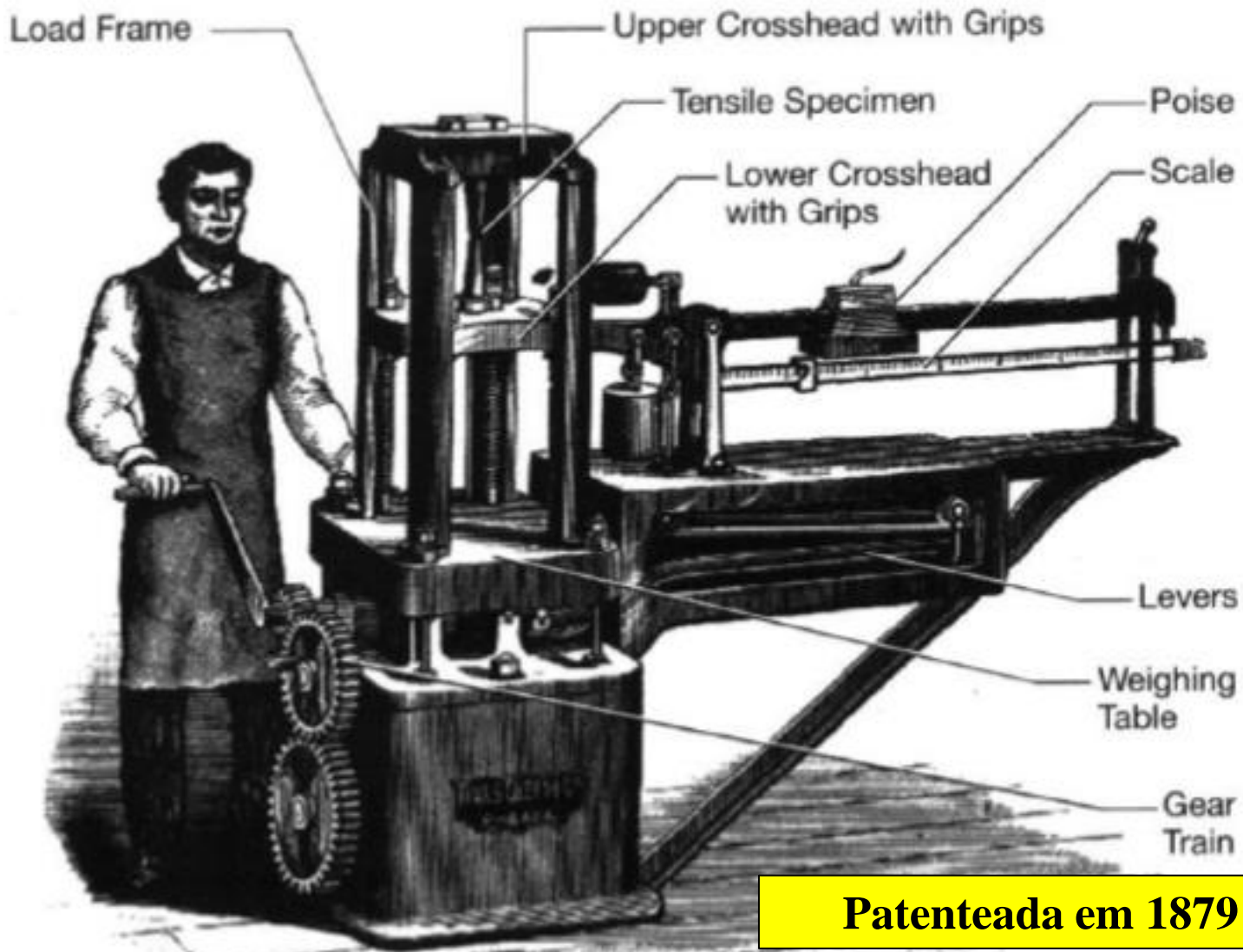
Máquina de tração de Musschenbroek.



“Physicae Experimentales
et Geometricae”,
publicado em 1729

ENSAIO DE TRAÇÃO

Tinius Olsen (1845-1932)

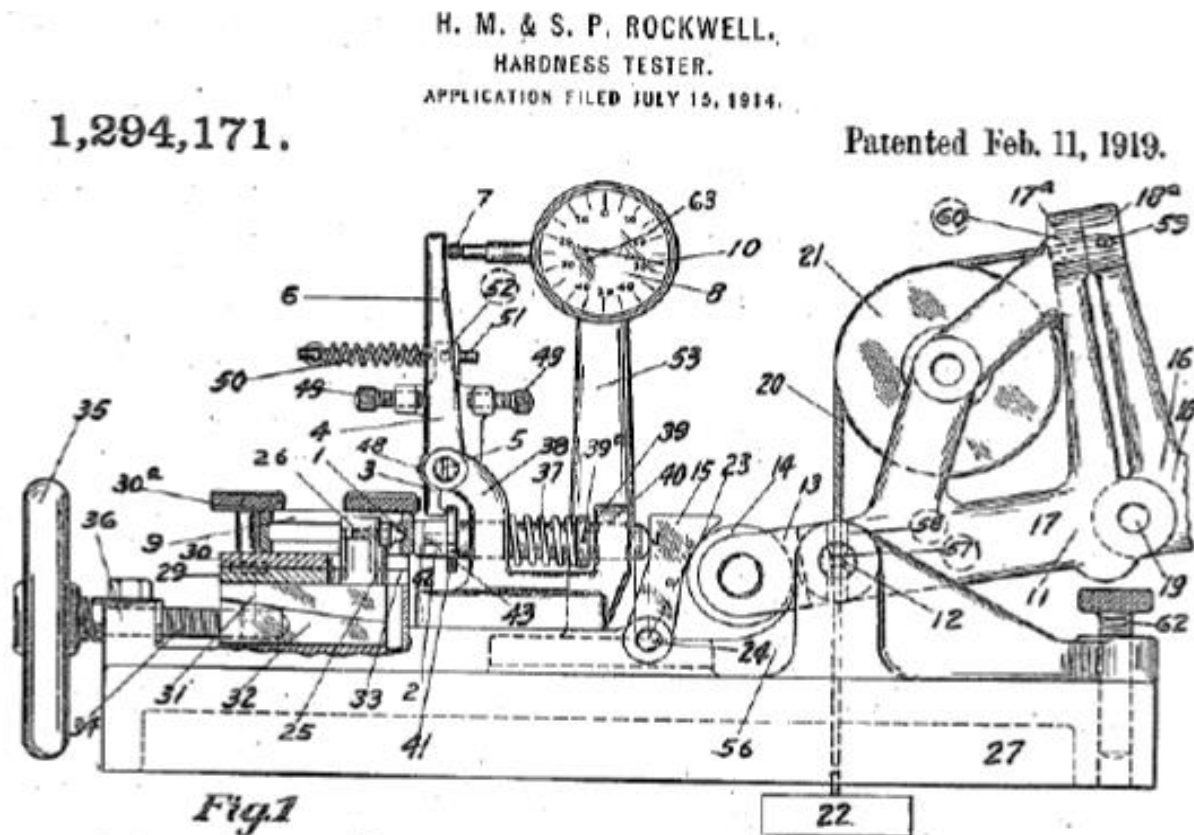


Patenteada em 1879

ENSAIO DE DUREZA

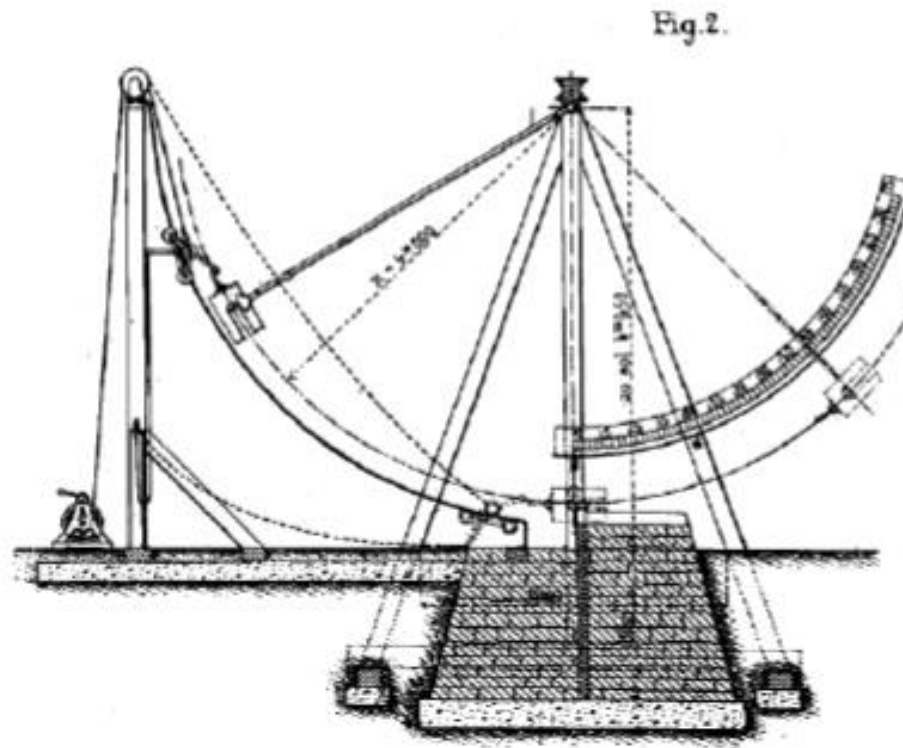
- Mohs(1822) – capacidade de riscar;
- J.A. Brinell (1849-1925) – 1900 dureza por penetração;
- Os irmãos Stanley e Hugh Rockwell – 1919.

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



ENSAIO DE IMPACTO

- O cientista francês **Georges Augustin Albert Charpy (1865-1945)**;
- **1901 - *Proceedings of the Congress of the International Association for Testing Materials (IATM)***;
- O inglês **E. G. Izod (1876-1946)**- alternativa, em **1903**.

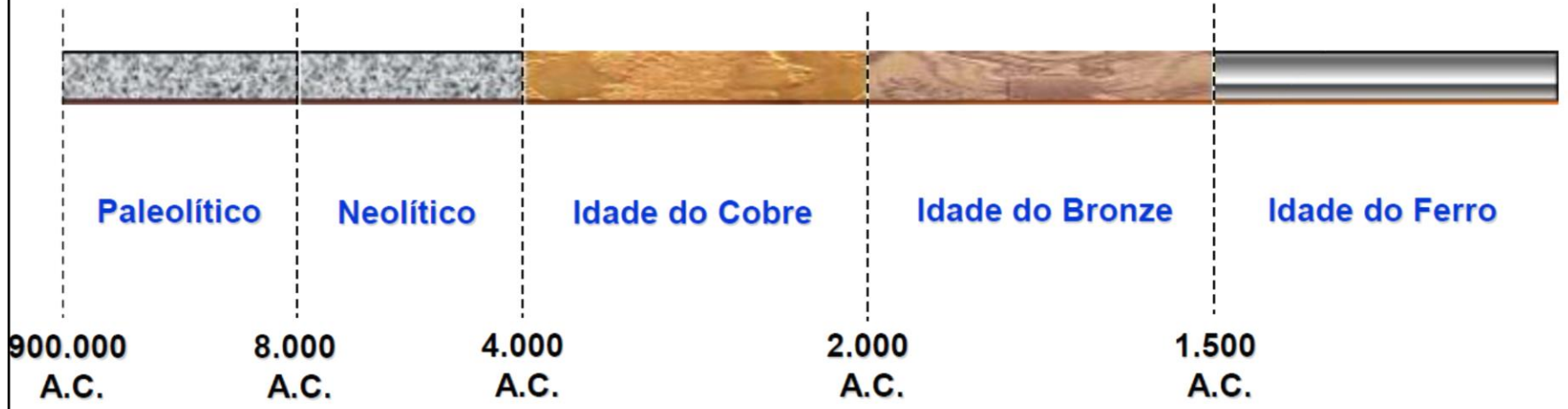


Desenho da máquina para ensaio de impacto proposta por Charpy.

**A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS, COM
PROPRIEDADES MECÂNICAS MELHORES,
LEVOU À EVOLUÇÃO DA MECÂNICA DOS
SÓLIDOS E DOS ENSAIOS MECÂNICOS (PARA
AVALIAR ESSAS PROPRIEDADES) E ATÉ DOS
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.**

Idade da Pedra

Idade dos Metais



Histórico do Aço

Invenção do
Aço

Produção de
Ferro Líquido

Processo em
Cadinho

Conversor
Bessemer

Fornos
Siemens-Martin

Fornos
LD e Elétricos

Siderurgia
Moderna

1.400
A.C.

Século XIV

1.742
D.C.

1.865
D.C.

1.870
D.C.

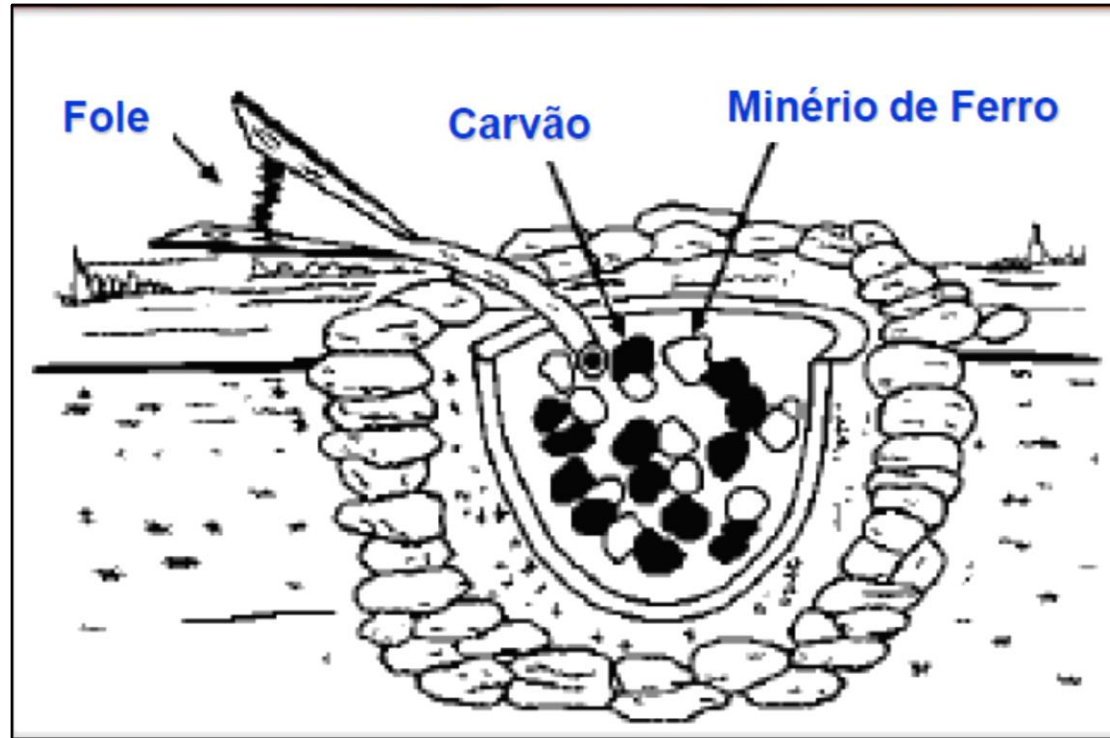
1.878
D.C.

1.960
D.C.



SURGIMENTO DO AÇO

Hititas - Sul da Turquia (1.400 AC)- processo para produção de espadas.



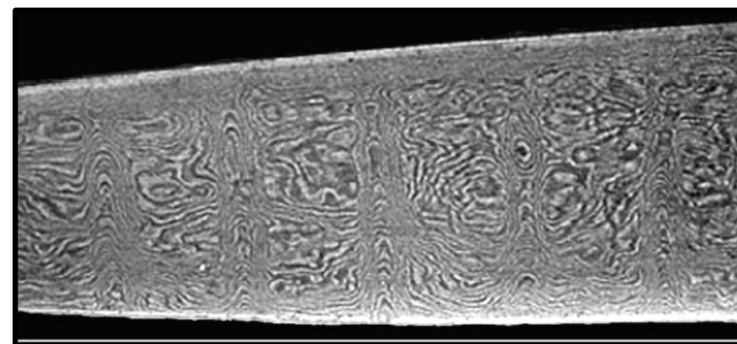
Século V A.C. - chineses, que já haviam inventado a roda, começaram a fabricar o ferro carburado, mais tarde chamado ferro-gusa;

23-79 D.C. - primeiros registros de estudos metalúrgicos - manuscritos de Pliny.

HISTÓRIA – PRIMEIRO MILÊNIO D.C. – AÇO DE DAMASCO “INQUEBRÁVEL!!!”

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
Damascus	1.41	<0.01	0.098	0.006	0.05	0.04	<0.01	<0.01	0.09

Journal of Materials Engineering and Performance 286—Volume 9(3) June 2000 *John D. Verhoeven*



J.D. Verhoeven, A.H. Pendray, and W.E. Dauksch 2004 September • JOM

Image source (http://www.flickr.com/photos/jasleen_kaur/4211340481/)



HISTÓRIA

Minas específicas da Índia

Minério com traços
de V, Mn, Cr, Co E
Ni.

Fundição com madeira da
“Cassia auriculata” e
folhas da “Calotropis
gigantean”



Cassia auriculata



Calotropis gigantean

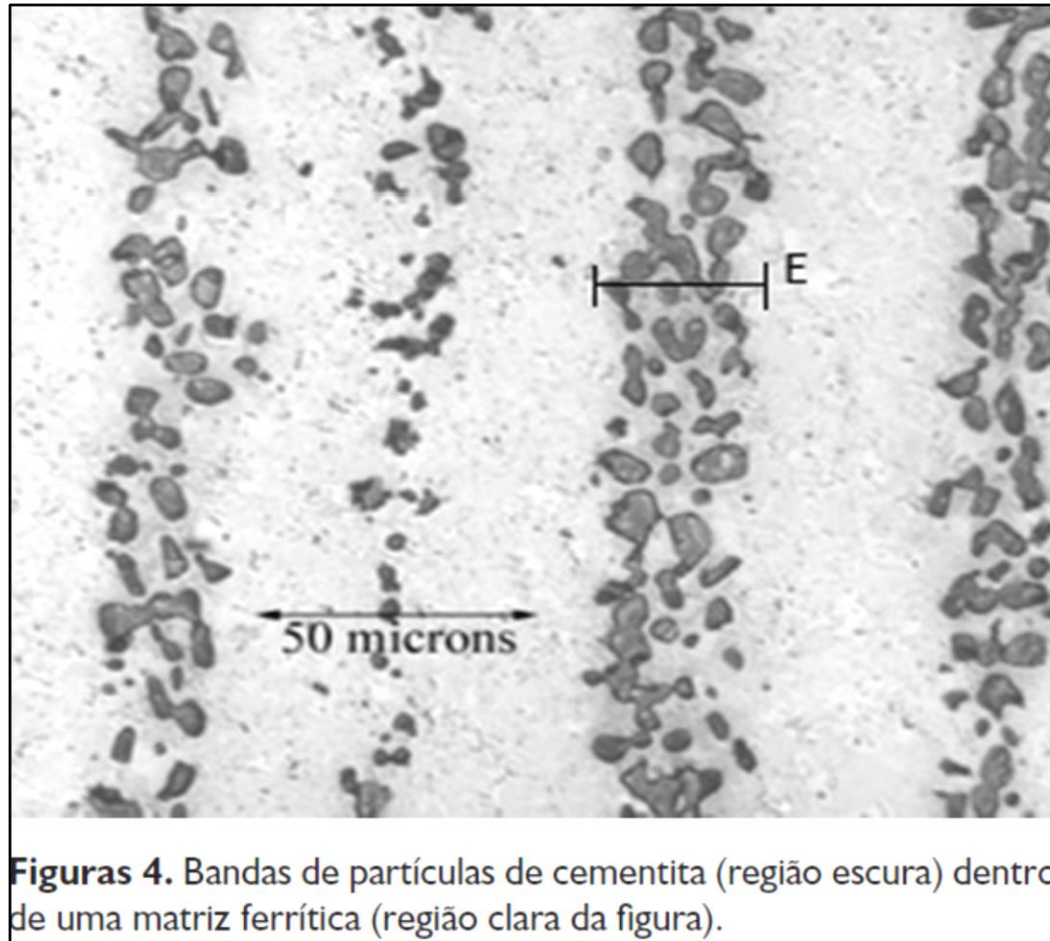
AÇO WOOTZ

DAMASCO-SÍRIA

Forjamento e
tratamentos
térmicos cíclicos

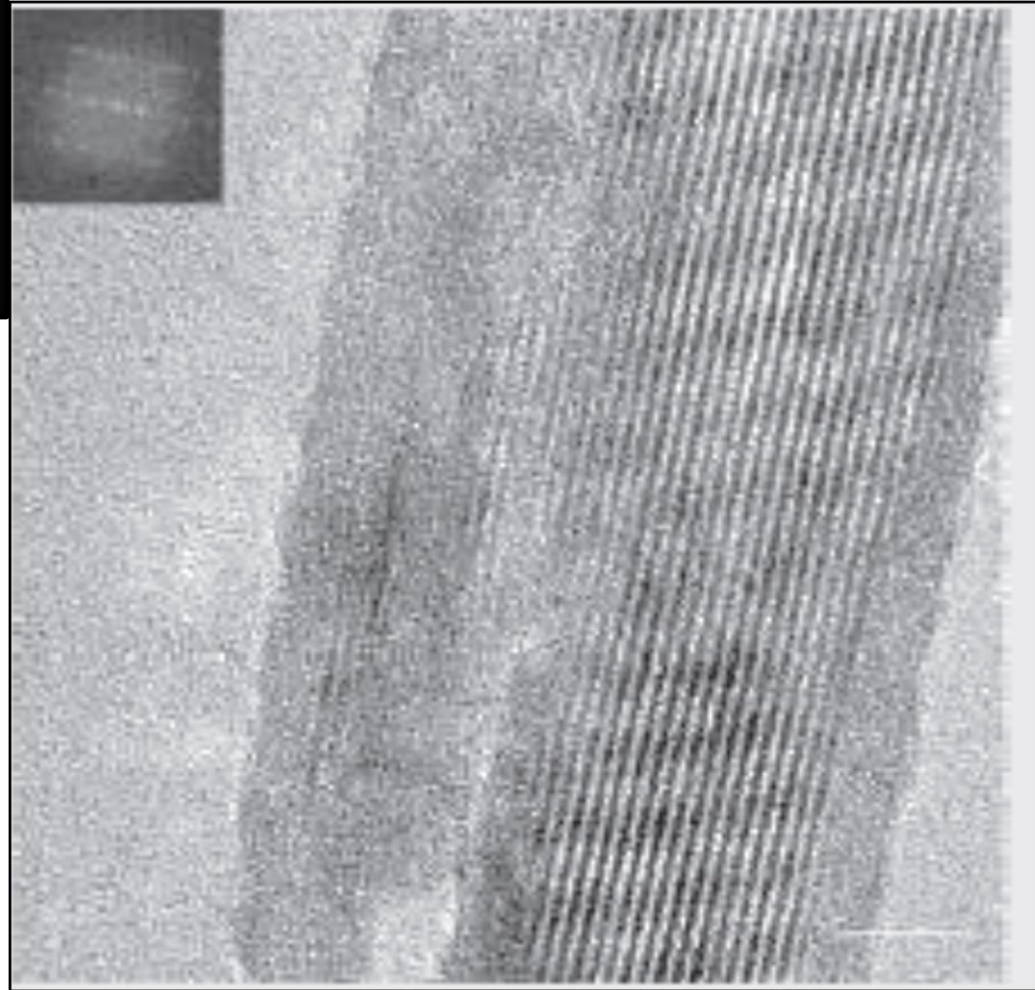
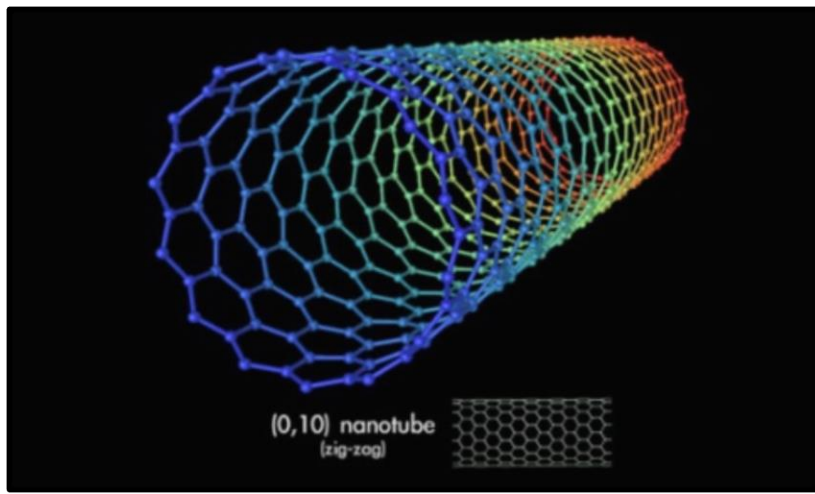


ARQUEOMETALURGIA



Figuras 4. Bandas de partículas de cementita (região escura) dentro de uma matriz ferrítica (região clara da figura).

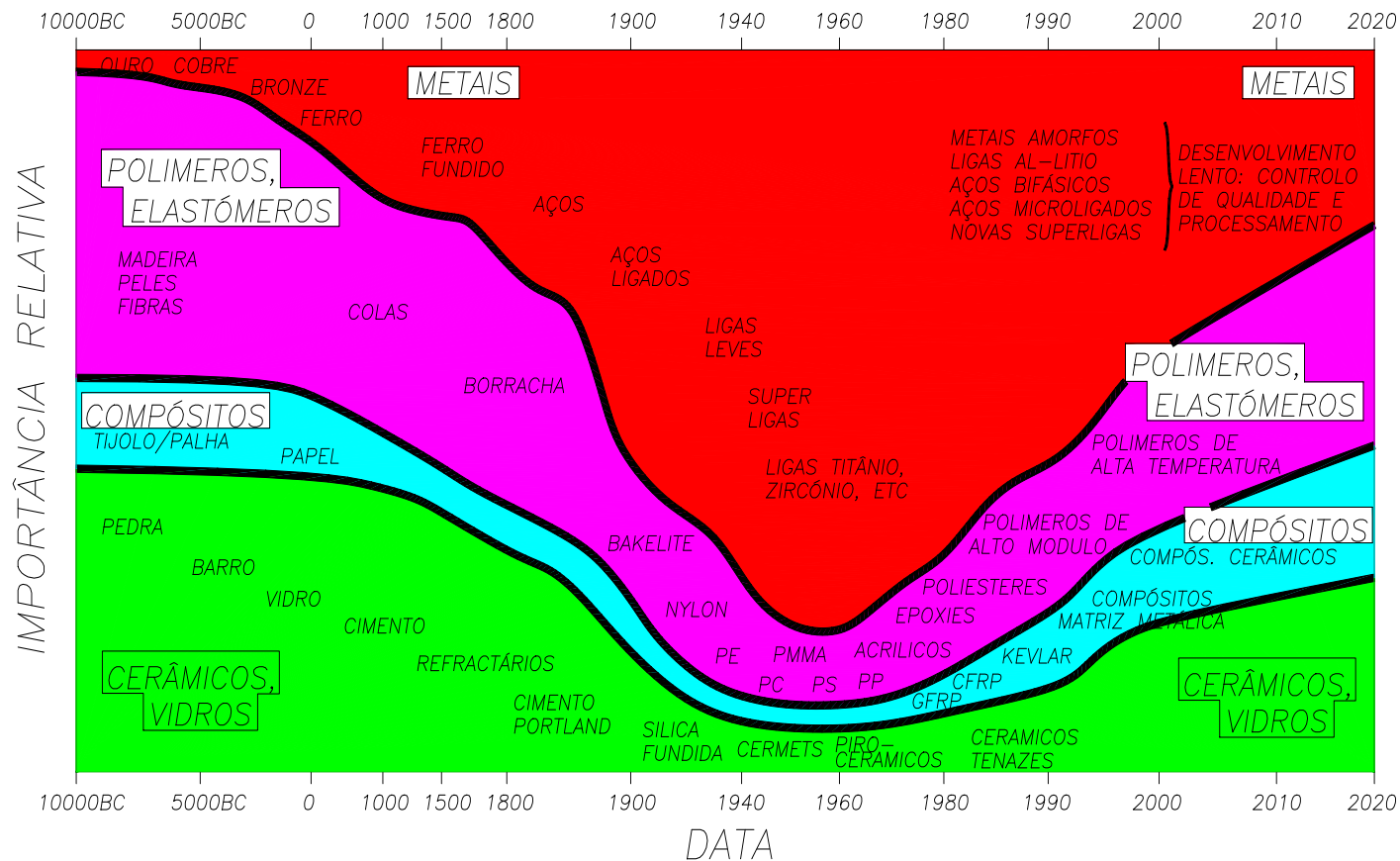
CARBONETOS ALINHADOS EM MATRIZ PERLÍTICA.



*“Remnants of
cementite
nanowires
encapsulated by
carbon
Nanotubes”*

Evolução dos Materiais de Engenharia

- Inicialmente, a história do Homem foi dividida em etapas denominada pelos materiais usados (idade da **pedra**, **bronze**, **ferro**).
- Não estamos na era de um único material, mas sim na **era de um imensa possibilidade deles**.



DIFERENTES MATERIAIS SÃO UTILIZADOS EM UM MESMO EQUIPAMENTO, CADA UM COM UMA PROPRIEDADE ESPECÍFICA!

Ponte rolante



**Ponte rolante em
fabricação-Ponte
panela**

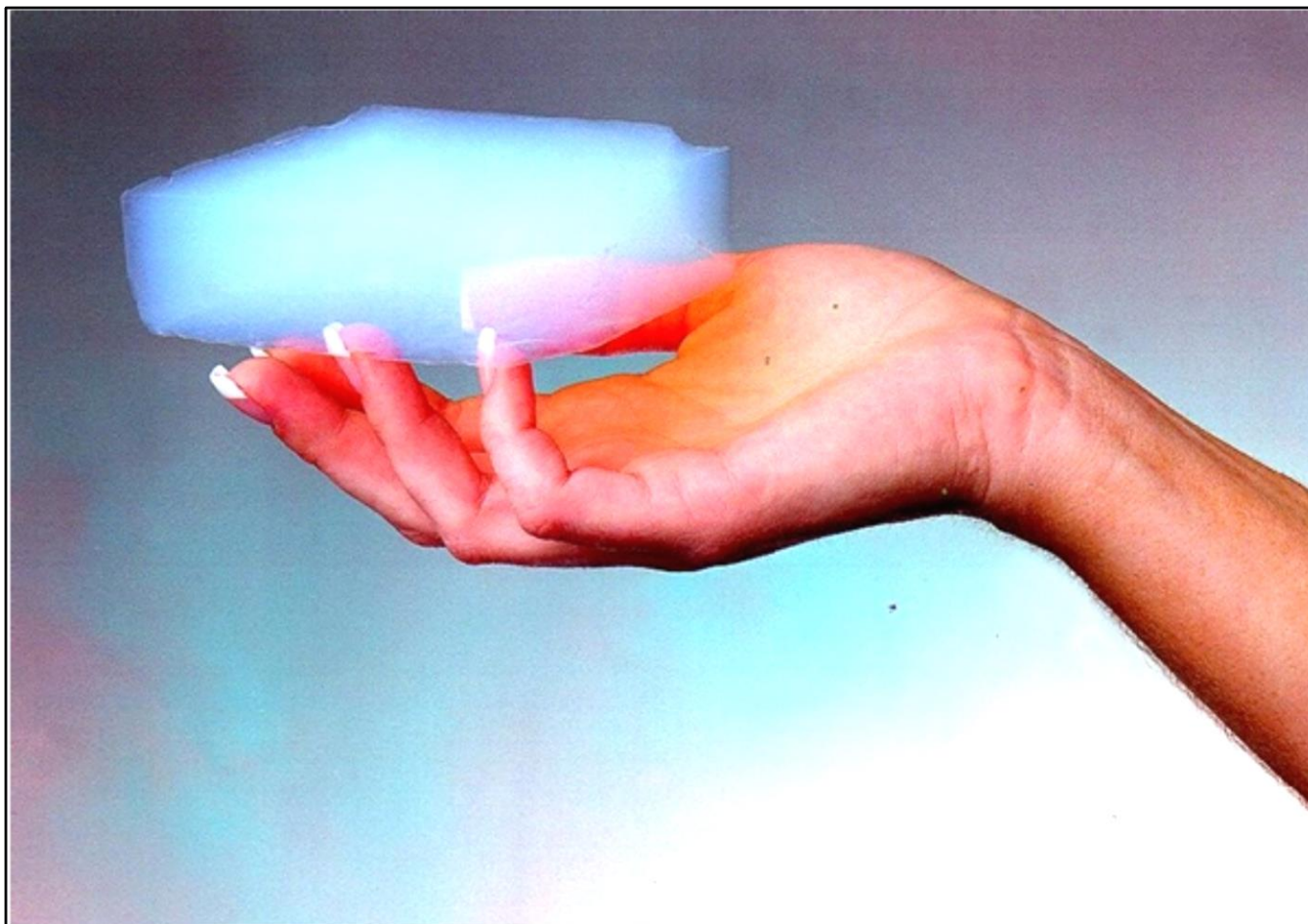
Empilhadora/recuperadora de minérios- Stacker/Reclaimer



Alguns reatores químicos e/ou petroquímicos: Parte interna e externa com diferentes materiais



MATERIAIS COM PROPRIEDADES ESPECIAIS



AEROGEL

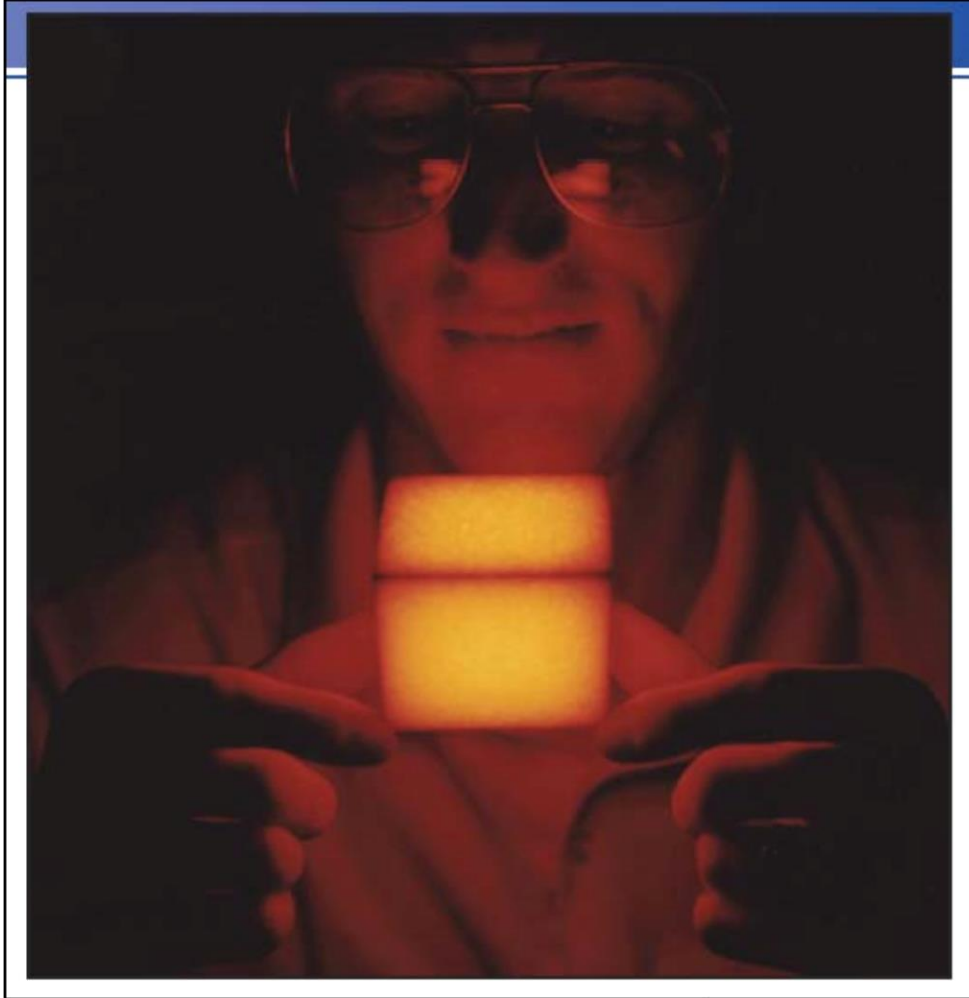


STARDUST-2004

•O aerogel foi criado por Steven Kistler, em 1931, como resultado de uma aposta com Charles Learned, para tentar substituir o líquido de gelatinas por gás, sem causar encolhimento.

•Trata-se de Sílica com 90% a 98% de ar. Processo complexo.

EXCELENTE ISOLANTE TÉRMICO



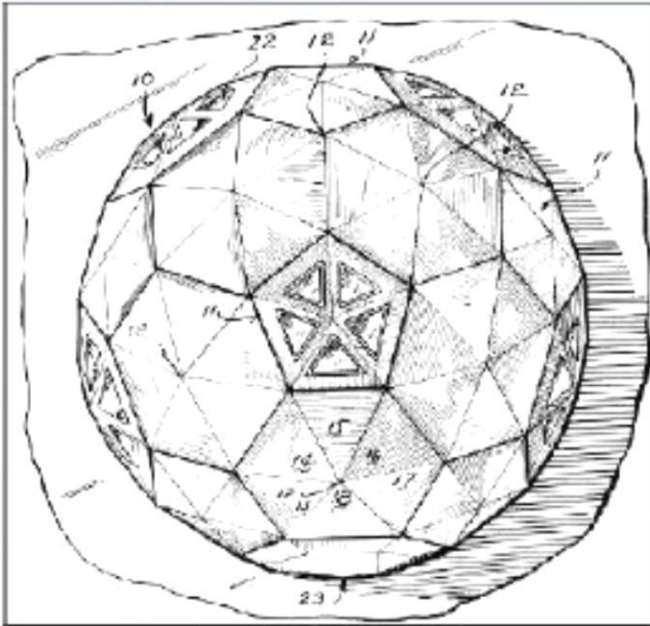
**PODERIA SER UTILIZADO EM OUTRAS APLICAÇÕES,
COMO ISOLANTE TÉRMICO.**

PROBLEMA ERA RESISTÊNCIA MECÂNICA.

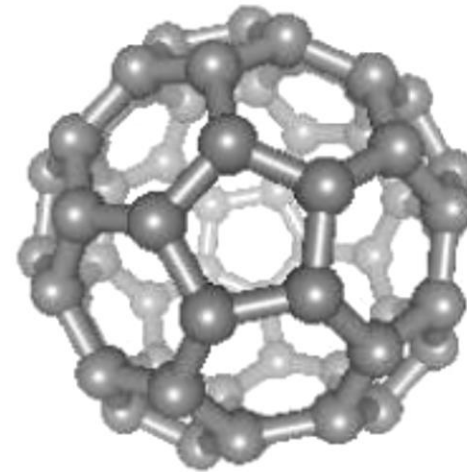
***SOLUÇÃO: INTRODUÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO
COM FULERENOS BUCKMINSTER.***

**RICHARD BUCKMINSTER FULLER-BUCKY(1895-1983)-ARQUITETO
PATENTOU A “CÚPULA GEODÉSICA”-DÉCADA DE 60.**

Cúpula geodésica



desenho da cúpula como
aparece na patente
(www.bfi.org)



HISTÓRIA

Harold Kroto descobriu os fulerenos:

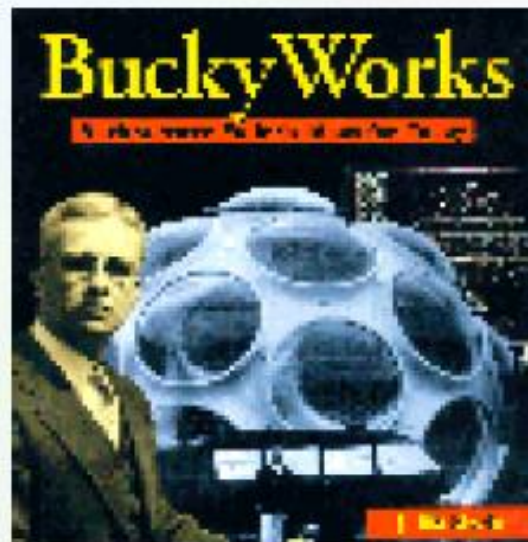


University of Sussex

e homenageou Richard Buckminster Fuller (de apelido Bucky) batizando as novas partículas de carbono de Buckminsterfullerene, ou buckyball

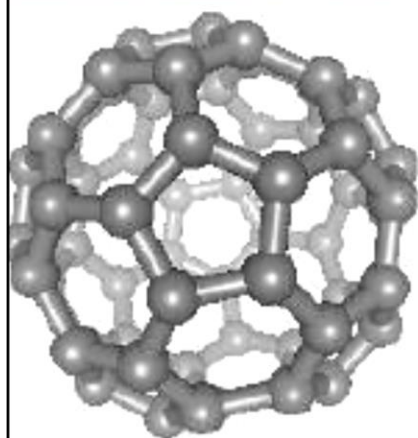
NATURE 318 (6042): 162-163, 1985

Prêmio Nobel de Química de 1996, em conjunto com Richard Smalley e Robert Curl

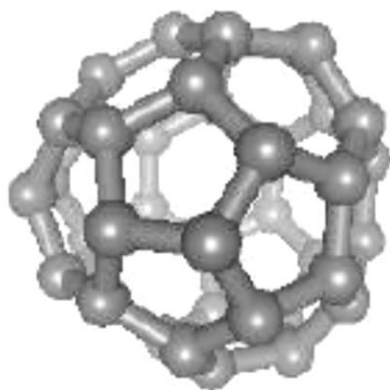


Fulerenos menores: 40 a 50 átomos de carbono

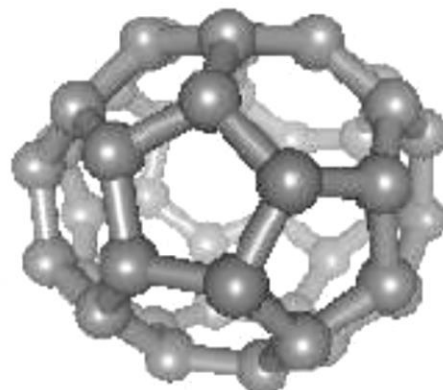
C_{60}



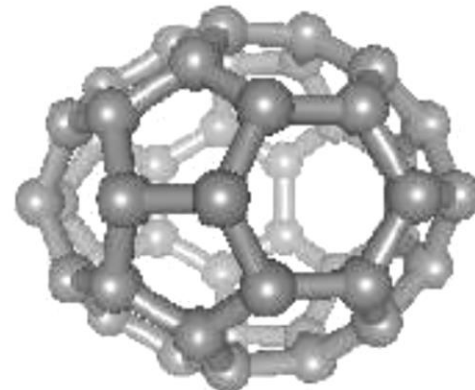
C_{40} [40]



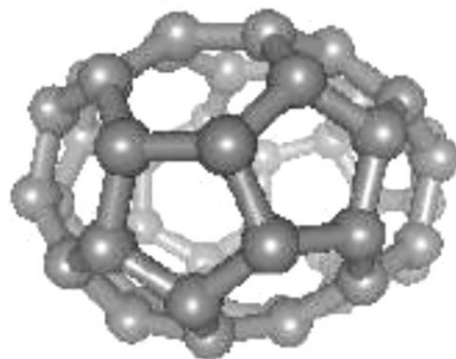
C_{42} [45]



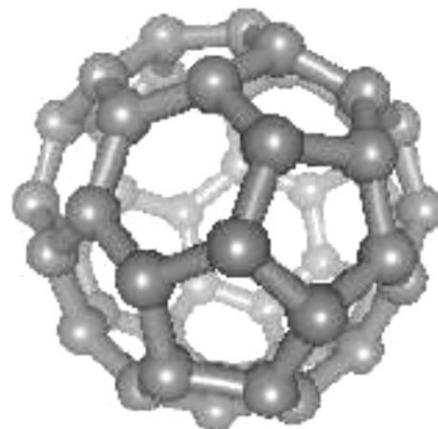
C_{44} [89]



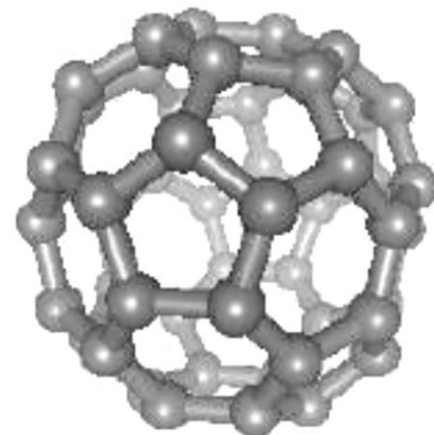
C_{46} [116]



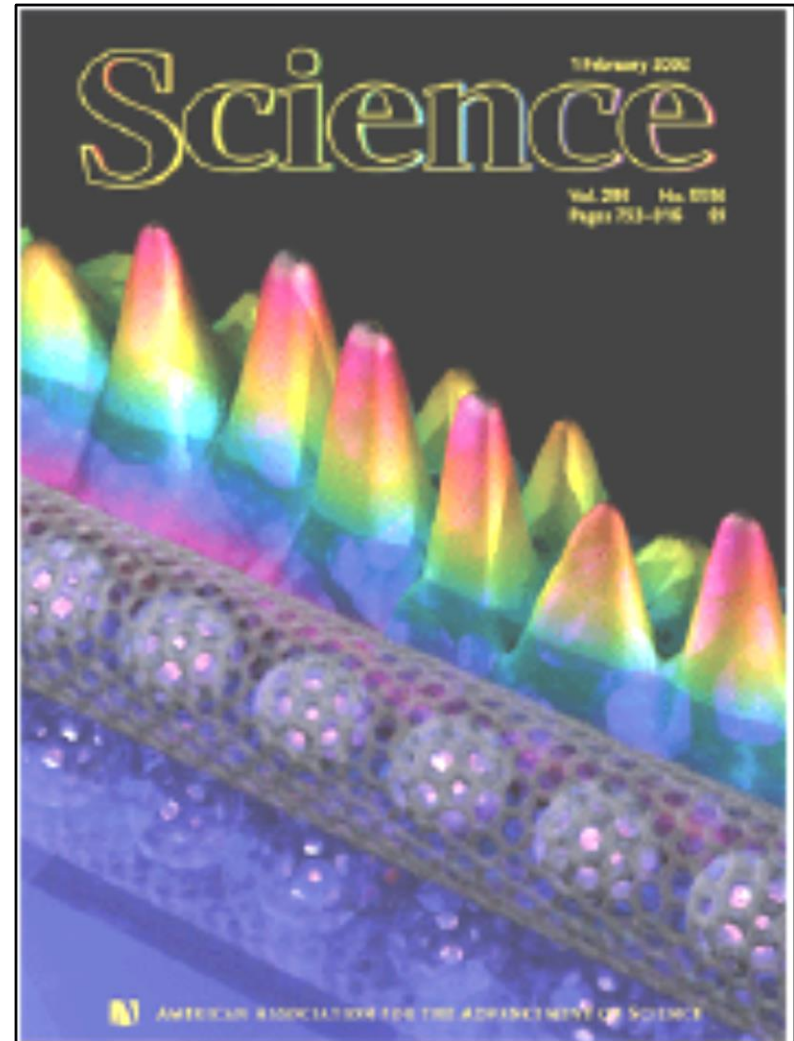
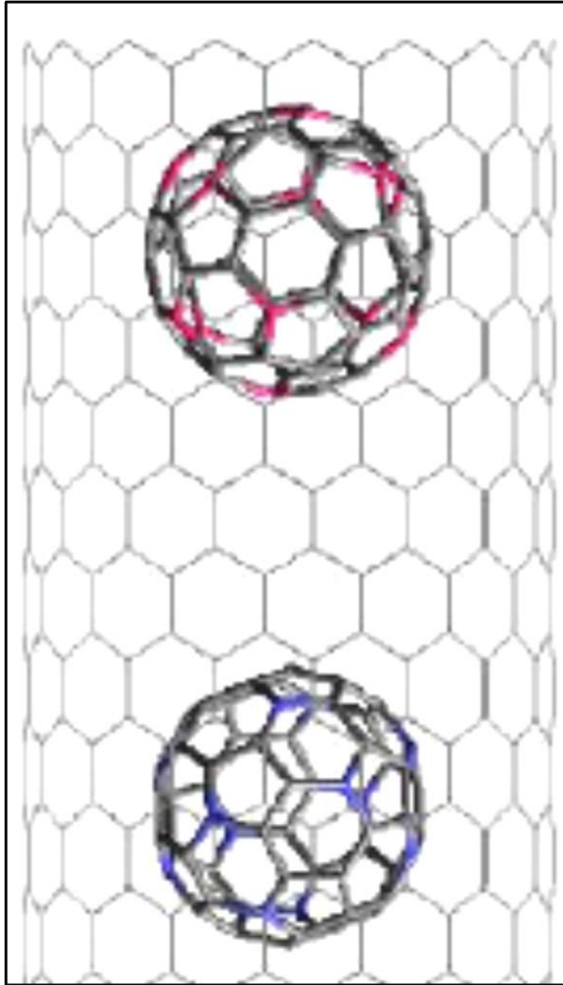
C_{48} [199]



C_{50} [271]



FULERENO + NANOTUBO DE CARBONO



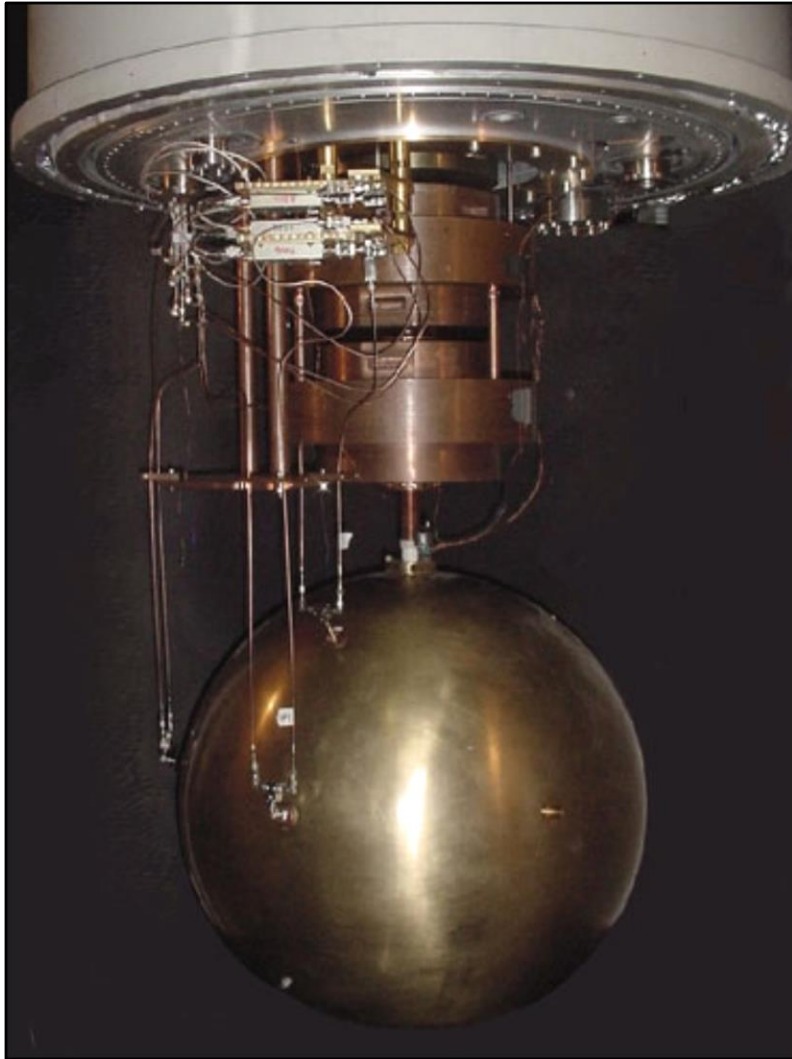
RESULTADO



APLICAÇÕES ISOLAÇÃO TÉRMICA NA INDÚSTRIA DE O&G



DETETOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SHÖEMBERG

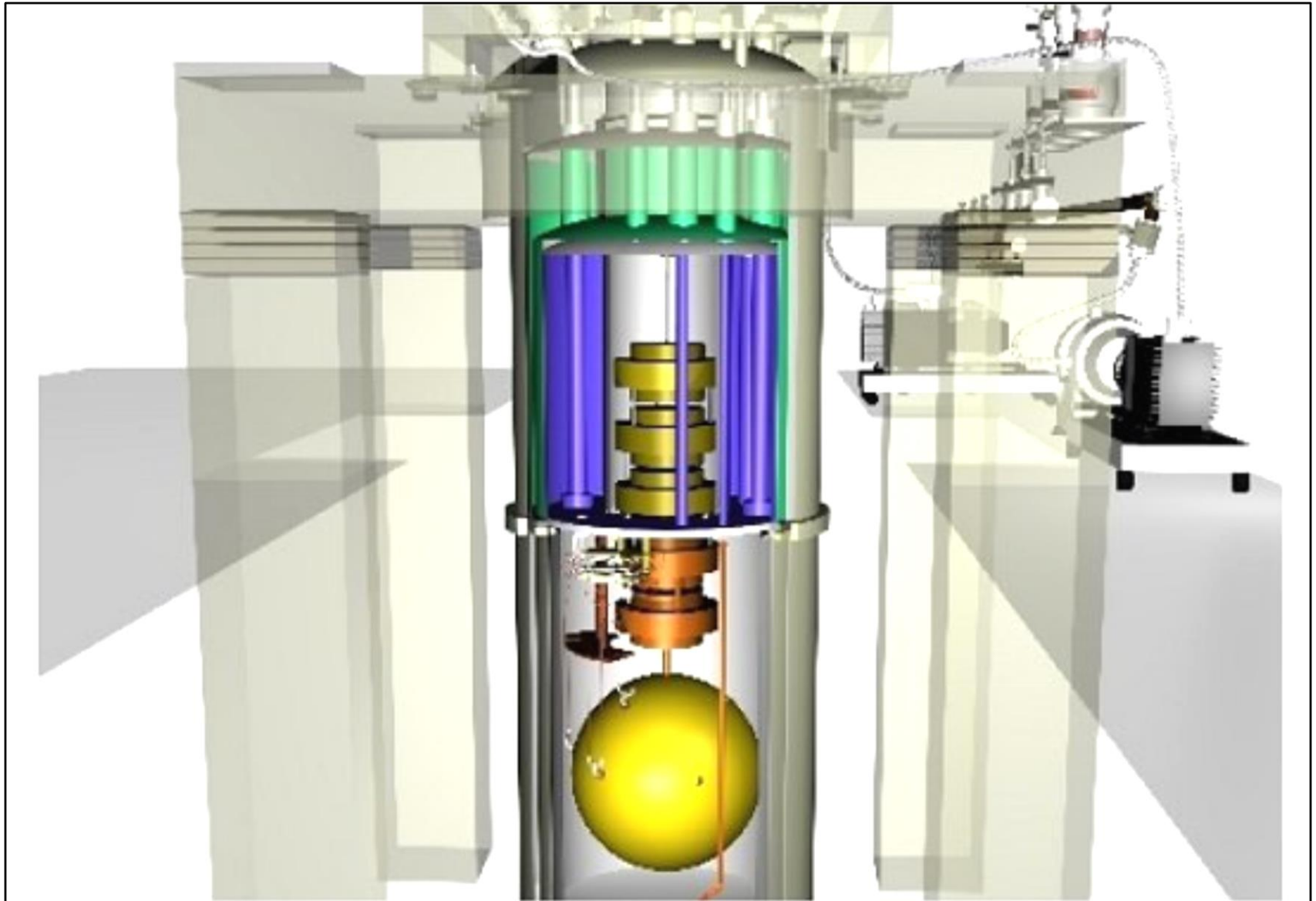


Uma esfera de CuAl(6%), com de
diâmetro, cerca de 1150 mm

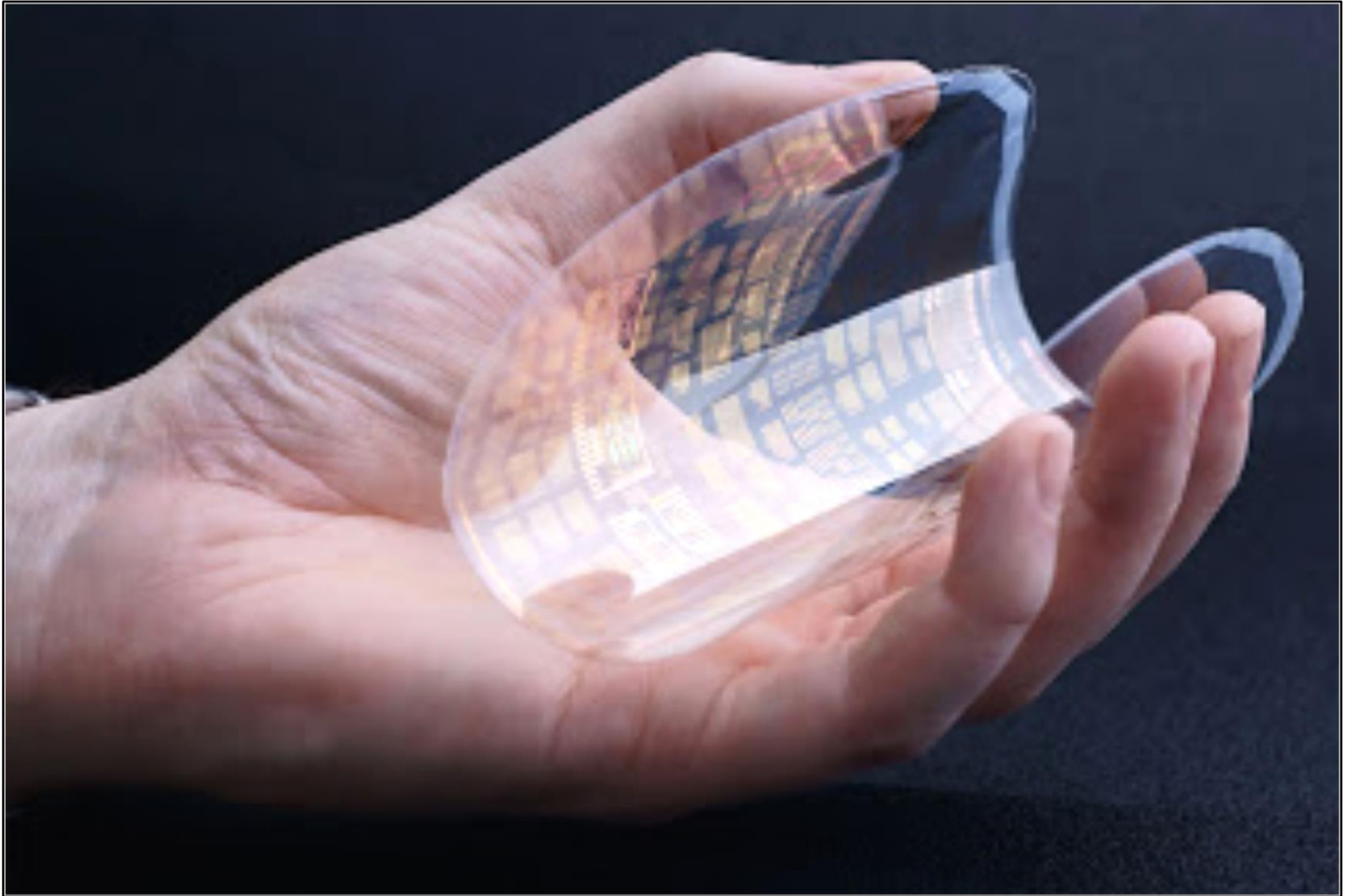


Liga especial-propriedades
especiais-Ensaio

DETETOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SHÖEMBERG- MATERIAIS COM PROPRIEDADES ESPECIAIS-ENSAIOS ESPECIAIS

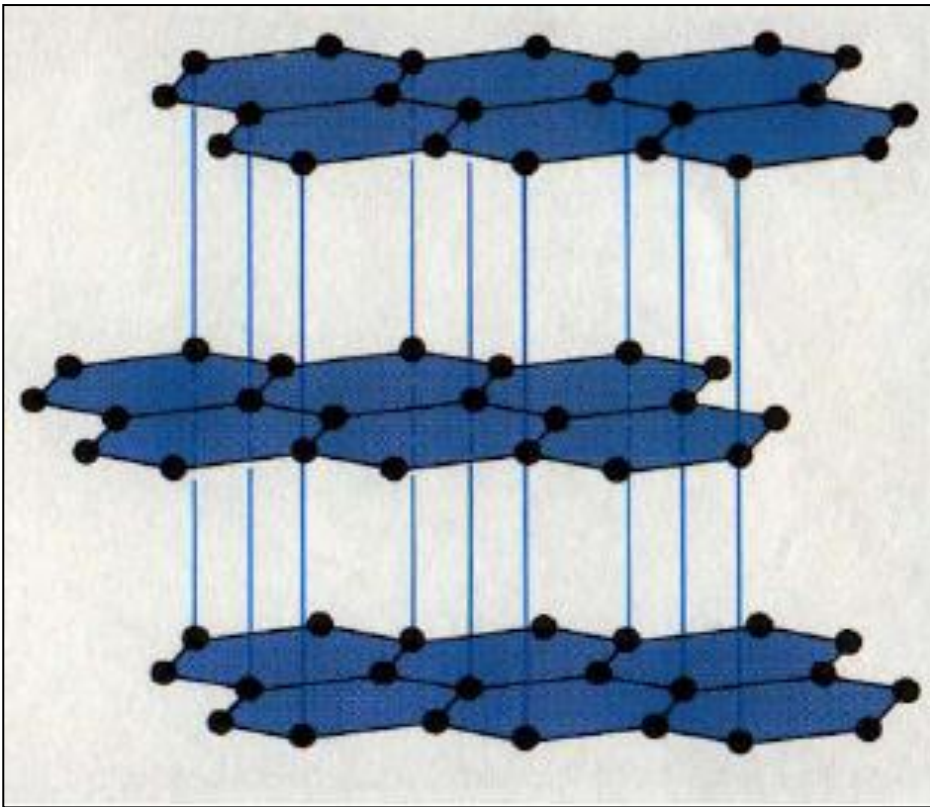


ESPECIAIS - GRAFENO



ESPECIAIS - GRAFENO

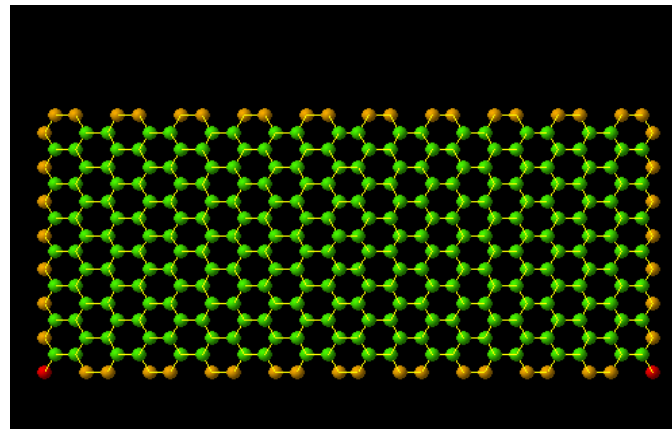
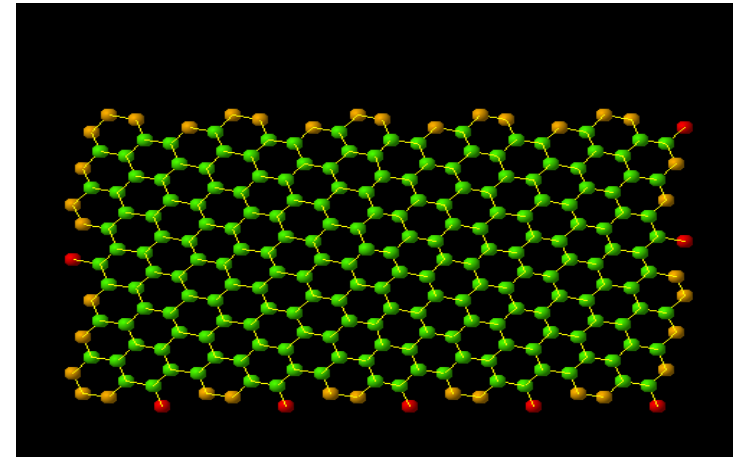
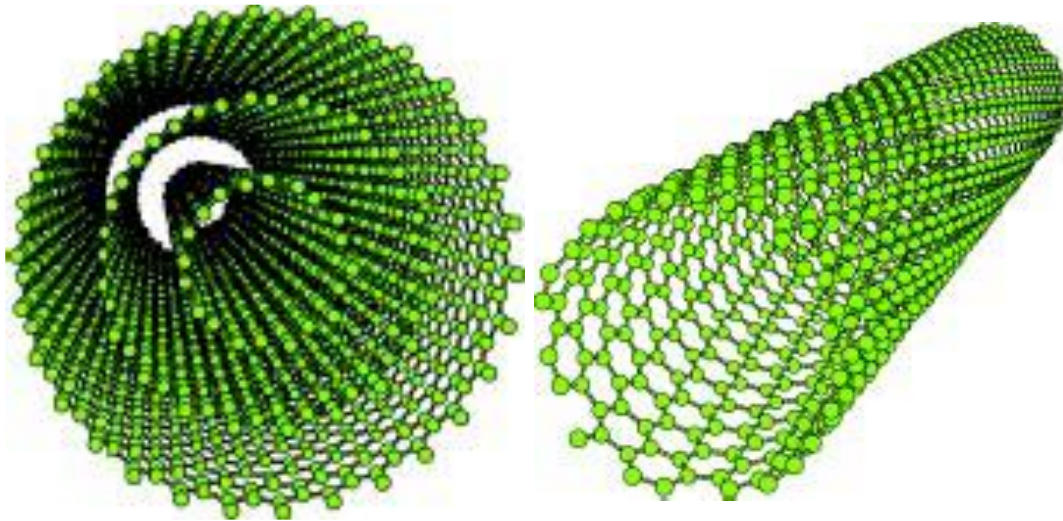
Grafite



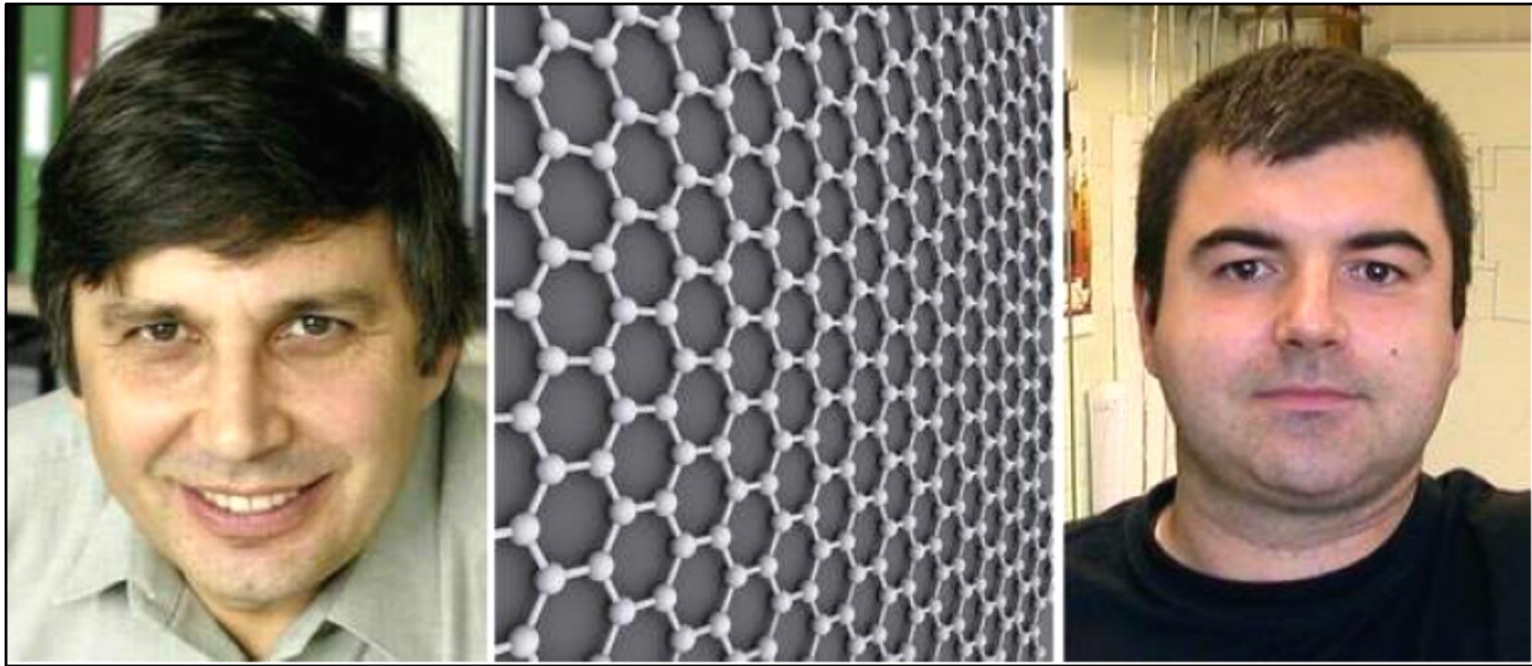
ESPECIAIS - GRAFENO

Descoberta dos Nanotubos de Carbono, 1991

1993, foi demonstrada a existência de nanotubos de única camada



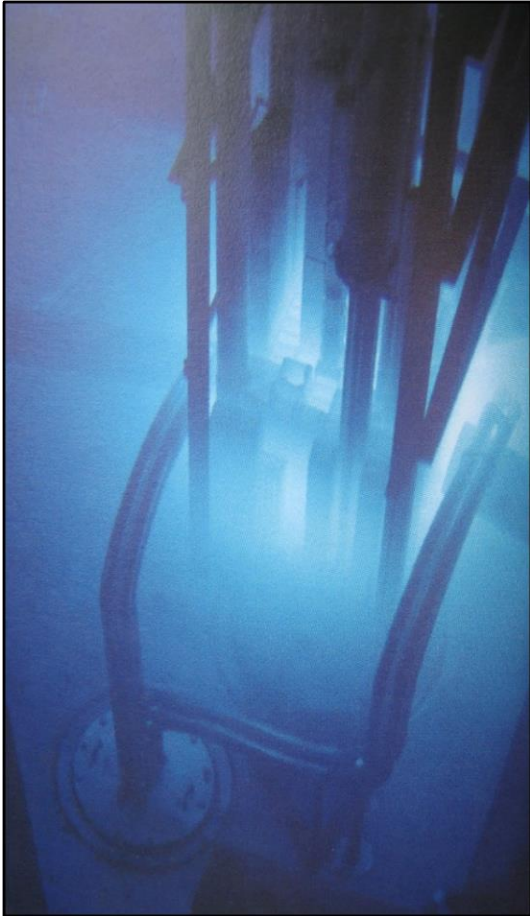
GRAFENO



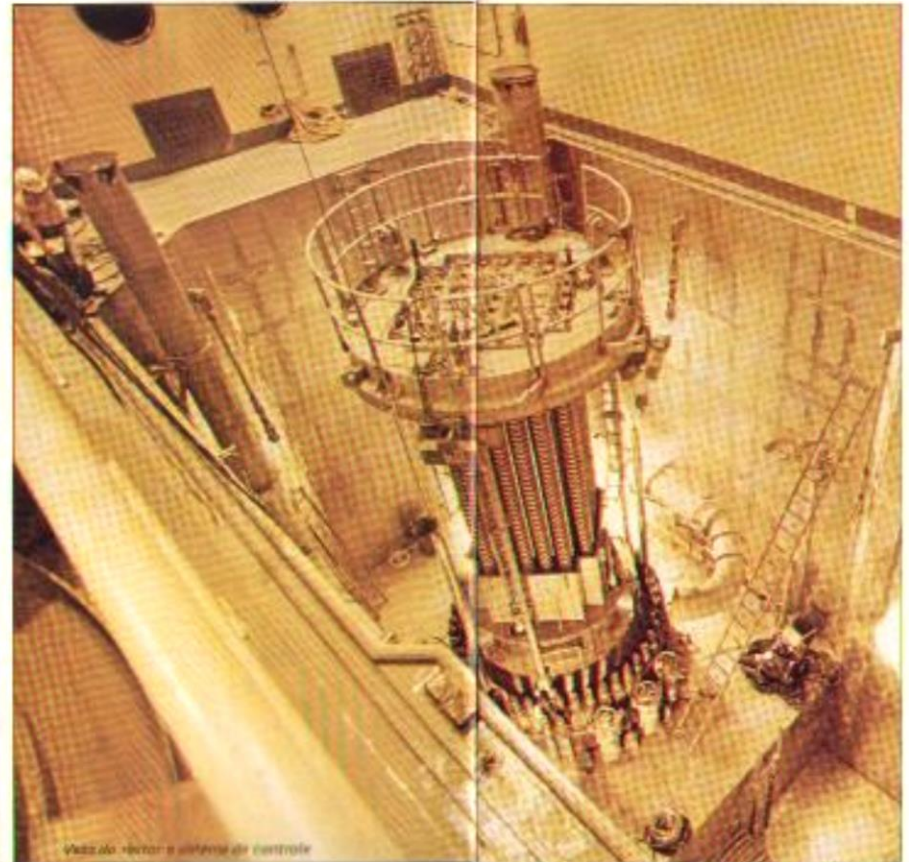
Prêmio Nobel – Física 2010
Grafeno

Andrei Geim e Konstantin Novoselov, da Universidade de Manchester, Inglaterra,

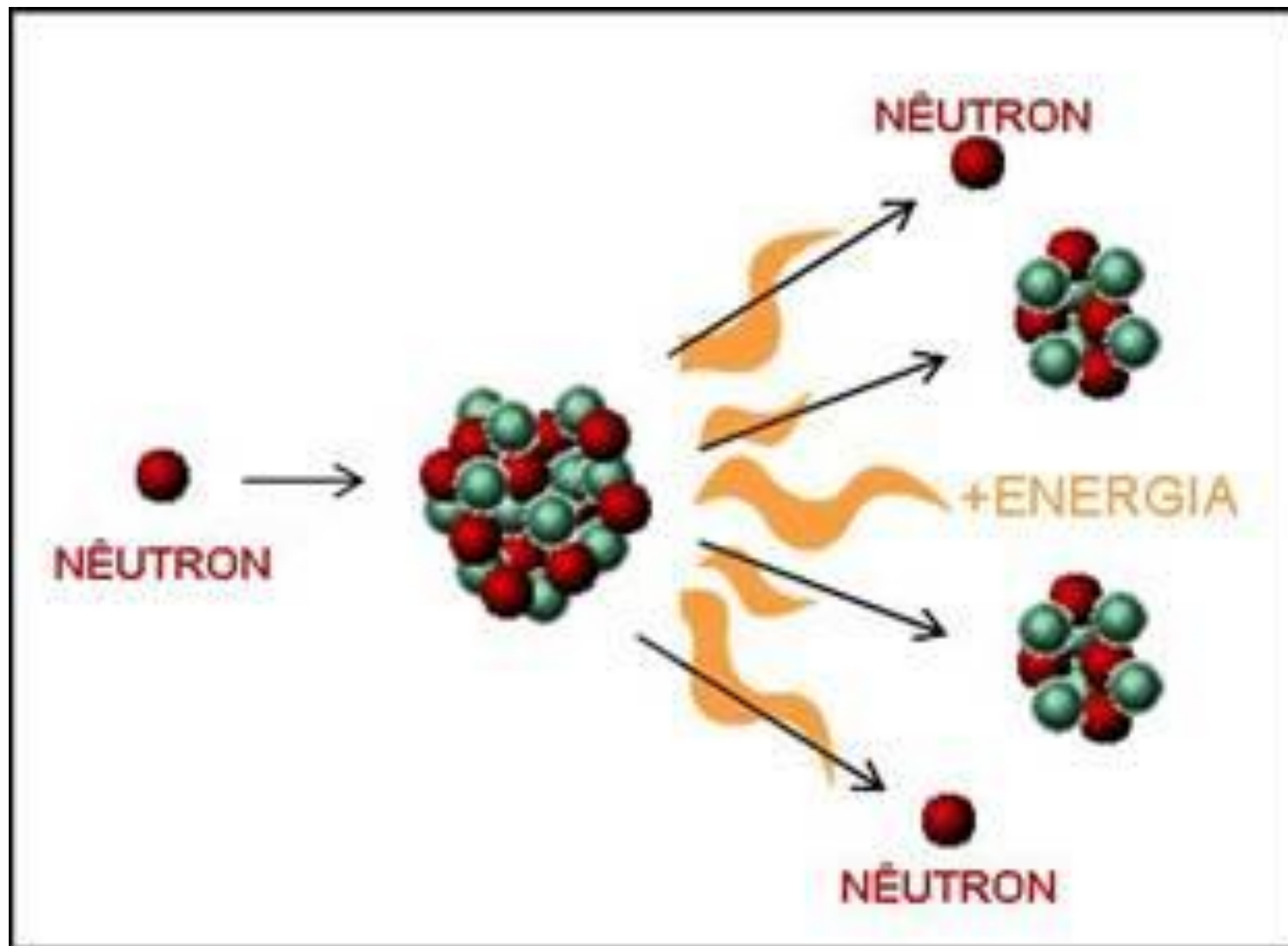
MATERIAIS PARA REATORES NUCLEARES
PROPRIEDADES ESPECIAIS: RESISTÊNCIA DANOS POR RADIAÇÃO,
RESIST. MECÂNICA EM TEMP. MAIS ALTAS



IPEN



NUCLEO DO REATOR DE ANGRA
VARETAS DE ZIRCALOY 4



NOVOS MATERIAIS - ligas ferrítico martensíticas endurecidas por dispersão de óxidos e denominadas ODS EUROFER para uso estrutural

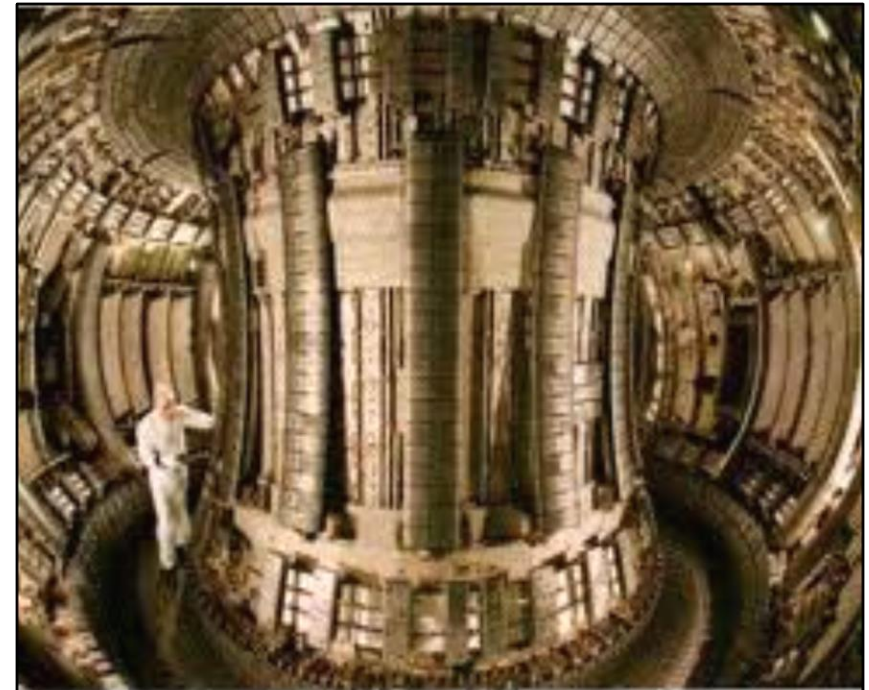
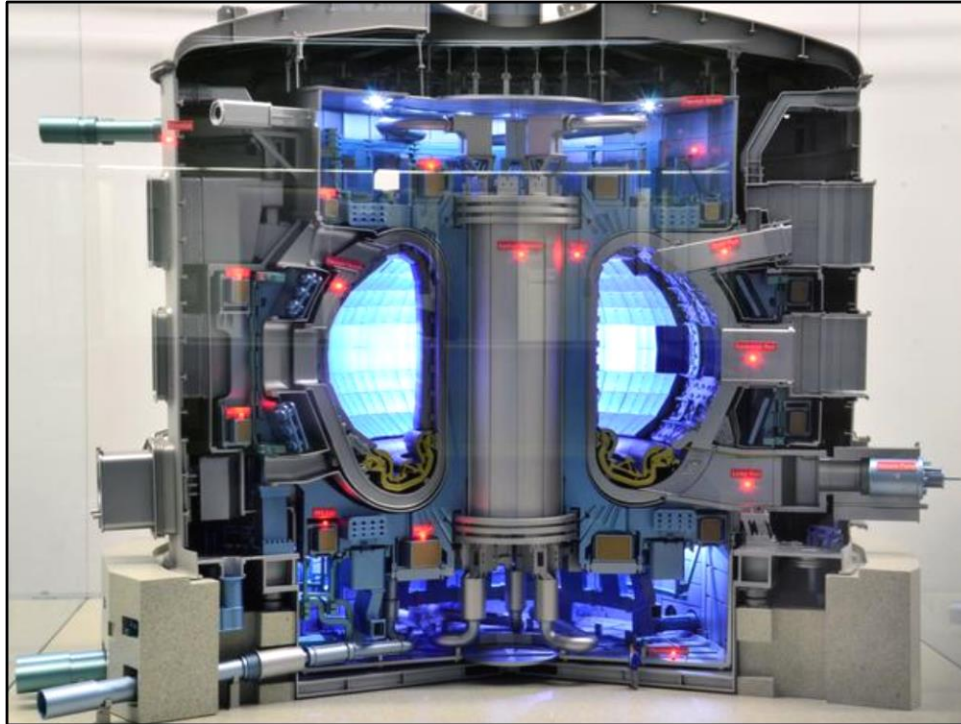


Figura 9 - Vista do interior de um Tokamak – o mais bem sucedido mecanismo para confinar plasma a altas temperaturas.

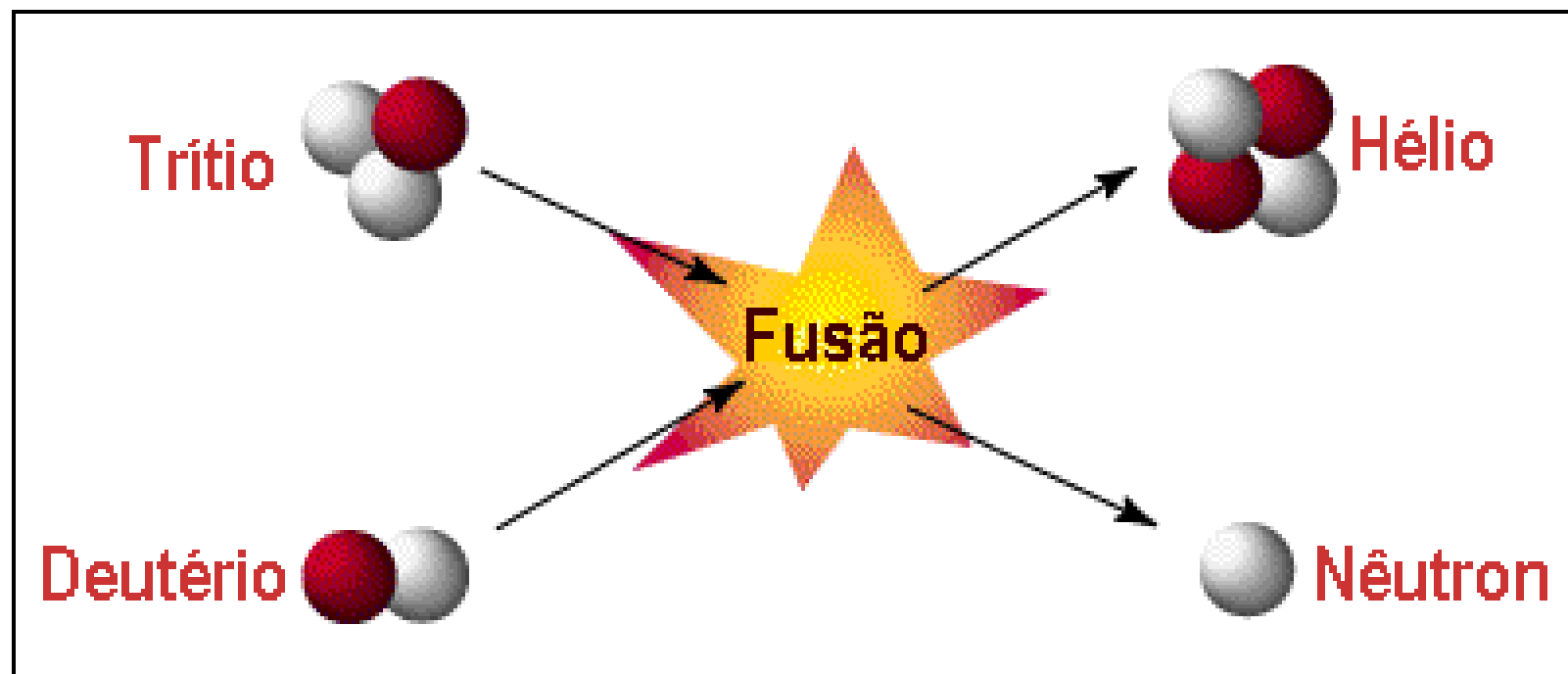
ARTIGO DO PROF. HUGO SANDIM-EEL

Prof. Dr. José Benedito Marcomini



Temperatura superfície
central

5785 K
 1.5×10^7 K





**LIGAS “SHAPE MEMORY”-
Ni-Ti E OUTROS.
MATERIAIS ESPECIAIS PARA
SATÉLITES**

EXPERIMENTO

LIGAS “SHAPE MEMORY” Ni-Ti TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/memory.movies.html>



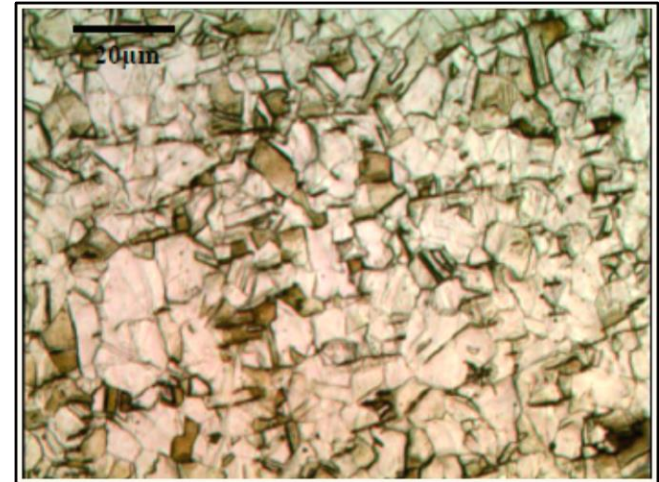
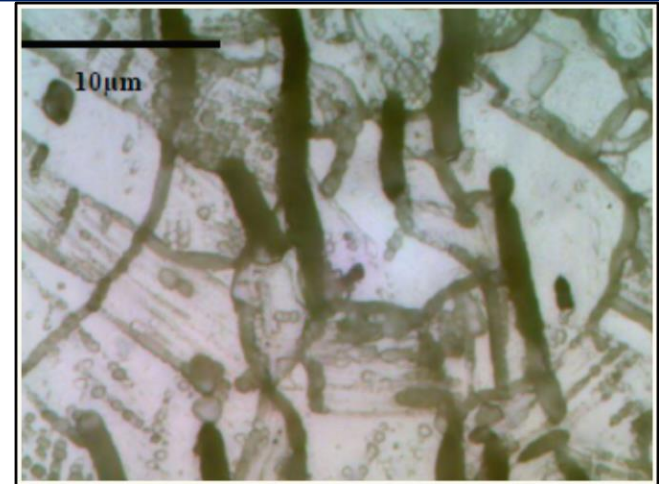
SUPERELASTICIDADE



APLICAÇÃO – ASA ADAPTÁVEL LIGAS “SHAPE MEMORY” Ni-Ti SUPERELASTICIDADE

<http://www.smaterial.com/SMA/sma.html>

**AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 316L- FILTROS DE ÁGUA DO MAR
RESISTÊNCIA À CORROSÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA/IMPACTO EM
BAIXA TEMPERATURA**



**MARCOMINI, J.B. & DEL REY, V.-TRABALHO
SOBRE EFEITO DA CONFORMAÇÃO A FRIO
NA SENSITIZAÇÃO**

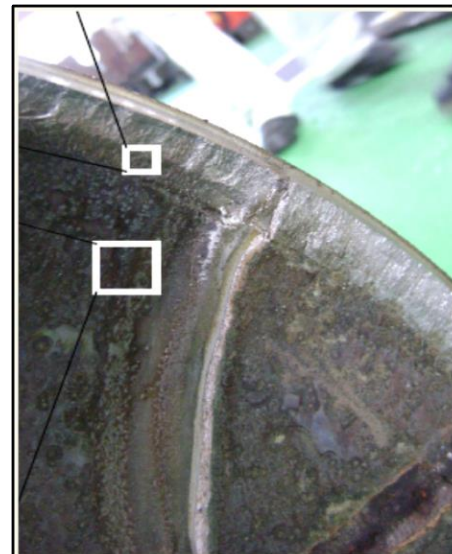
CAMADAS COM PROPRIEDADES ESPECIAIS: RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM ALTA TEMPERATURA, ETC.

REVESTIMENTO DE CILINDRO POR SOLDAGEM, COM LIGA ESPECIAL.

**MATERIAL BASE
AÇO AISI 4340**

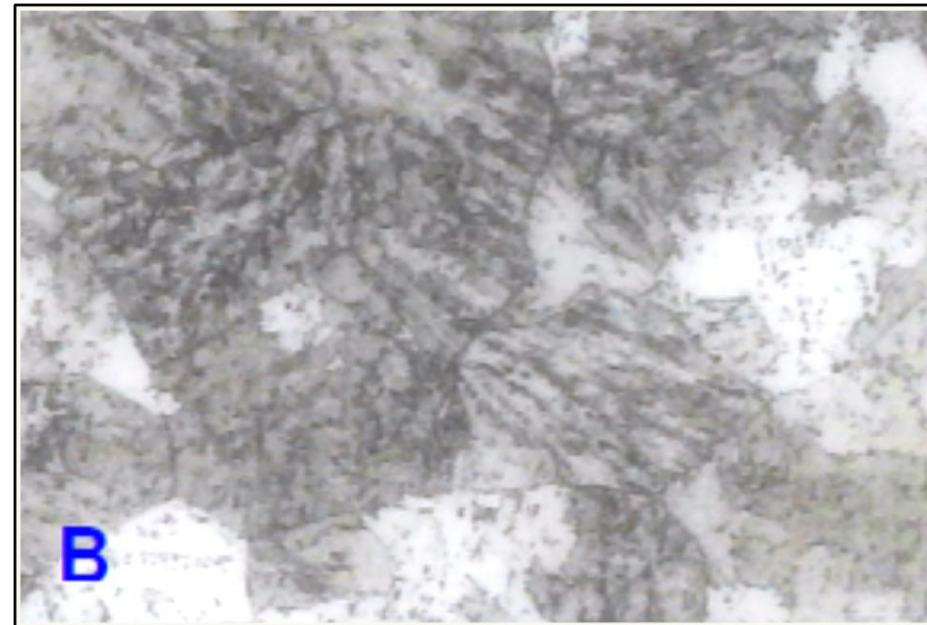
**MARCOMINI, J.B.
ANÁLISE DE FALHAS**

MELTING
LINE



**CILINDRO
“CASTER” PARA
ALUMÍNIO.**

VÁRIOS ENSAIOS COM CAMADAS SOLDADAS



**CURVAS DE EQUIPAMENTO
PETROQUÍMICO, FABRICADA COM
AÇO ASTM A 387 GR.11, CL.2-
1,25Cr-0,5Mo.**

**MARCOMINI, J.B.- ANÁLISE DE
FALHAS**

**OS ENSAIOS MECÂNICOS MEDEM AS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS
MATERIAIS.**

Uma possível definição:

“Os ensaios mecânicos são aqueles em que se aplicam forças, momentos, deslocamentos ou outros estímulos a um sistema mecânico ou amostra de material, medindo-se a resposta apresentada.”

Projetos estão relacionados às **propriedades**, determinadas por meio de **ensaios**.

Ex: **projeto estrutural** (ou seja, componentes que devem **suportar esforços**): **propriedades mecânicas** dos materiais como **rigidez elástica**, a **capacidade de deformação plástica**, a **resistência à fratura**, além da **resposta a carregamentos cíclicos** - **são determinados por ensaios mecânicos**.



Figura 1.1 Visão esquemática dos diferentes setores ligados aos ensaios mecânicos.

FIM