



# Pesquisa e Desenvolvimento em Terras-Raras na UFF- Volta Redonda

Marcos Flavio de Campos, Professor

**Universidade Federal Fluminense,**

**Volta Redonda RJ**

**Apoio: CNPq, FAPERJ**



# Pesquisa e Desenvolvimento em Terras-Raras na UFF- Volta Redonda

## RESUMO

Nesta palestra será feita uma breve descrição das atividades em pesquisa e desenvolvimento sobre terras raras , especialmente em ímãs contendo terras raras (NdFeB, SmCo) na UFF em Volta Redonda, no estado do Rio de Janeiro.

Essas atividades incluem:

### **-Análise Econômica**

- Modelo de redução de terras-raras a partir de óxidos
- Modelos sobre relação microestrutura-propriedades magnéticas de ímãs de terras raras
- Caracterização magnética de ímãs de terras raras em ensaios com altos campos (até 4 Tesla)
- Caracterização microestrutural de ligas com terras raras por difração de raios-X - análise Rietveld
- Cálculos de curvas de histerese de ímãs de terras-raras

# Importância dos Modelos Matemáticos

**Modelamento – rápido e barato:  
Excelente alternativa no  
Aperfeiçoamento de processos**

**Relação Estrutura Propriedades de ímãs  
Modelo para redução de óxidos terras-raras em metais**

**Infra-estrutura na UFF em Volta Redonda:  
Medidas Magnéticas – Histeresígrafo Globalmag  
Difração de Raios-X  
Microscopia Eletrônica - MEV**

# Publicações Recentes - últimos 5 anos

SA Romero, D Rodrigues Jr, T Germano, R Cohen, JA de Castro, MF de Campos. Coercivity mechanisms in nanocrystalline Sm-Co-Cu thin films: the spring effect. APPLIED NANOSCIENCE, v. 13, p. 6353-6372, 2023.

MF de Campos, SA Romero, JA de Castro . Estimation of texture and anisotropy field in a NdDyFeCoB magnet by magnetic measurements at the perpendicular direction. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, v. 564, p. 170119, 2022.

MF de Campos, JA de Castro . Calculation of Recoil Curves in Isotropic and Anisotropic Stoner-Wohlfarth Materials. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, v. 56, p. 1-4, 2020.

SA Romero, AJ Moreira, FJG Landgraf, MF de Campos. Abnormal coercivity behavior and magnetostatic coupling in SmCoCuFeZr Magnets. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, v. 514, p. 167147, 2020.

MF de Campos. Modelo para prever evolução do preço de commodities minerais com o tempo: aplicação para o preço das terras-raras / model for predicting mineral commodity price evolution over time: application to the price of rare earths. BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT, v. 6, p. 69365-69377, 2020.

MF de Campos, JA de Castro. An Overview on Nucleation Theories and Models. JOURNAL OF RARE EARTHS, v. 37, p. 1015-1022, 2019.

MF de Campos, JA de Castro. Predicting Recoil Curves in Stoner-Wohlfarth Anisotropic Magnets. ACTA PHYSICA POLONICA A, v. 136, p. 737-739, 2019.

Palestra no CETEM em 2015:

<https://www.cetem.gov.br/antigo/images/palestras/2015/iisbtr/10-marcos-flavio.pdf>

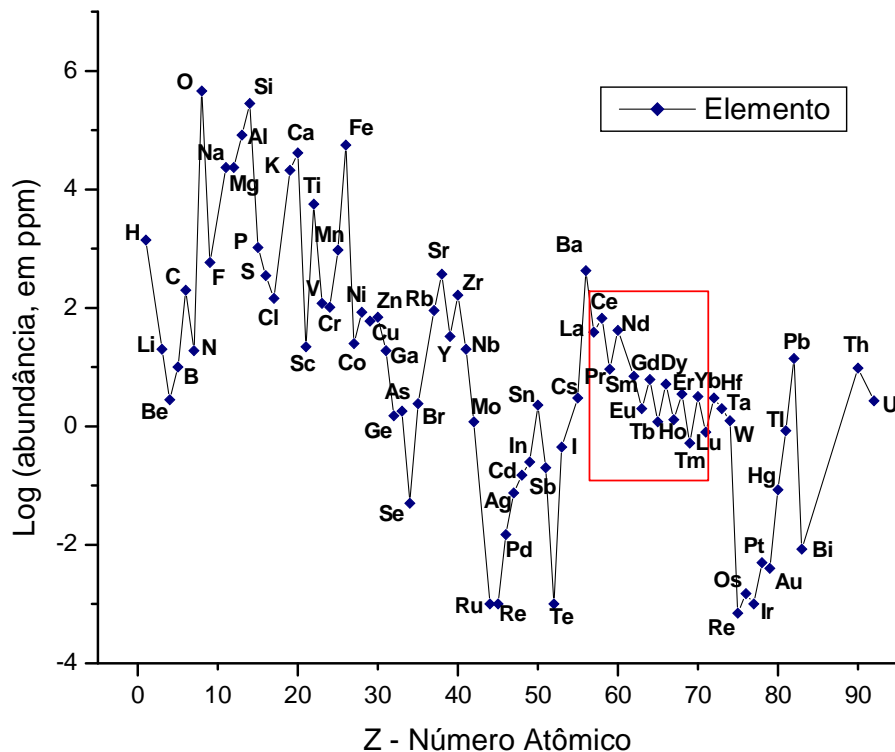
# ORIGEM DO NOME “TERRA”

Nome “terra” no século XVIII indicava  
Resíduo após calcinação em altas temperaturas

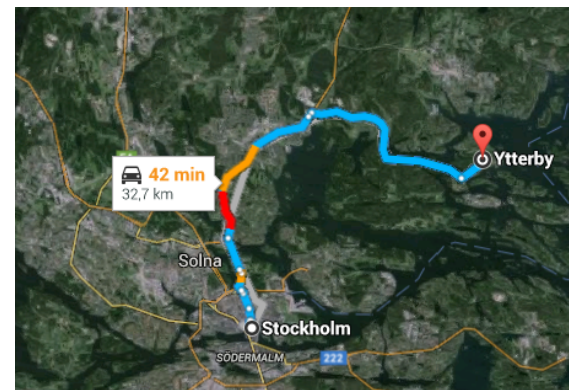
“There is a general tendency in chemistry to go on using words, though the underlying theoretical concepts show a gradual or sudden change. **An earth was at one time the residue obtained by calcination at high temperature.** This word should not be confused with calx, the material to which addition of phlogiston would restore the free metal. The most typical earth was perhaps (more or less pure) silica, but at the time of Lavoisier this material was classified as silicic acid, and there was a tendency to stress the acidic character of hydroxides of newer elements, such as titanous, niobous, molybdous, tantalous and tungstous acids. **Just before 1800, an earth had come to mean an oxide that cannot be reduced at red heat either by hydrogen or carbon,** and is not classified as an acid like silica. Alumina was by far the most common earth, though Lavoisier introduced the concept of alkaline-earths, considering magnesia, lime, strontia and baryta as oxides of highly reactive metals”  
*Jørgensen, C. K. (1988). Chapter 75 Influence of rare earths on chemical understanding and classification. Two-Hundred-Year Impact of Rare Earths on Science, 197–292. doi:10.1016/s0168-1273(88)11007-6*

# O que são as Terras Raras?

Algumas terras raras são abundantes (Ce, La, Nd) e outras são mais escassas (Eu, Tb)



Origem do nome "terra-raras":  
Mais de 200 anos atrás,  
O minério contendo aquela  
"terra" era "raro" na Europa,  
porém era encontrado na Suécia



Ytterby é a origem dos  
nomes Y, Tb, Er, Yb

Sc (N.A.=21), Y (N.A.=39) e a série dos Lantanídeos La (N.A. 57), Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu (N.A. 71).

Elementos com número atômico ímpar são menos abundantes (regra de Oddo-Harkins)

# O que são as Terras Raras?

O minério onde as terras raras foram originalmente encontradas era raro. Esse minério foi encontrado na Suécia, na vila de Ytterby por Carl Arrhenius em 1787. Esse raro minério de Ytterby foi chamado Gadolinita ou Ytterbita. É um silicato  $(Ce,La,Nd,Y)_2FeBe_2Si_2O_{10}$  encontrado apenas em alguns locais do mundo, por exemplo Suécia, Noruega, Texas e Colorado, nos Estados Unidos.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Gadolinite>

Na Europa, as terras raras são relativamente raras, sendo encontradas na Escandinávia principalmente. O minério mais comum de terras raras, a monazita, ocorre praticamente no mundo todo, e é facilmente encontrado em praias no Brasil, nos Estados Unidos (Flórida e Geórgia), na Índia, na África do Sul, na Malásia, em Madagascar, no Sri Lanka, no Vietnam e na Austrália.

A monazita é um fosfato de composição  $(TR)PO_4$  onde TR=Terra-Rara  
<https://mrdata.usgs.gov/ree/ree.php?mineral=monazite>

**P. Miskowiec**, *Foundations of Chemistry* (2022) 25:29–51:

“In the years after Antoine Lavoisier had questioned the phlogiston theory and developed the new chemistry based on the concept of the so called “earths”, that could be reduced to their elements, the discovery and description of a “new earth” was regarded as equivalent to discovering the element within.”

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10698-022-09448-5>

# Aplicações de Terras-Raras

Aplicações	Terra Rara
<b>Ímãs</b>	<b>Nd, Pr, Dy, Tb, Ho, Gd, Sm, Ce, La</b>
Fósforos luminescentes	Eu, Tb, Y, Ce, La, Gd
Catálise	La, Ce
Polimento de vidro	Ce
Lasers, fibras ópticas	Y, Er, Nd, Pr, Yb
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :TR (Yttrium-Aluminum-Garnet) dopado com Terra-Rara - Garnet=Granada (Er, Nd) YVO <sub>4</sub> : TR (Yttrium Orthovanadate) dopado com Terra-Rara (Yb)	Lu, Ho, Tm
Coloração de vidro Nd (púrpura-azul), Pr (verde), Er (rosa), <b>Ce (amarelo, com Ti)</b> , Ho (amarelo-vermelho)	Nd, Pr, Er, Ce, Ho
Dispositivos para visão noturna	La
Ferro fundido	Mischmetal
Zircônia estabilizada ZrO <sub>2</sub> com (até 8%) Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> or CeO <sub>2</sub>	Y, Ce
Fitas supercondutoras (RE)Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub>	Y, Gd, Sm, Dy
Ligas Magnetostrictivas Terfenol D Tb <sub>x</sub> Dy <sub>1-x</sub> Fe <sub>2</sub> (x ~ 0.3)	Tb, Dy
Baterias Ni-M-H, onde M=TR TR-MT <sub>5</sub> , MT=Metal de Transição (Ni) LiFeYPO <sub>4</sub>	La, mischmetal Y
Corantes não-tóxicos (sulfetos)	Ce

# Preços de óxidos de Terras-raras (US\$/kg)

Fósforos luminescentes, lasers, usam óxidos, com pureza de 99.99% (4 "noves"),  
Ímãs usam metais com 99% pureza (2 "noves")

Cadeia Complexa: minério-> separação de terras-raras-> metal terra-rara reduzido-> Ímã

Pode ser lucrativo se o lucro em uma etapa cobrir os prejuízos de outras etapas

Oxide	May/ 2018	Dec /2020	May /2021	Aug /2023	Nov /2023
Tb oxide > 99.99%	470	1025	1256	1001	1117
Dy oxide > 99.9%	185	295	393	323	368
Pr oxide > 99.5%	68	58.5	82.8	67	73
Ho oxide > 99.5%	66	89.9	127	76.7	80
Eu oxide > 99.99%	60	30.5	32	27	27
NdPr (75/25) oxide > 99.5%	52	61.7	82	66	71
Nd oxide > 99.5%	51	79	84.7	67.5	73
Er oxide >99.5%	28	26.5	33.5	36.4	39
Gd oxide >99.5%	17	27.9	31	37	37.5
Y oxide > 99.999%	3.3	3.3	5.5	6.6	6.2
La oxide > 99.9%	2.5	1.5	1.4	0.6	0.6
Ce oxide > 99.5%	2.3	1.55	1.5	0.6	0.7
Sm oxide > 99.5%	1.9	1.8	2	2.1	2.1
Lu oxide > 99.99%	670	744.2	855	756	773
Tm oxide > 99.9%	200-300	-	-	-	-
Yb oxide > 99.99%	19	15.81	21	13.3	14

La,Ce  
em baixo  
preço  
histórico

# Preços de metais de Terras-raras (US\$/kg)

Fósforos luminescentes, lasers, usam óxidos, com pureza de 99.99% (4 "noves"),  
Ímãs usam metais com 99% pureza (2 "noves")

Metal	May/ 2018	Dec /2020	May/ 2021	Aug/ 2023	Nov/ 2023
Nd > 99%	65	96.5	107	81.2	90
Pr <sub>0.25</sub> Nd <sub>0.75</sub> > 99%	67	77.5	101	80.9	87.4
Pr	105	95	109	89.6	95.4
Dy	260	387	532	410	480
Tb	650	1305	1572	1274	1414
Y	35	29.5	39	33	33
Sm	15	13.3	-	12	12
La	6	4.1	4.6	3.5	3.5
Ce	6	4.5	4.9	3.4	3.5

Samário metálico é caro (12 U\$ /kg), pois precisa ser reduzido com lantânio metálico

# Hólmio e Gadolínio são usados em ímãs NdFeB (aumentam Tc – Temperatura de Curie da fase Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)

A única aplicação possível dessas ferroligas é produção de ímãs

Ferro abaixa a temperatura de fusão -> portanto a redução do óxido é mais fácil

*Preços de algumas ferroligas em Maio/2018 Dezembro/2020, Maio/2021, Agosto/2023, Novembro/2023. US\$(kg).*

Liga	Maio/ 2018	Dez/ 2020	Maio/ 2021	Agosto/ 2023	Nov/ 2023
Fe80Ho	68	92.25	129	77.7	84
Fe80Dy	185	293	388	309	360
Fe73Gd	19	27.75	31	35.3	37

# Classes de ímãs sinterizados Nd-Fe-B

Tipo	Temperatura Máxima de Operação (Top)
N	176°F (80°C)
NM	212°F (100°C)
NH	248°F (120°C)
NSH	302°F (150°C)
NUH	356°F (180°C)
NEH	392°F (200°C)

Ímãs SmCo podem ser alternativa, mas o preço do Cobalto tem oscilado muito nos últimos anos. Co esteve acima de 80 US\$/kg em maio/2022. Em nov/2023 está em ~33 US\$/kg

<https://www.lme.com/Metals/EV/LME-Cobalt#Price+graphs>

[https://ycharts.com/indicators/us\\_cobalt\\_spot\\_price](https://ycharts.com/indicators/us_cobalt_spot_price)

<https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>

**Nos ímãs NdPrFeB existem 2 maneiras básicas de aumentar Top (Temperatura de Operação):**

**1) Adição de Dy, Tb ou Ho**

**2) Reduzir tamanho de grão**

ímã de ferrite de estrôncio sinterizado: BHmax 4 a 4.4 MGOe - Br ~4 kG - Top=180°C

Br(kG) Hc A/m (kOe) iHc A/m (kOe) BHmax kJ/m<sup>3</sup> (MGOe) 1 Oe=79.577 A/m

N30	N42
Br(10.8-11.2) Hc>804(10.1) iHc>955(≥12)	Br(12.9-13.2) Hc>915(11.5) iHc>955(≥12)
(BH)max 223-246(28-31) Top≤ 80 °C	(BH)max 318-342(41-43) Top≤ 80 °C
N33	N45
Br(11.3-11.7) Hc>852(10.7) iHc>955(≥12)	Br(13.2-13.8) Hc>923(11.6) iHc>955(≥12)
(BH)max 247-263(31-33) Top≤ 80 °C	(BH)max 342-366(43-46) Top≤ 80 °C
N35	N48
Br(11.7-12.1) Hc>860(10.9) iHc>955(≥12)	Br(13.8-14.2) Hc>923(11.6) iHc>876(≥12)
(BH)max 263-280(33-36) Top≤ 80 °C	(BH)max 366-390(46-49) Top≤ 80 °C
N38	N50
Br(12.2-12.6) Hc>907(11.4) iHc>955(≥12)	Br(14.0-14.5) Hc>796(10.0) iHc>876(≥11)
(BH)max 286-310(36-39) Top≤ 80 °C	(BH)max 382-406(48-51) Top≤ 60 °C
N40	N52
Br(12.5-12.9) Hc>939(11.8) iHc>955(≥12)	Br(14.3-14.8) Hc>796(10.0) iHc>876(≥11)
(BH)max 302-326(38-41) Top≤ 80 °C	(BH)max 398-422(50-53) Top≤ 60 °C

# Preços de ímãs NdFeB Blank US\$ /kg China

Nos ímãs Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, ~1/3 consiste em Nd e outras TR

Pr<sub>0.25</sub>Nd<sub>0.75</sub>  
cotado a  
87.4 US\$/kg  
Nov/2023

Preços em Maio/2021 – esquerda e Agosto(2023) - direita (vermelho)

Preços em Novembro (2023)

Class	N	NM	NH	SH Ce
	80°C	100°C	120°C	150°C
28				47 32
30				47 34
33				47 35
35	35 20	35 29	38 32	48 36
38	35 22	37 30	39 34	48 38
40	35 23	38 31	40 35	48 39
42	36 24	39 33	41 36	56 --
45	38 26	40 34	42 38	65 41
48	39 27	42 36	45 39	77 42
50	40 29	42 37	51 41	
52	42 30	43 39	62 42	
55	45 32			

Cério – Ce  
está sendo  
adicionado  
na classe SH

Class	N	NM	NH	SH Ce
	80°C	100°C	120°C	150°C
28				36
30				38
33				38
35	23	31	32	39
38	24	32	34	40
40	26	33	35	39
42	27	35	36	42
45	29	36	38	43
48	30	38	40	46
50	31	39	42	
52	33	40	43	
55	35			

# Análise de custos – Exemplo: projeto Phalaborwa

<https://www.mining.com/how-rainbow-rare-earths-plans-to-bootstrap-itself-onto-the-global-stage/>

“It should cost Rainbow around U\$33.86 to make one kilogram of rare earths” – Phalaborwa – South Africa

August 2, 2023

<https://www.rainbowrareearths.com/project/phalaborwa/>

TREO%	Nd%	Pr%	Dy%	Tb%	Other%
0.44	23.4	5.6	1.0	0.3	69.7

Monazita – 500 U\$/ton - 0.5 U\$/kg

Oxido Pr/Nd U\$ 71 U\$/kg

**Típica proporção de óxido na Monazita: 45% Ce, 30 %La, 15% Nd, 5% Pr, 5% outros (Y, Sm, Eu, Gd, etc).**

<https://www.reuters.com/markets/commodities/rare-earths-prices-sink-lowest-since-2020-china-ramps-up-supply-2023-07-13/>

Rare earths prices sink to lowest since 2020 as China ramps up supply. July 13, 2023

“Prices for Praseodymium Neodymium alloy in China fell to \$73.50 a kilogram this week, the lowest since November 2020, and down by more than two-thirds since January last year when they topped out at decade highs of \$220.”

<https://www.reuters.com/markets/commodities/chinese-rare-earth-prices-hit-20-month-high-myanmar-supply-worry-2023-09-07/>

Chinese rare earth prices hit 20-month high on Myanmar supply worry. September 7, 2023

“Prices of dysprosium oxide leapt to 2,610 yuan (\$356) per kilogramme on Wednesday, the highest since May 2022” .

# Tendências em ímãs

**Forte tendência por ímãs NdFeB em motores de alta eficiência (opção: ímãs de ferrite)**

Preço dos ímãs de ferrite 3-7 US\$/kg. Preço dos ímãs NdFeB 20-40 US\$/kg (blank, China).

O produto energético máximo BHmax do NdFeB pode ser 10 vezes maior, proporcionando uma compensação econômica.

Quando o preço das terras raras disparou em 2010-2011, o MnBi foi sugerido como “alternativa”. Mas as pessoas esqueceram que as ferritas de estrôncio e bário já eram alternativas, difíceis de serem superadas. As ferritas são óxidos, sem problemas de corrosão, de processamento fácil e barato. 50-60 anos atrás, a Phillips fez intensa pesquisa para desenvolver MnAl e MnBi comerciais. Os ímãs SmCo são indicados para aplicações em altas temperaturas, mas o alto custo do cobalto limita seu uso. Nos ímãs Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, 1/3 do peso é Nd. Nos ímãs SmCo<sub>5</sub>, 2/3 do peso é Co.

O samário metálico é caro (12 U\$ /kg), porque é reduzido com lantânio metálico

Alternativa para disprósio = manter a temperatura de operação baixa (talvez com melhores materiais magnéticos moles) Alternativas para ímãs NdPr = ferrites, motores sem ímãs (Tesla Motors), turbinas eólicas sem ímãs (Vestas)

**A adição de cério não é a alternativa ideal. O uso de Cério reduz a temperatura de operação e se adicionado em ímãs, exigiria maior volume de ímãs, pois o Ce diminui a remanência.**

**CeFeB isotrópico -> propriedades próximas às ferritas de estrôncio, mas muito mais caro**

**Hólmio e Gadolínio também podem ser usados em ímãs Nd-Fe-B substituindo em parte Nd,Pr,Dy**

# Tendências em Fósforos Luminescentes

Európio Eu -> **Vermelho** e **Azul**

Térbio Tb -> **Verde**

Cor	Fósforo Aluminato	Fósforo Fosfato
<b>Vermelho</b>	<b><math>Y_2O_3: Eu^{3+}</math> (YOX)</b>	
<b>Verde</b>	<b><math>CeMgAl_{11}O_{19}: Tb^{3+}</math> (CAT)</b>	<b><math>LaPO_4: Ce, Tb^{3+}</math> (LAP)</b>
<b>Azul</b>	<b><math>BaMgAl_{10}O_{17}: Eu^{2+}</math> (BAM)</b>	<b><math>(Sr, Ca, Ba)_{10}(PO_4)_6Cl_2: Eu^{2+}</math> (SCA)</b>

**Chip LED Azul InGaN + Fósforo amarelo YAG ( $YAG=Y_3Al_5O_{12}$ ) = luz branca**

Lâmpadas de LED típicas contém **LED Azul InGaN/GaN** acoplado com **fósforo amarelo (YAG):Ce<sup>3+</sup>**  
 YAG= Yttrium-Aluminum-Garnet - granada de Ítrio-Alumínio, pode ter Gd:  $(Y_{0.77}Gd_{0.2}Ce_{0.03})_3Al_5O_{12}$

**Lâmpadas de LED usam os baratos Ítrio e Cério !**

**Lâmpadas Fluorescentes Compactas usam Európio e Térbio (sistema RGB – luz branca)**

**Pesquisas visam alternativas sem terras-raras**

<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jace.18386>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022231322006317>

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37906082/>

<https://projectboard.world/isef2021/project/chem036---rare-earth-free-phosphors-for-leds>

<http://phys.org/news/2015-10-fluorescent-physics.html>

**5 gramas de terras raras em cada Lâmpada fluorescente.**

**Lâmpadas fluorescentes nos Estados Unidos consumiam > 1000 ton/ano em Y, La e dopantes Eu, Tb, Ce**

**(0.5 a 1 g de Eu em cada tela de TV colorida antiga, de tubo de raios catódicos)**

**TV de Plasma usa Eu e Tb, mas pouca quantidade de terras raras é usada em TV de LED**

# Forte demanda de ímãs NdFeB para carros elétricos e híbridos e também turbinas eólicas (especialmente off-shore)

0.5 a 2.5 kg / motor (carros elétricos podem ter vários motores)

	Massa de ímãs (kg)
Accord M	0.755
Accord G	1.24
Leaf	1.895
Prius 2010	0.768
Prius 2004	1.232
LS 600h	1.349
Camry	0.928
Prius 2017	0.544
BMW i3 2016	2
Tesla Model 3	1.783
Jaguar I-PACE	1.85
Chevy Bolt	1.57
VW ID3	2.5

# Uso de disprósio em ímãs de motores de carros elétricos

Análise química de ímãs automotivos (% em peso)

	Dy	Nd	Pr	Sm	Fe	Co	Cu	Al	O
Tesla Model 3 magnet	1.19	23.01	7.70	1.42	57.38	1.72	2.11	0.96	4.50
“standard automotive magnet”	3.47	19.90	6.67	0.86	62.51	1.79	1.10	1.37	2.33

**Detalhe importante: não menciona cério, hólmio ou gadolínio**

<https://chargedevs.com/newswire/comparing-10-leading-ev-motors-watch-the-free-webcast/>

Sandy Munro

**Comparing 10 leading EV motors: watch the free webcast**

Posted July 8, 2020 by [Charged EVs](#)

Preços de elementos de liga (novembro/2023): Al 2.7 US\$ /kg   Cu 9.5 US\$ /kg   Co 33.5 US\$/kg

# Efeito do Cério nos ímãs NdFeB

Cério reduz muito a magnetização de saturação ( $4\pi M_s$ ) e também o campo de anisotropia  $H_A$ . Isso implica em redução do Produto Energético Máximo  $BH_{max}$ . A adição do cério também reduz  $T_c$  (Temperatura de Curie), não sendo adequada para ímãs operando em altas temperaturas.

**A adição de cério não é interessante para fins de miniaturização, pois implica em aumentar o volume dos ímãs.**

Devido aos ímãs serem vendidos em dólares por kg, a substituição de parte de NdPr por cério pode aumentar muito o lucro para o fabricante.

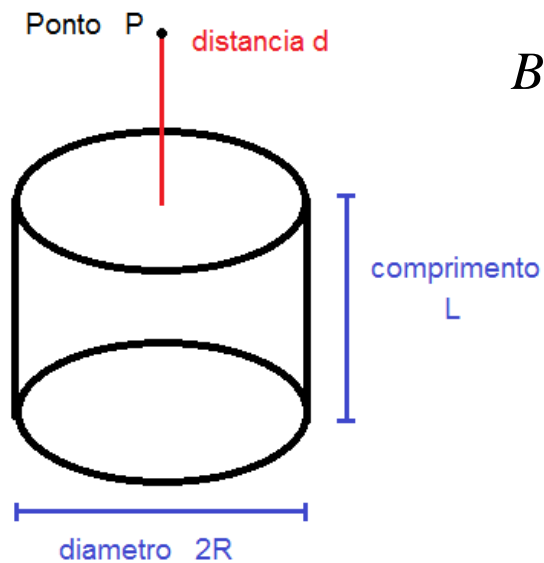
Em ímãs sinterizados, a adição de cério reduz muito as propriedades, sendo mais adequada para ímãs produzidos por melt-spinning, os quais são nanocristalinos.

É possível induzir textura por deformação a quente de materiais produzidos por melt-spinning, mas esse é um processo caro e de pouca produtividade.

Composição	$B_r$ (kG)	$H_{ci}$ (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)	$T_c$ (°C)	
$(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.91	10.7	16.5	311	<b><math>Ce_2Fe_{14}B</math> (<math>4\pi M_s = 11.7</math> kG, <math>H_A = 30</math> kOe, <math>T_c = 150^\circ C</math>)</b>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.9}Ce_{0.1}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.74	9.8	15.7	297	<b><math>Nd_2Fe_{14}B</math> (<math>4\pi M_s = 16.0</math> kG, <math>H_A = 77</math> kOe, <math>T_c = 315^\circ C</math>)</b>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.8}Ce_{0.2}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.54	9.4	14.8	284	<b><math>Pr_2Fe_{14}B</math> (<math>4\pi M_s = 15.6</math> kG, <math>H_A = 87</math> kOe, <math>T_c = 296^\circ C</math>)</b>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.77}Ce_{0.23}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.50	9.1	14.7	281	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7118721/">http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7118721/</a>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.7}Ce_{0.3}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.30	8.8	13.6	270	Liga $Ce_{17}Fe_{78}B_6$ resultou em $B_r = 4.9$ kG, $H_{ci} = 6.2$ kOe, e $(BH)_{max} = 4.1$ MGOe. Ímã isotrópico nanocristalino produzido por melt spinning.
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.65}Ce_{0.35}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.23	7.9	13.3	263	<a href="http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3675175">http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3675175</a>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.6}Ce_{0.4}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.14	7.4	12.8	251	<b>Aplicações de ímãs sinterizados com até 20% Ce substituindo NdPr (classes N35 ou N38): separação magnética, brinquedos, alto falantes, bicicleta elétrica</b>
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.55}Ce_{0.45}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	8.04	7.0	12.4	243	
$[(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_{0.5}Ce_{0.5}]_{11.65}Fe_{82.75}B_{5.6}$	7.82	6.8	11.6	236	

# Fluxo Magnético gerado aumenta com o volume dos ímãs

**$B_r$  NdFeB  $\approx 3 B_r$  ferrite de estrôncio**  
**Uso de NdFeB permite miniaturização**



$$B = \frac{B_r}{2} \left( \frac{L + d}{\sqrt{R^2 + (L + d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right)$$

B = densidade de fluxo magnético  
também chamado  
Indução magnética  
 $B_r$  = indução remanente  
R = raio do cilindro  
L = comprimento do cilindro

# 100 anos atrás, a maior parte da produção de terra-rara no mundo era a partir de areia monazítica Brasileira

A coloração preta da areia monazítica vem da ilmenita

A ilmenita  $\text{FeTiO}_3$  é preta. A Monazita é amarelo-escura  $(\text{Ce,La,Nd,Pr,Th,Y})\text{PO}_4$

No processo de formação de areia monazítica, ondas trazem minerais do fundo do mar. Água e vento movem minerais leves como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) de volta ao mar, deixando minerais pesados (zirconita, ilmenita, rutilo e monazita) depositados na praia.

Nos anos 1880s, areia monazítica do Brasil era removida de praias brasileiras como “lastro de navio” e enviada para a Europa e Estados Unidos.

Típica proporção de óxido na Monazita: 45% Ce, 30% La, 15% Nd, 5% Pr, 5% outros (Y, Sm, Eu, Gd, etc). O mischmetal vai manter essa composição, se não houver separação de terras raras. Quando o preço do Európio estava alto, acima de 500 U\$/kg, era muito interessante economicamente extrair Európio da monazita, ainda que esta contenha apenas ~1% Európio

# Detalhes econômicos na produção de terras-raras

Dois fatores são fundamentais para a produção de terras raras: i) tecnologia (barata) de concentração de terras raras ii) tecnologia (barata) de separação de óxidos de terras raras

A concentração barata de terras raras é um grande problema no negócio de extração de terras raras. Para se ter uma ideia, o projeto Arafura, na Austrália, expressou a necessidade de construção de sua própria planta de ácido sulfúrico. Porém, produzir ácido sulfúrico para uso próprio não é uma tarefa fácil para as mineradoras.

Os placers de monazita (também chamados de areia monazítica de praia) são considerados uma fonte mais interessante de monazita, porque a extração de monazita da rocha carbonatítica pode envolver uma quantidade significativa de ácido, aumentando assim o custo de processamento.

A areia monazítica fornece 4 minerais, incluindo a própria monazita: rutilo, ilmenita, zirconita e monazita. Em 2022, a zirconita (fonte de zircônio) foi cotada a 1950 US\$/ton, o rutilo (usado como pigmento branco),  $\text{TiO}_2$  a 1500 US\$/ton e a Ilmenita  $\text{FeTiO}_3$  a 290 US\$/ton.

O preço da monazita - um fosfato  $(\text{TR})\text{PO}_4$  - é baixo. Foi relatado que a monazita brasileira foi vendida a ~570 US\$/tonelada em 2011 ou 500 US\$/tonelada em 2013. Na monazita, ~80% dos TR são cério e lantânio.  $\text{CeO}_2$  e  $\text{La}_2\text{O}_3$  são atualmente cotados a 0.6 US\$/kg ou 600 US\$/tonelada . Esta simples análise mostra que a produção de monazita pode não ser lucrativa e explica a falta de interesse no Brasil.