

ETR-BR

Cooperação Brasil – Alemanha



21 Sc														
39 Y														
57 *La	*Lantanídeos													
	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu

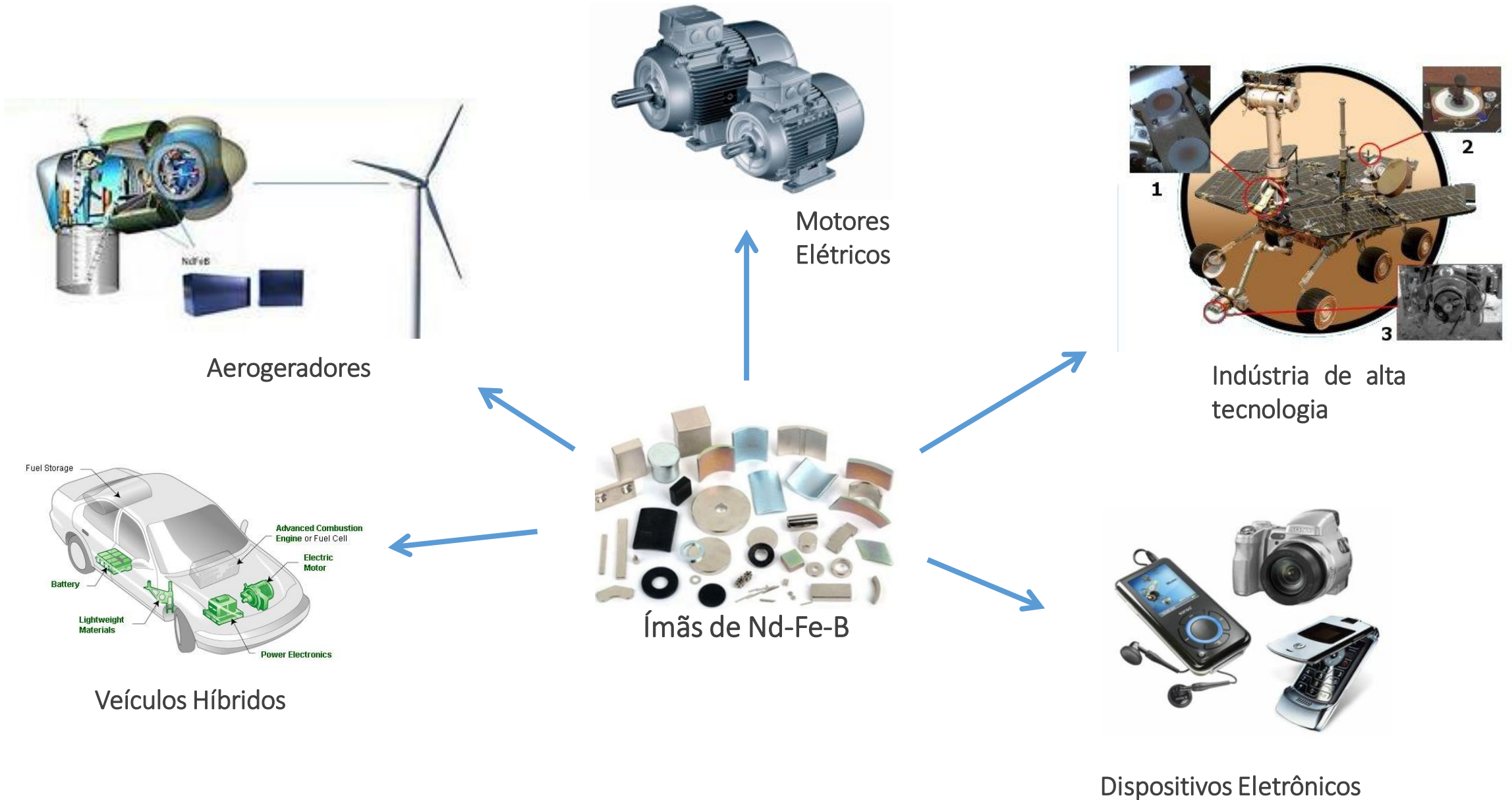
TERRAS RARAS

AGREGAÇÃO DE VALOR: Ímãs de Terras Raras

Value Chain for Didymium-Fe-B Magnets:



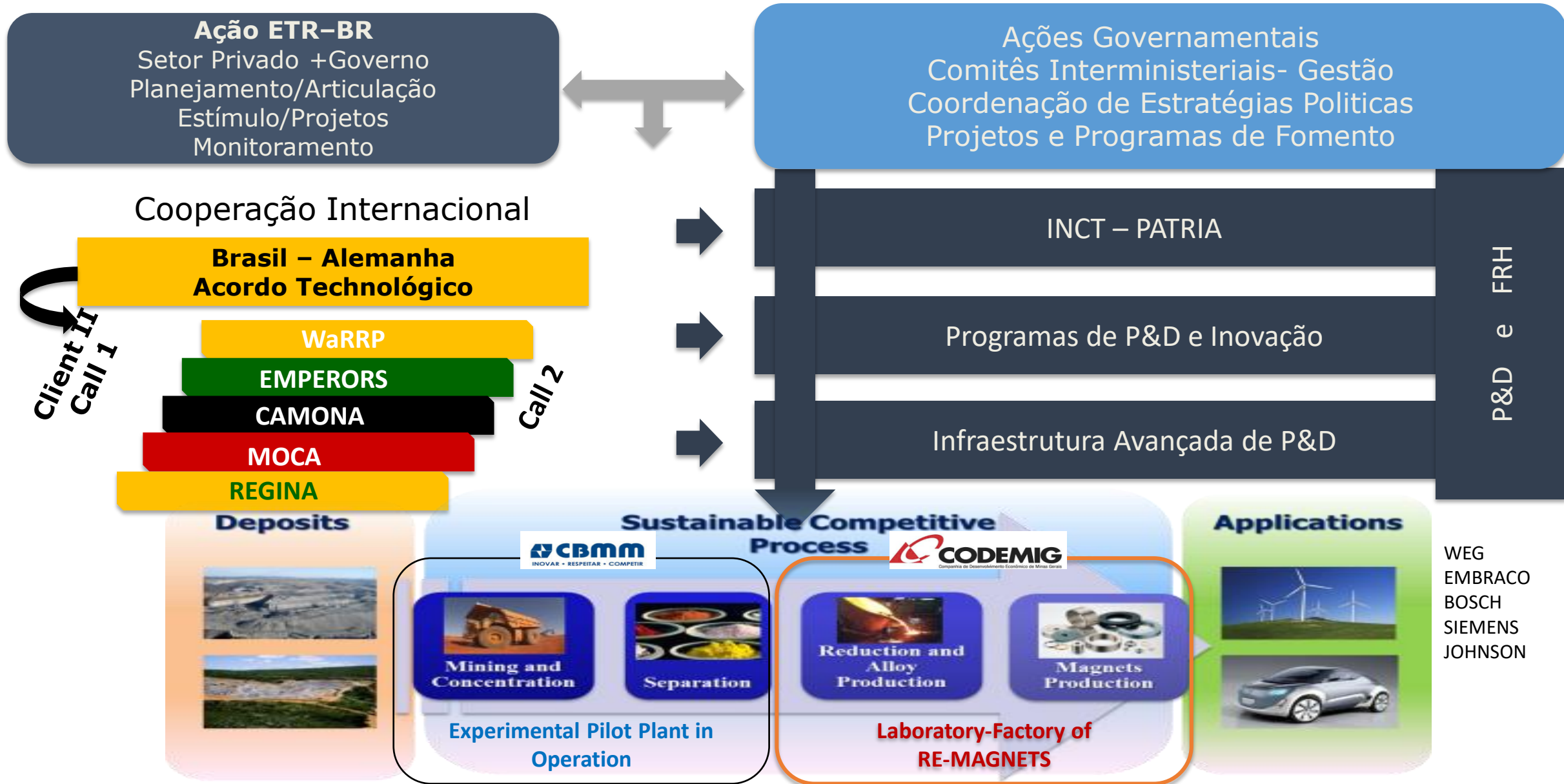
Introdução: Aplicações de ímãs de Nd-Fe-B



BRAZILIAN INSTITUTIONS



Formação do Projeto de Cooperação em TRs

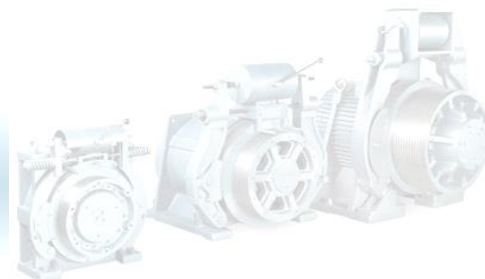
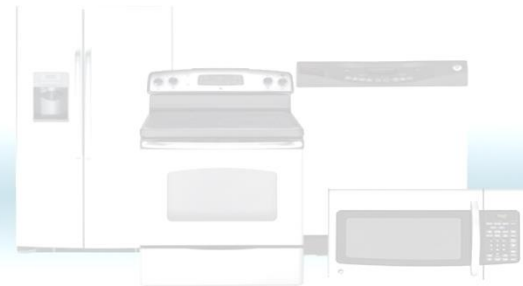




German – Brazilian WORKSHOP



R.E.G.I.N.A. - Rare Earth Global Industry and New Application





**Business
"not small"**

Cadeia Produtiva de Terras Raras

\$ Big Investment



**Impacto das
Aplicações**

**Reservas
Existentes**

***Domínio Tecnológico e
Competitividade??***

**Mercado
Existente**

2032 GOAL -> Brazil: 10 % >> 12.000 ton/year

Pacotes Temáticos de Trabalho (PTAs)

WP0

Sustentabilidade



WP1

Processos de
Separação

WP2

Processos de
Redução

WP3

Fabricação de
Ligas

WP4

Produção de
Ímãs

WP5

Modelo de
Negócios



Instituições Brasileiras e Alemãs



- **WP0** – UFSC|CETEM|CBMM
- **WP1** – CETEM|CDTN; CBMM
- **WP2** – IPT|CBMM|CODEMGE
- **WP3** – USP|IPT|CBMM|WEG
- **WP4** –UFSC|CDTN|CODEMGE|WEG
- **WP5** – CERTI|ABDI|CODEMGE



- **WP0** – HIF|OUTOTEC
- **WP1** – TUC
- **WP2** – IME|KME
- **WP3** – TUD|IWKS|GMB
- **WP4** – IWKS|TUD
- **WP5** – THGA

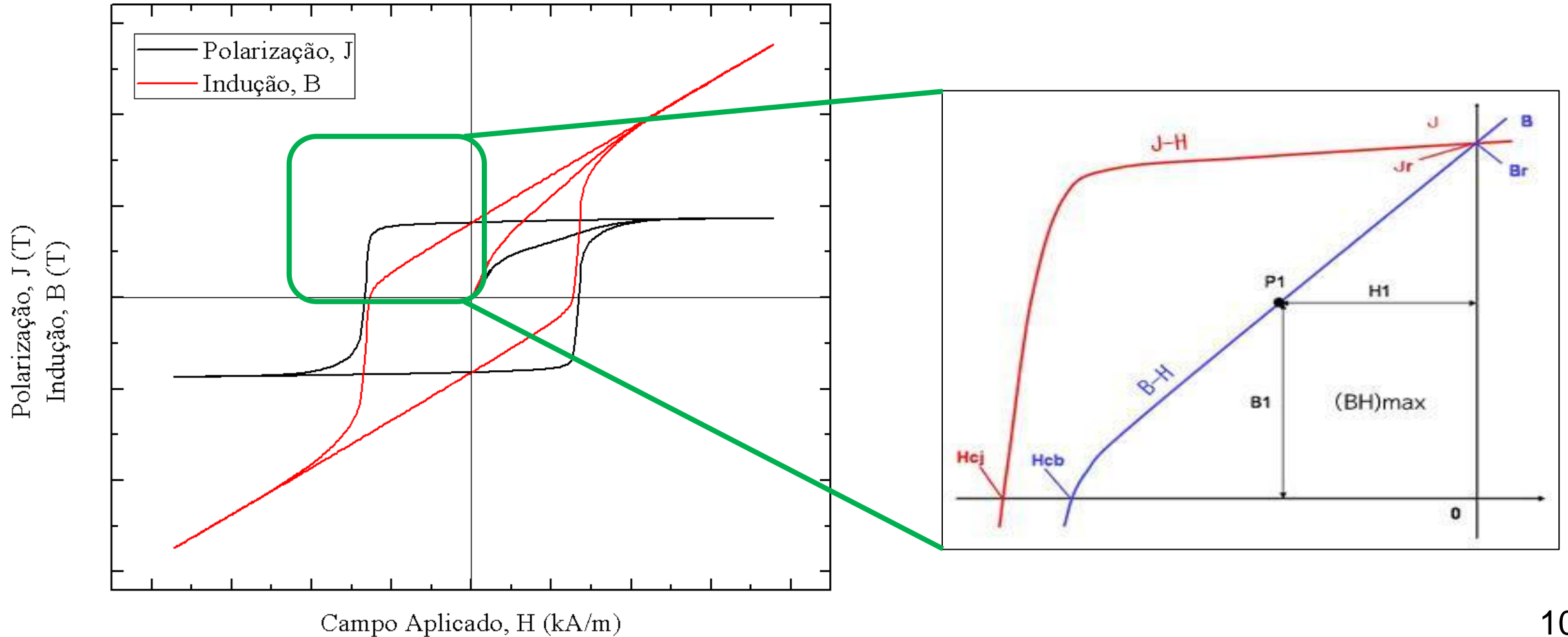
Histerese magnética

Curva JxH:

Resposta do material frente a um campo magnético

Curva BxH:

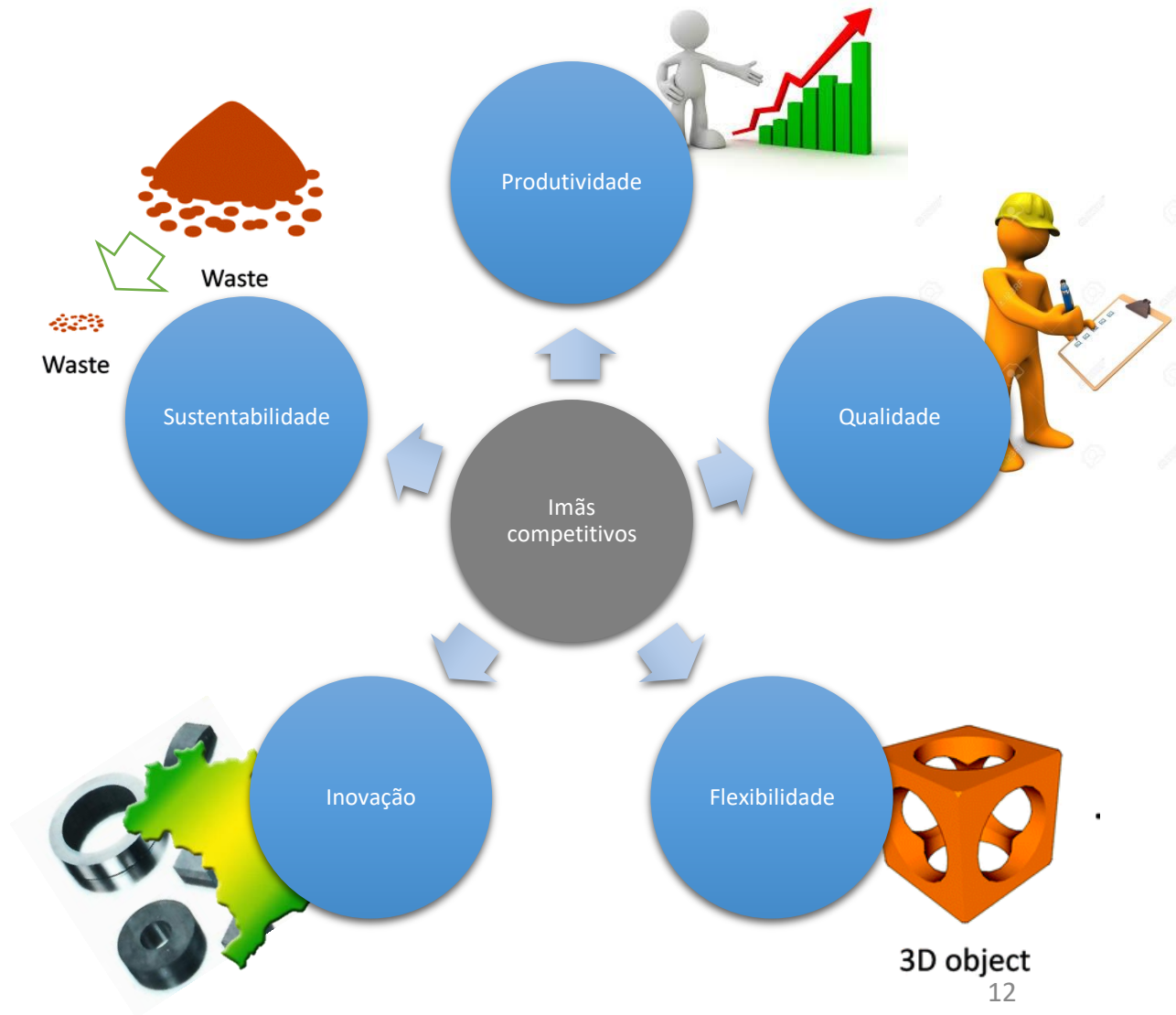
$$B = \mu_0 H + J$$



Desafios Tecnológicos

Produção de Ímãs

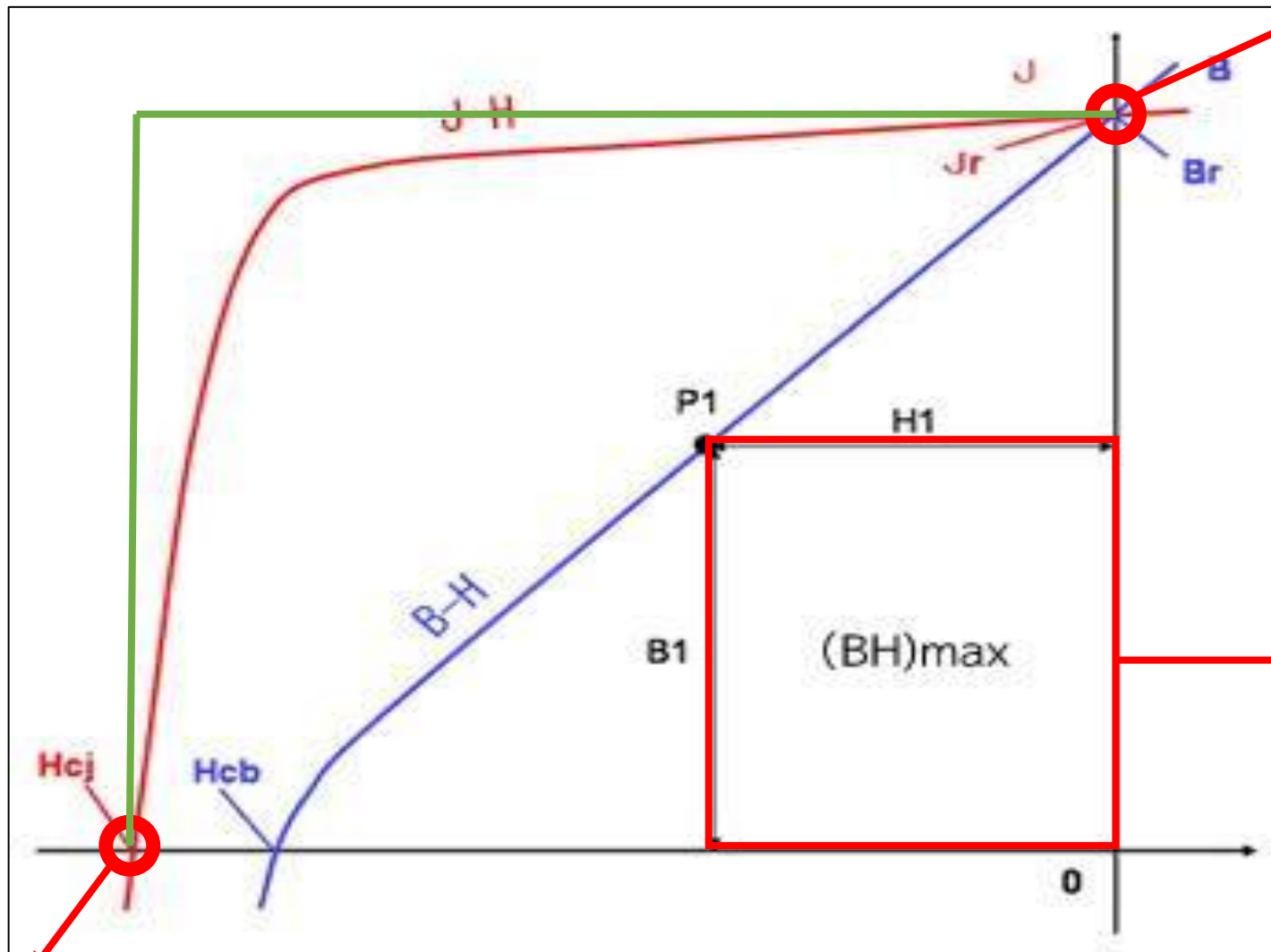
Desafios Científicos e Tecnológicos



Uso Racional de Materias-Primas

Segundo Quadrante: Curva de desmagnetização

Remanência, B_r (T) ($B \times H$) – J_r (T) ($J \times H$)



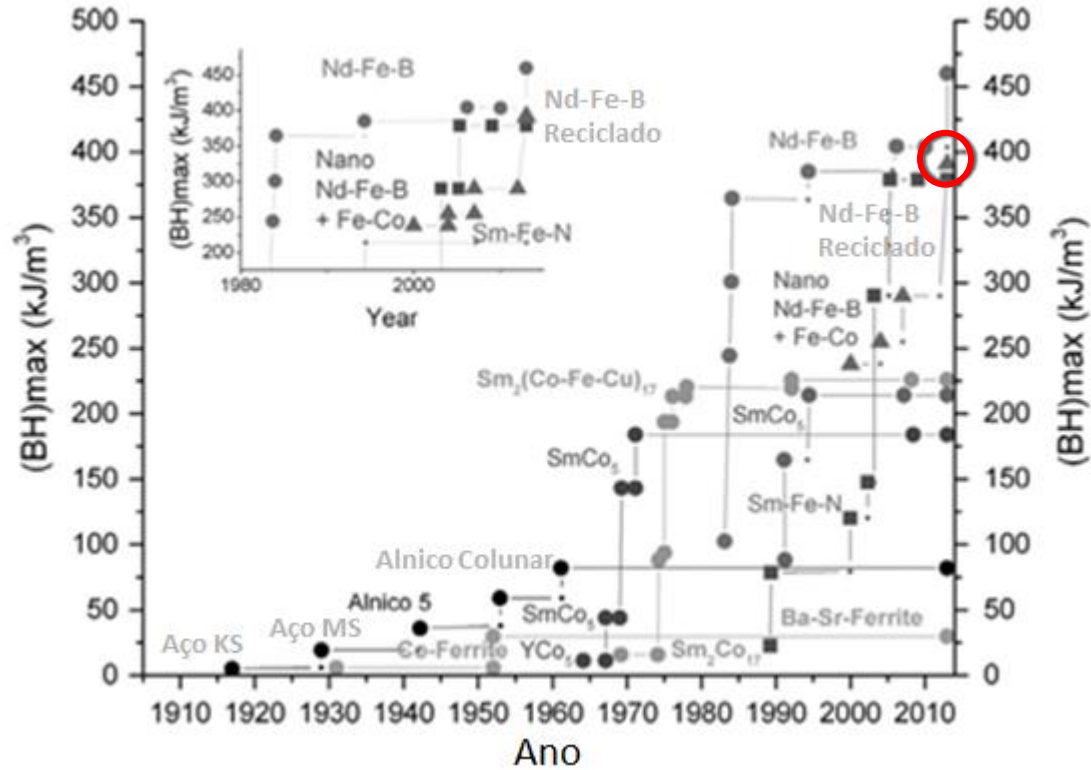
$$B = \mu_0 H + J$$

$$(BH)_{max} = \frac{B_r^2}{4\mu_0}$$

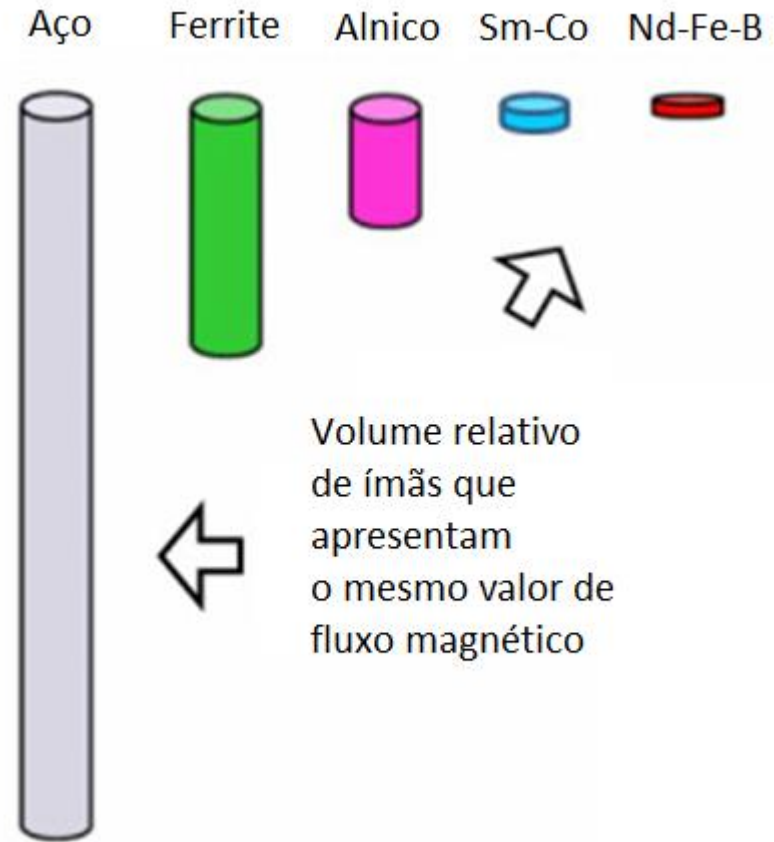
Produto-energia máximo,
 $(BH)_{max}$ (kJ/m^3)

Coercividade, H_{cj} (kA/m)

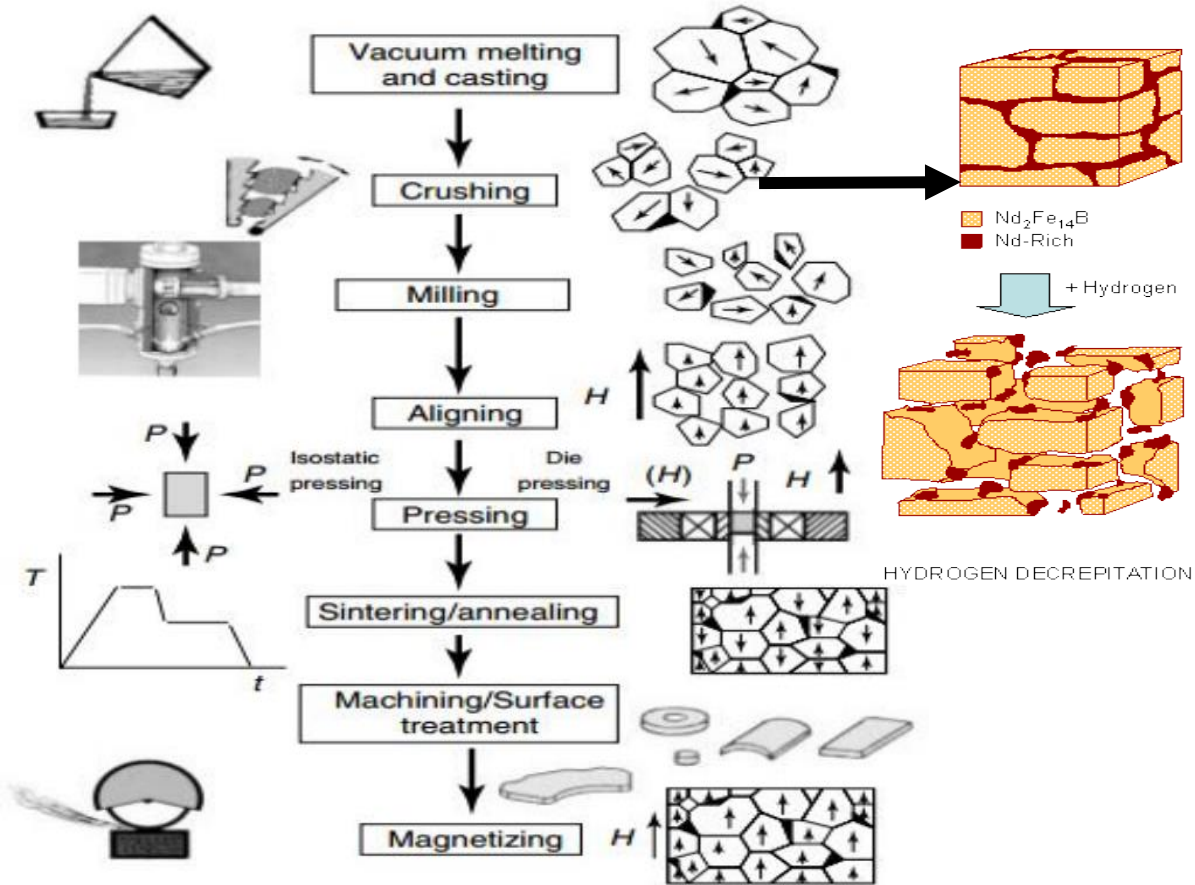
Introdução: Tipos de Ímãs Permanentes



(ZAKOTNIK; TUDOR, 2015)



Ne-Fe-B Sintered Magnets Manufacturing



Uso Racional de Terras-Raras



ETR	Custo (US\$/kg)
Tb	550,00
Dy	350,00
Nd	60,00
La	7,00
Ce	7,00

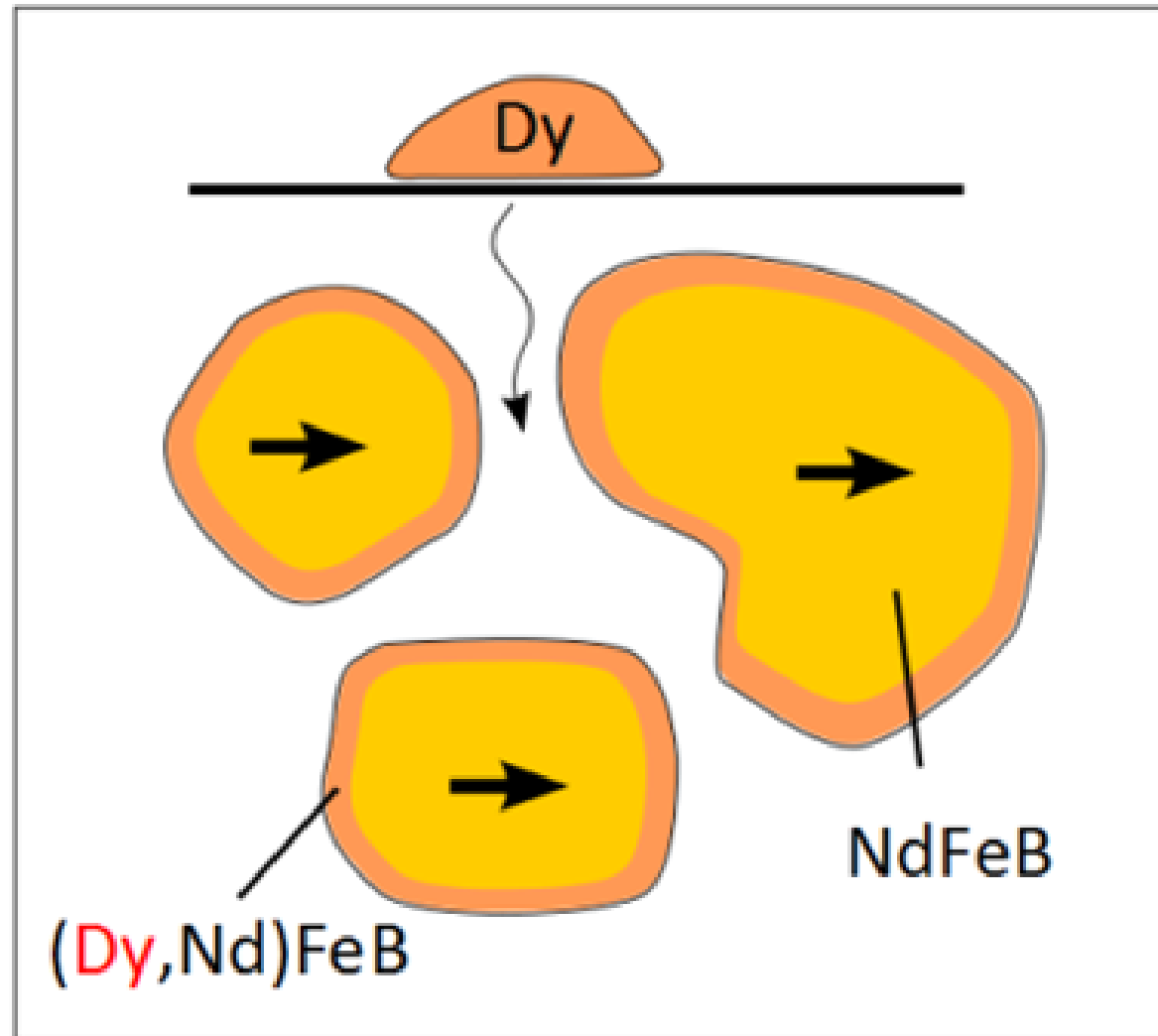
Dy, Tb Aumento da Temperatura de operação dos ímãs

La, Ce Redução de custo de matéria-prima

Uso raional de terras-raras

Difusão por Contornos de Grão (Grain Boundary Diffusion Process, GBDP)

ETR	Custo (US\$/kg)
Tb	550,00
Dy	350,00
Nd	60,00



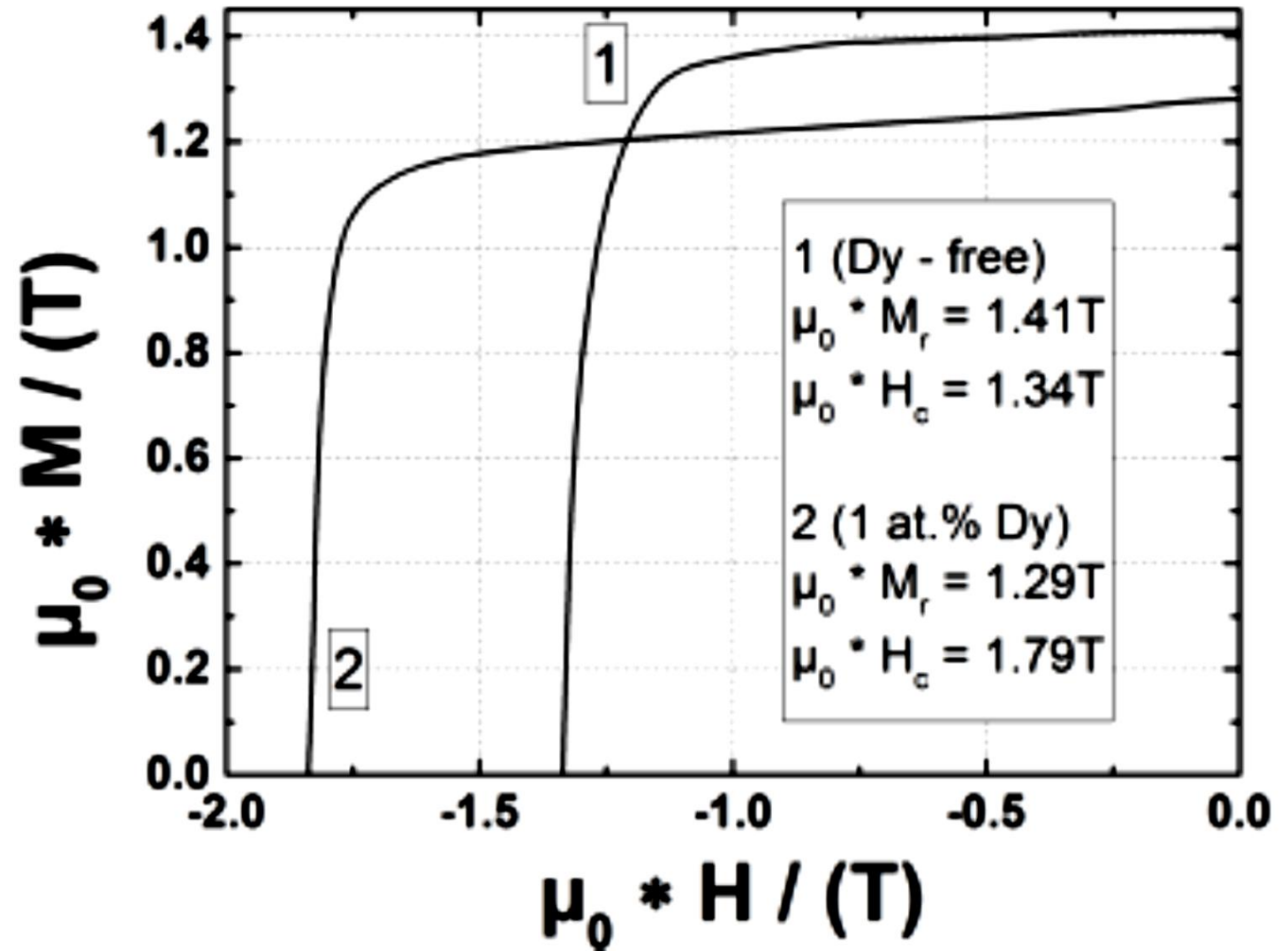
Necessidade de Adição de Elementos Críticos como Disprósio (Dy) e Tértbio (Tb)

↑ Dy e Tb

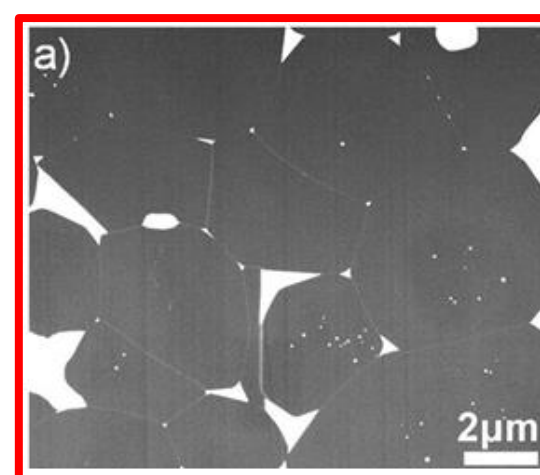
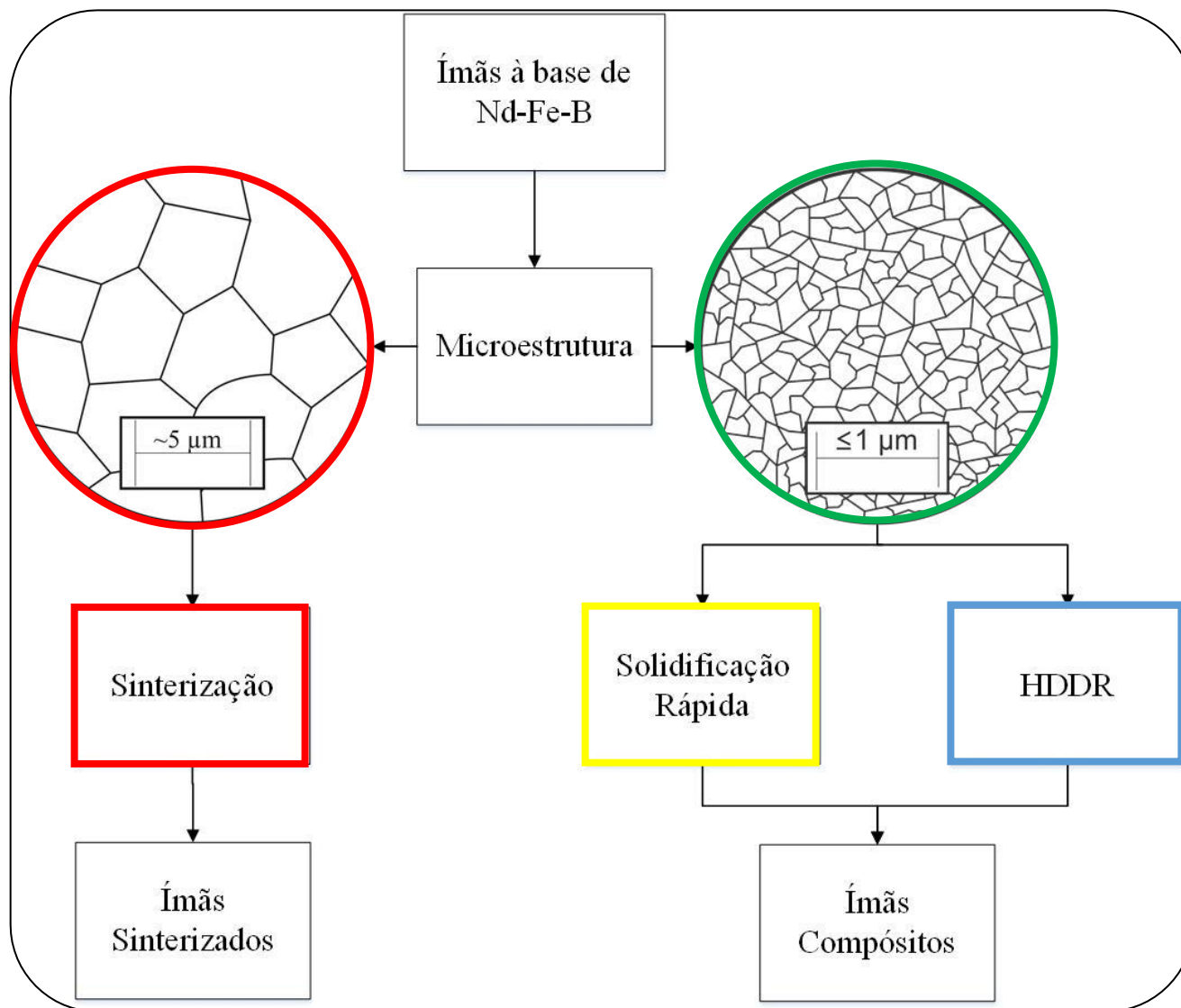
↑ Resistência à Desmagnetização (necessário para aplicações em altas temperaturas)

↓ Fluxo Magnético

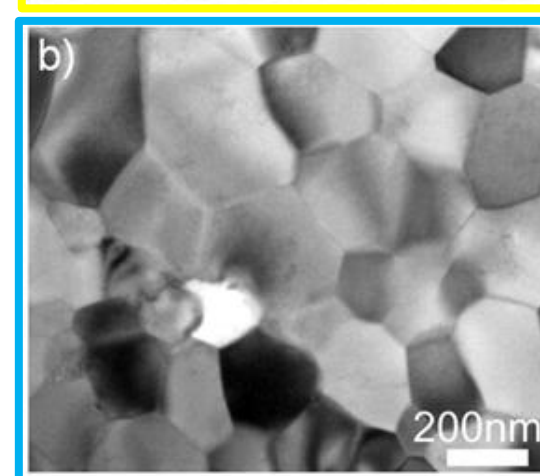
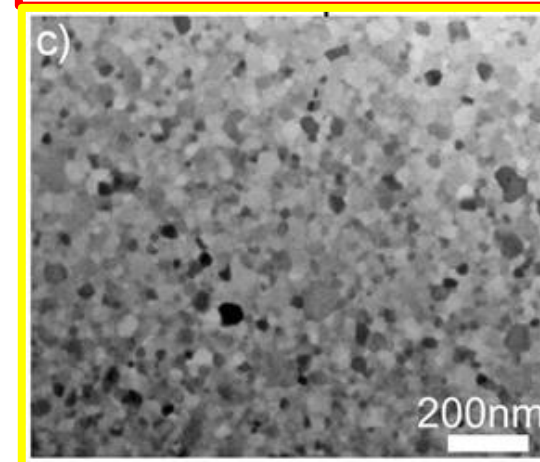
↑ CUSTO FINAL DO ÍMÃ



Tipos de Ímãs de Nd-Fe-B



Elevada densificação > 95%

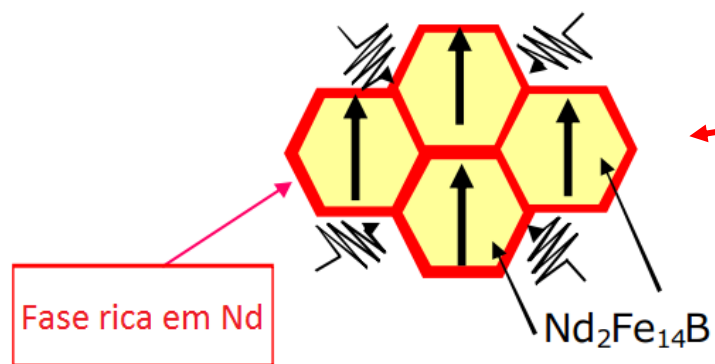


Pós misturados com resina Diluição da densidade de energia do ímã em fase polimérica

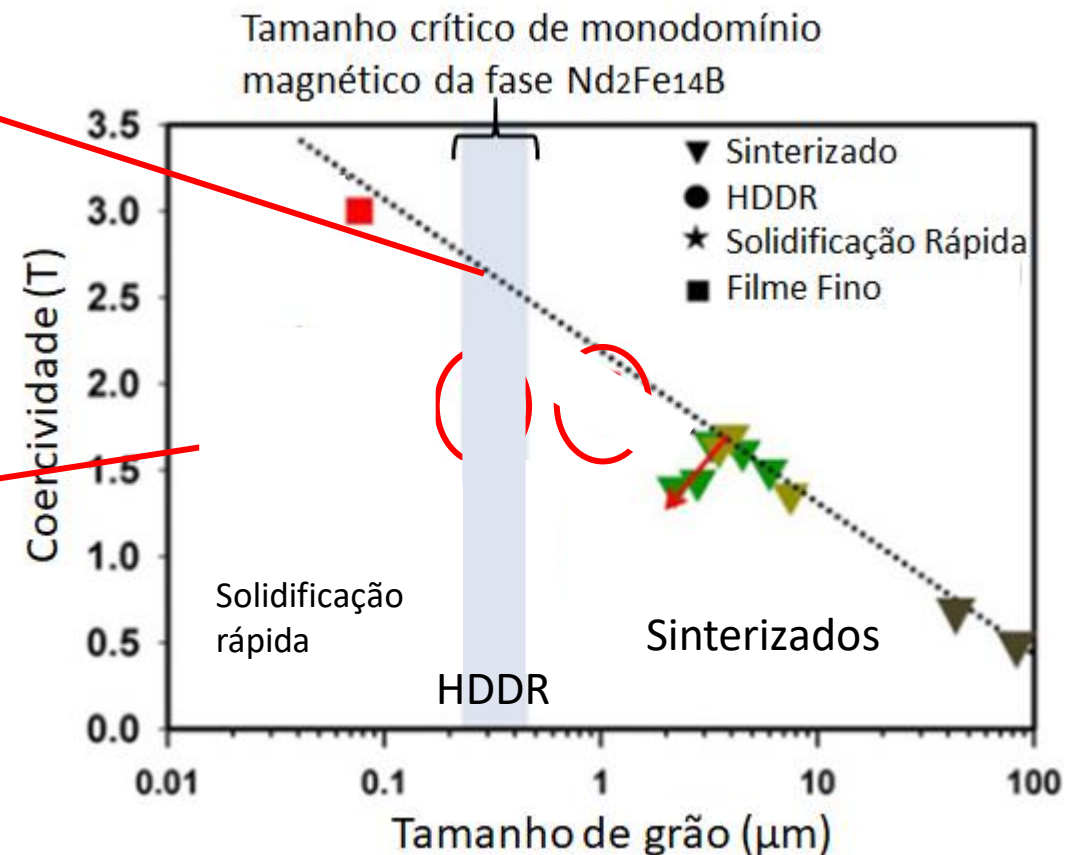
Redução do tamanho de grão

$$H_{cj} \propto 1/\ln D^n$$

(RAMESH; SRIKRISHNA, 1988)

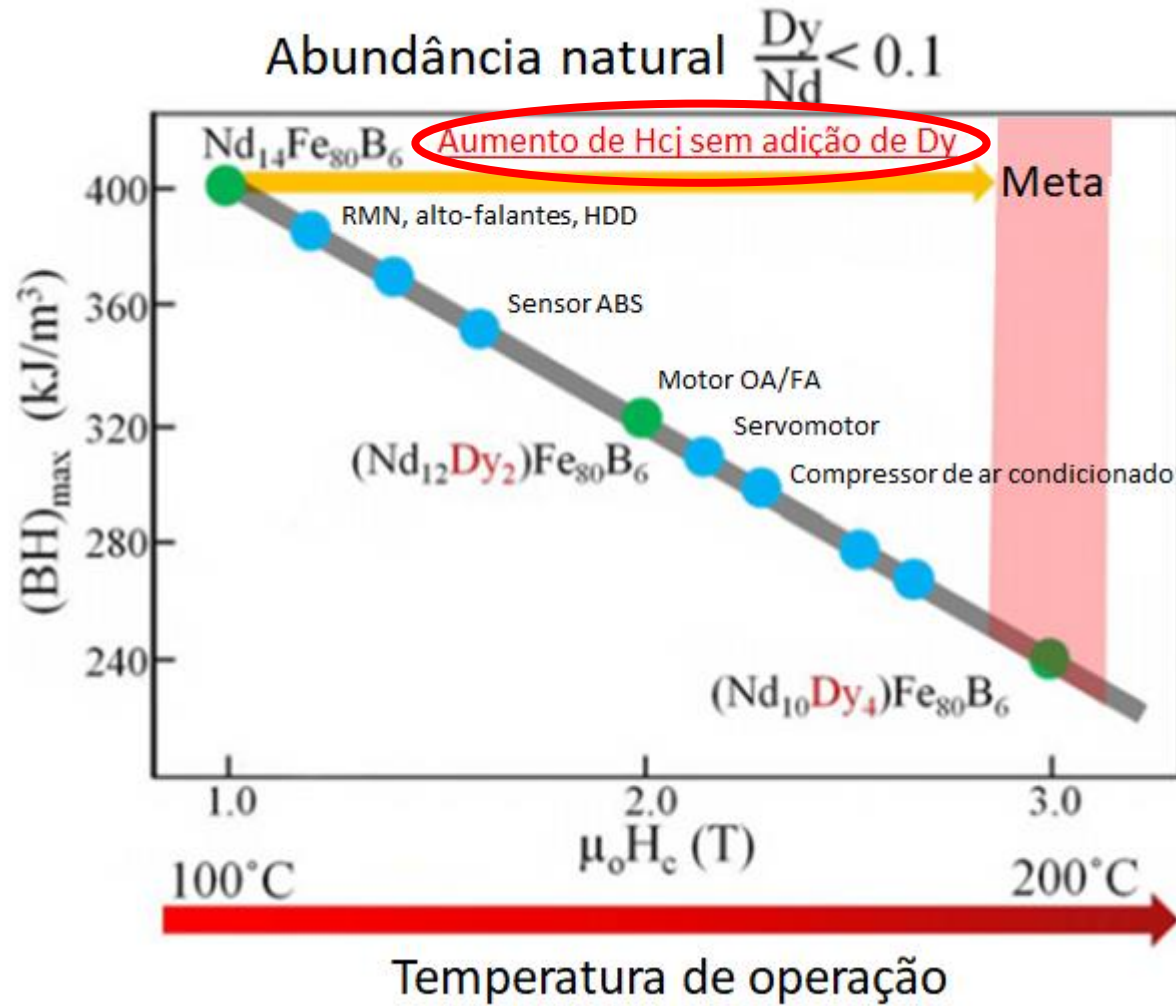


(SEPEHRI-AMIN, H. et al, 2010)

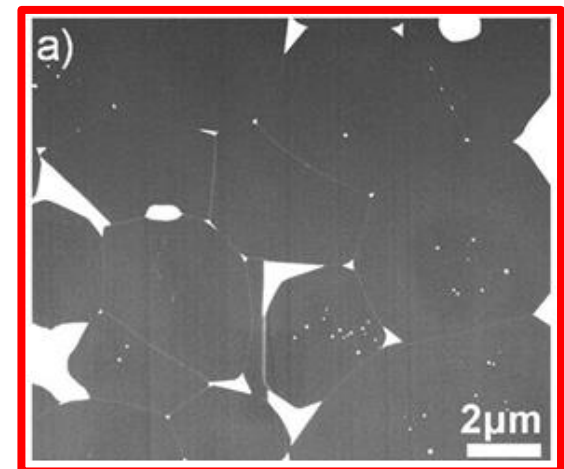
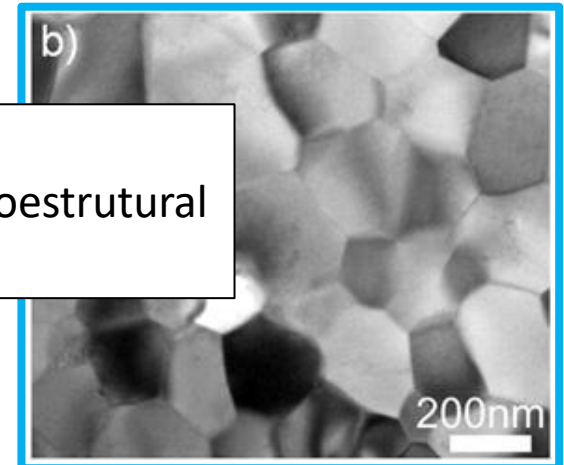
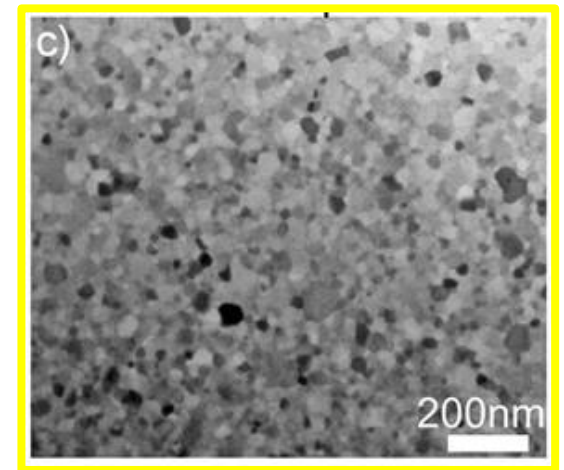


(HONO; SEPEHRI-AMIN, 2012)

Requisitos para aplicações

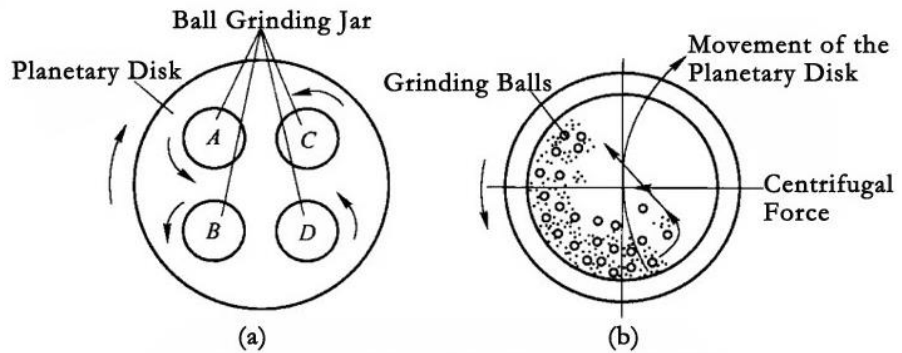


Refino de grão
+ Engenharia Microestrutural
↑ Coercividade



Nd-Fe-B sinterizados

Moinho planetário



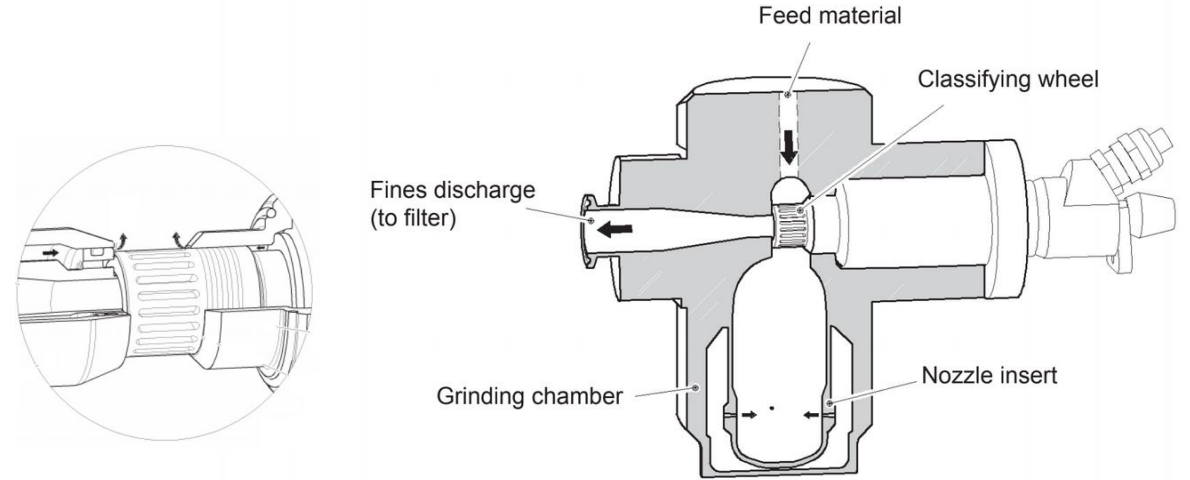
Working Principle of Lab Planetary Ball Mill

(a) overall layout of planetary disk (b) horizontal section of grinding jar

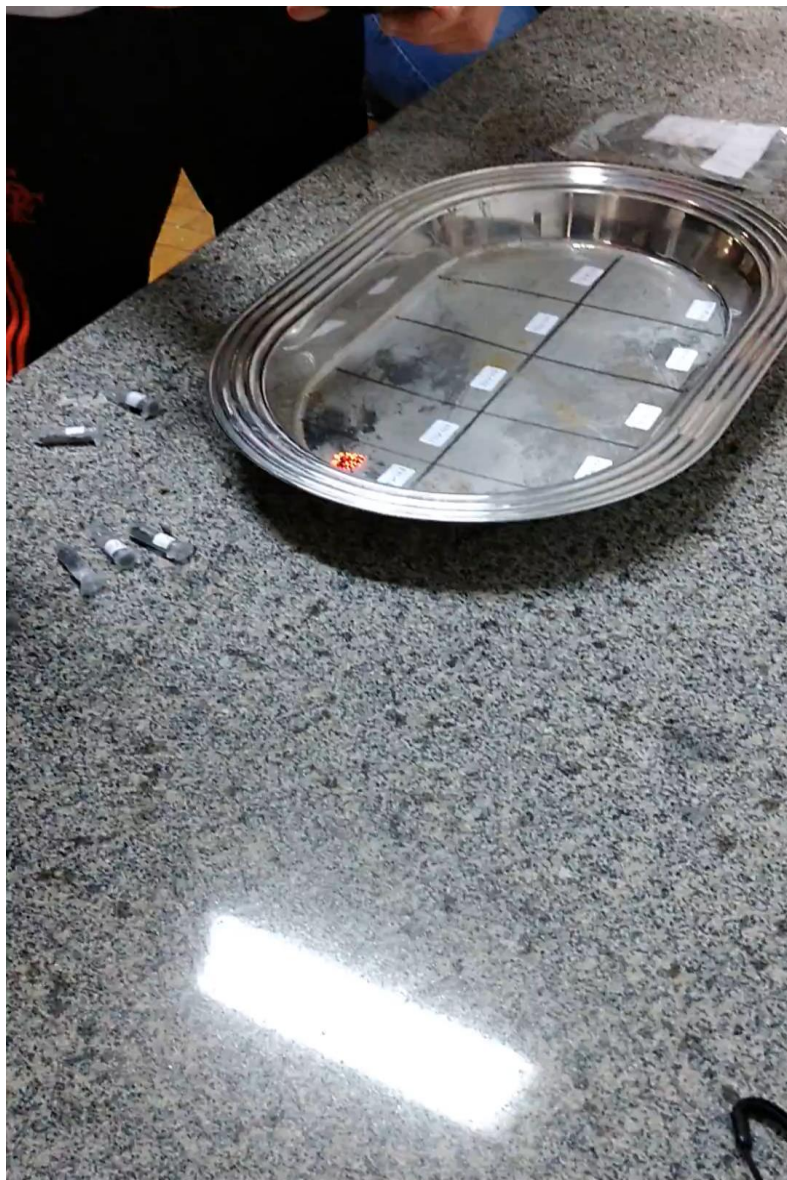


Moinho de jatos opostos

Principle of operation: *picojet* module



Combustão de pó NdFeB

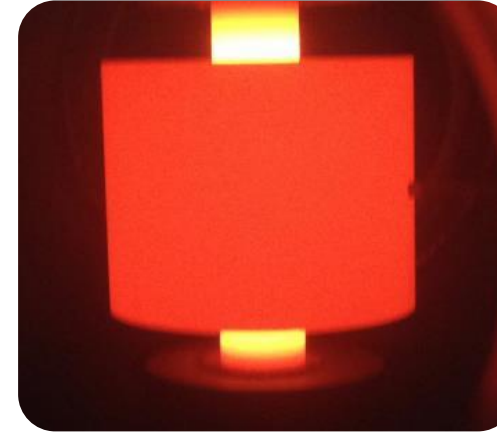
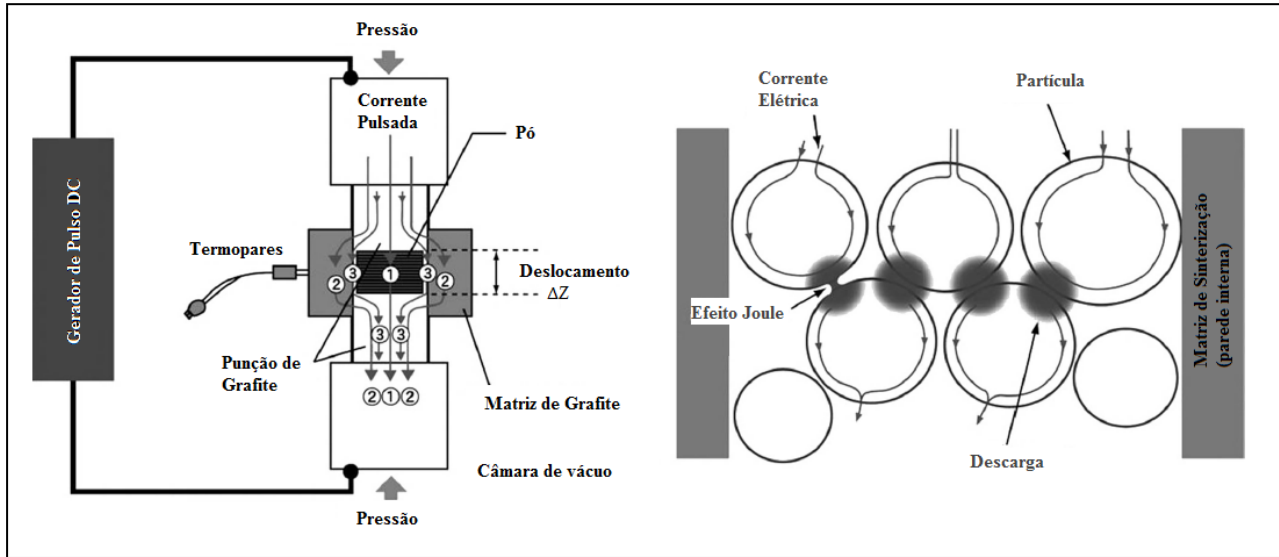


Nd-Fe-B sinterizados



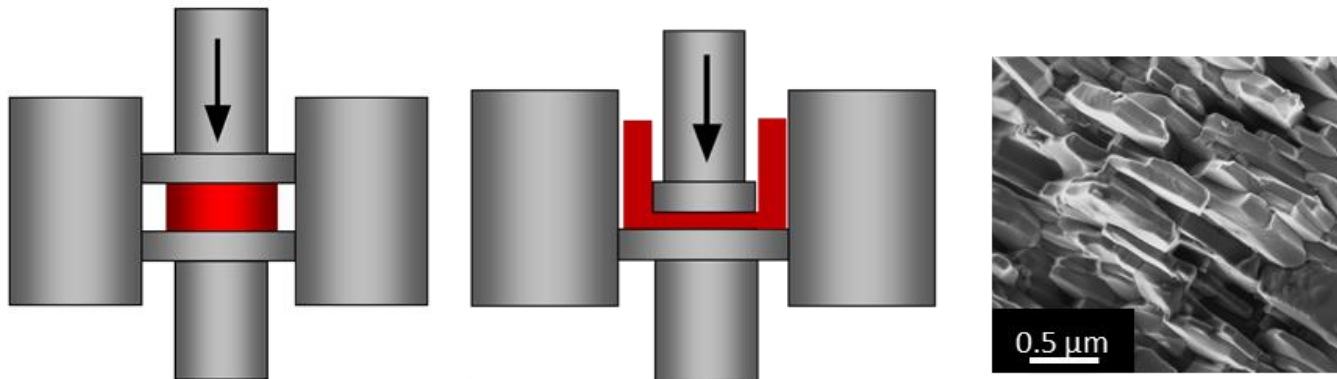
Técnicas de Consolidação

Compactação a quente:



(SOMIYA; TOKITA, 2013)

Deformação a quente:



Equipamentos específicos (\$\$)
Baixa produtividade

(https://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/permanent_magnetic_materials/hot_deformation.png)

Uso Racional de Materias-Primas Fabricação “NET-SHAPE”

Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

- Indústria Convencional Nd-Fe-B Sinterizados:

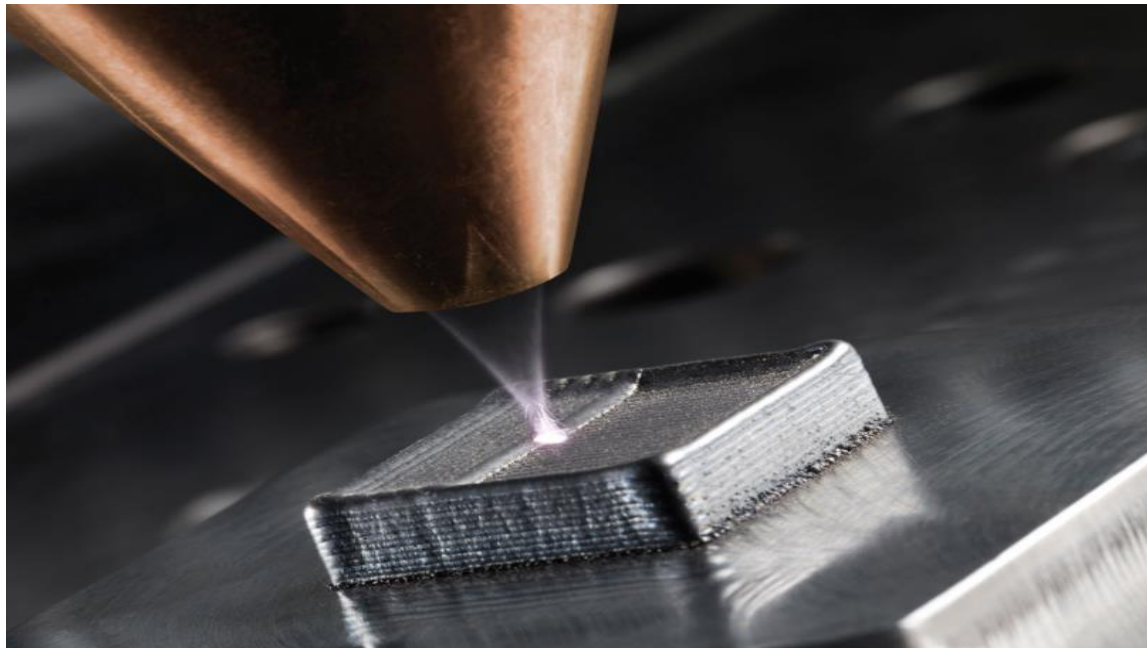
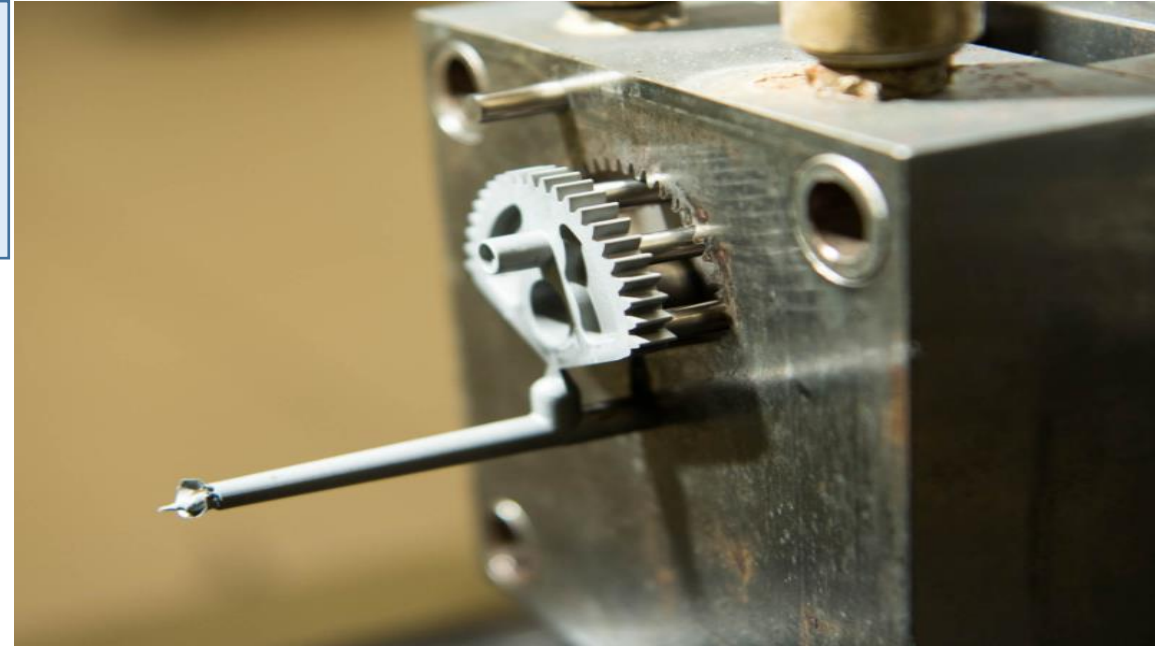
Ímãs Retangulares ou Cilíndricos		Perdas de Usinagem de 20 a 30% em peso
Ímãs em Formato de Arco		Perdas de Usinagem de 40 a 50% em peso
Ímãs em Formato de Anéis		Perdas de Usinagem de 50 a 70% em peso

Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

- Tecnologias *Net-Shape*, o que são?
 - Fabricação de componentes diretamente em sua forma final (*net-shape*), ou muito próximo à forma final (*near net-shape*)
 - Por quê?
 - Minimiza ou mesmo elimina processos secundários;
 - Maximiza aproveitamento da matéria prima;
 - Minimiza geração de resíduos.

Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

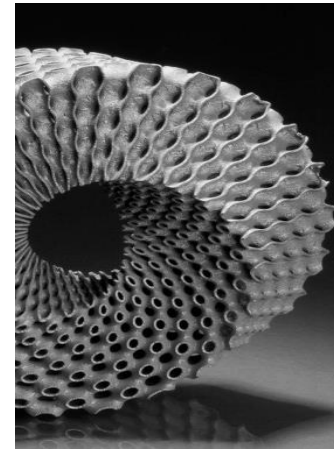
Moldagem de Pós por
Injeção



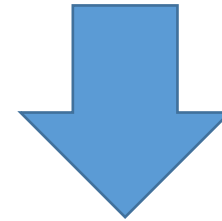
Manufatura Aditiva



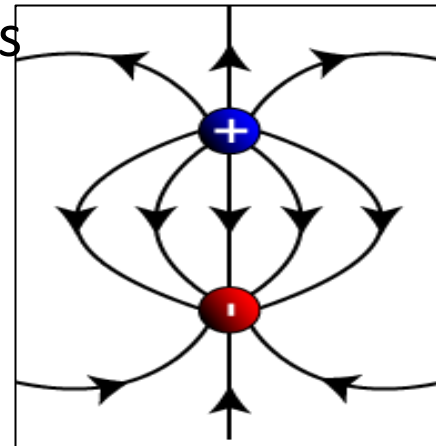
Eliminação ou diminuição da usinagem



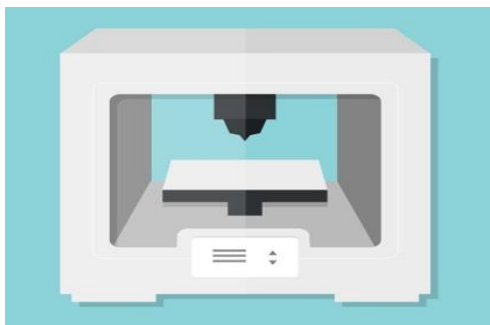
Obter geometrias complexas



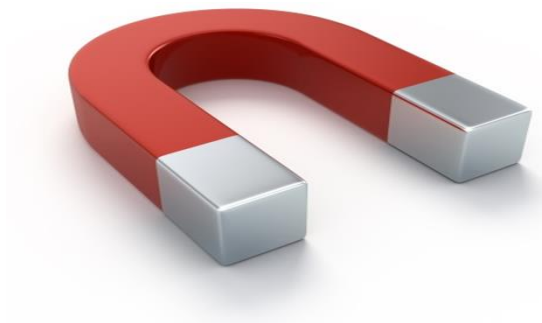
Materiais compósitos ou providos de gradientes



Controle sobre geometria das linhas de campo



MPI



Ímãs

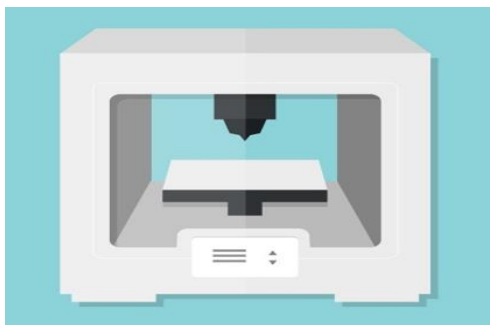
Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

- Moldagem de pós por Injeção

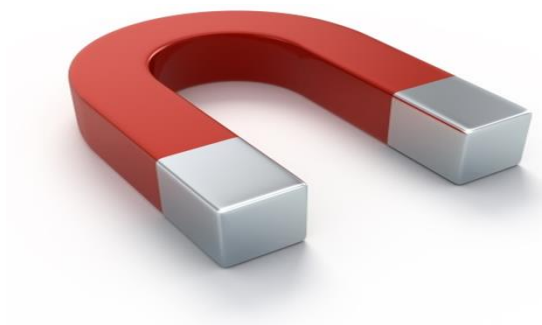


Obtenção de Ímãs *Met-Chane*





MA



Ímã



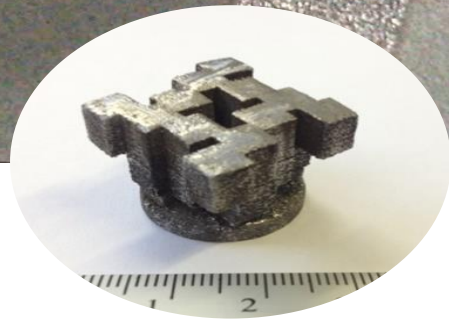
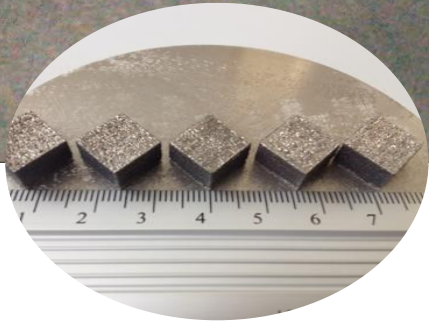
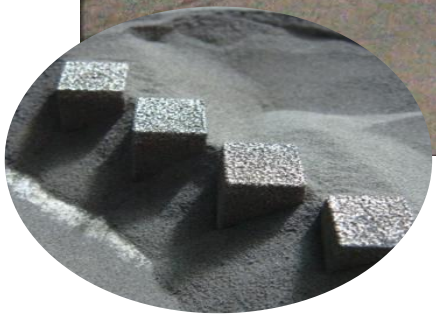
Histórico

2016

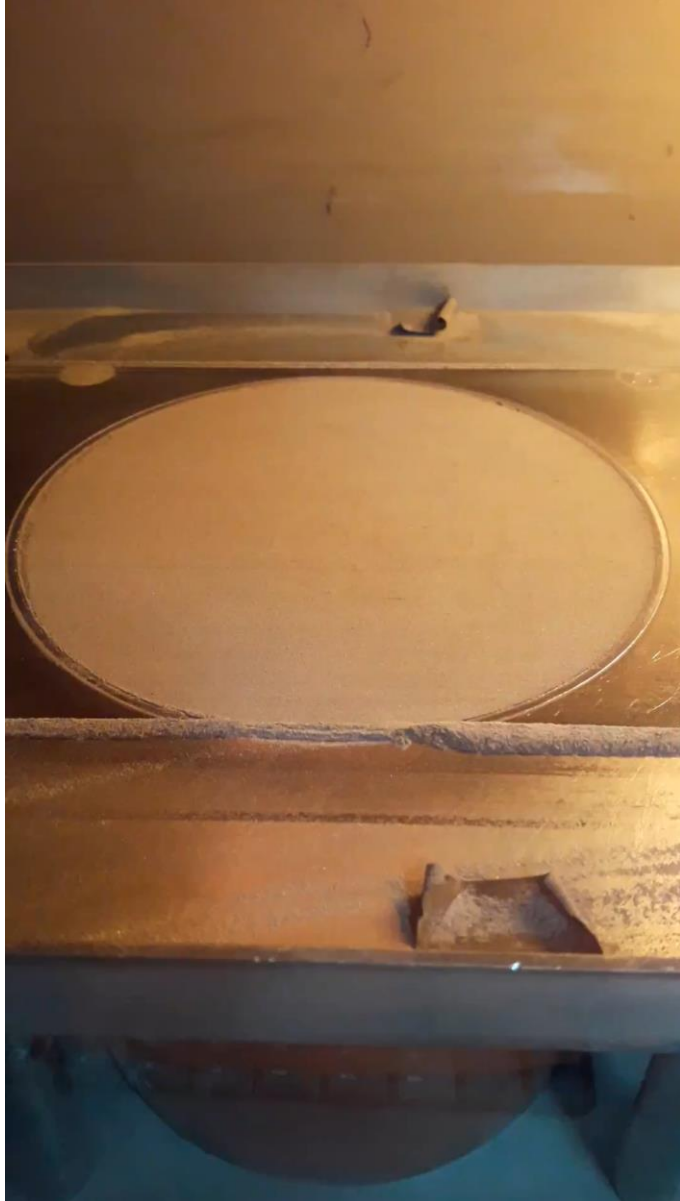
2017

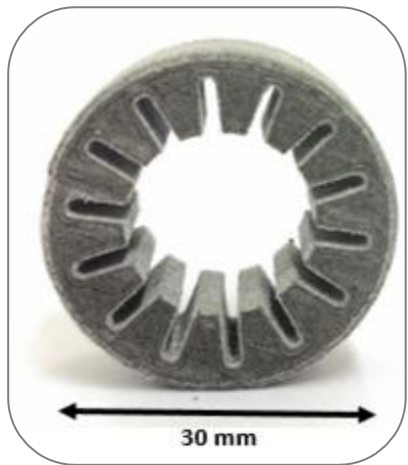
2018

2019

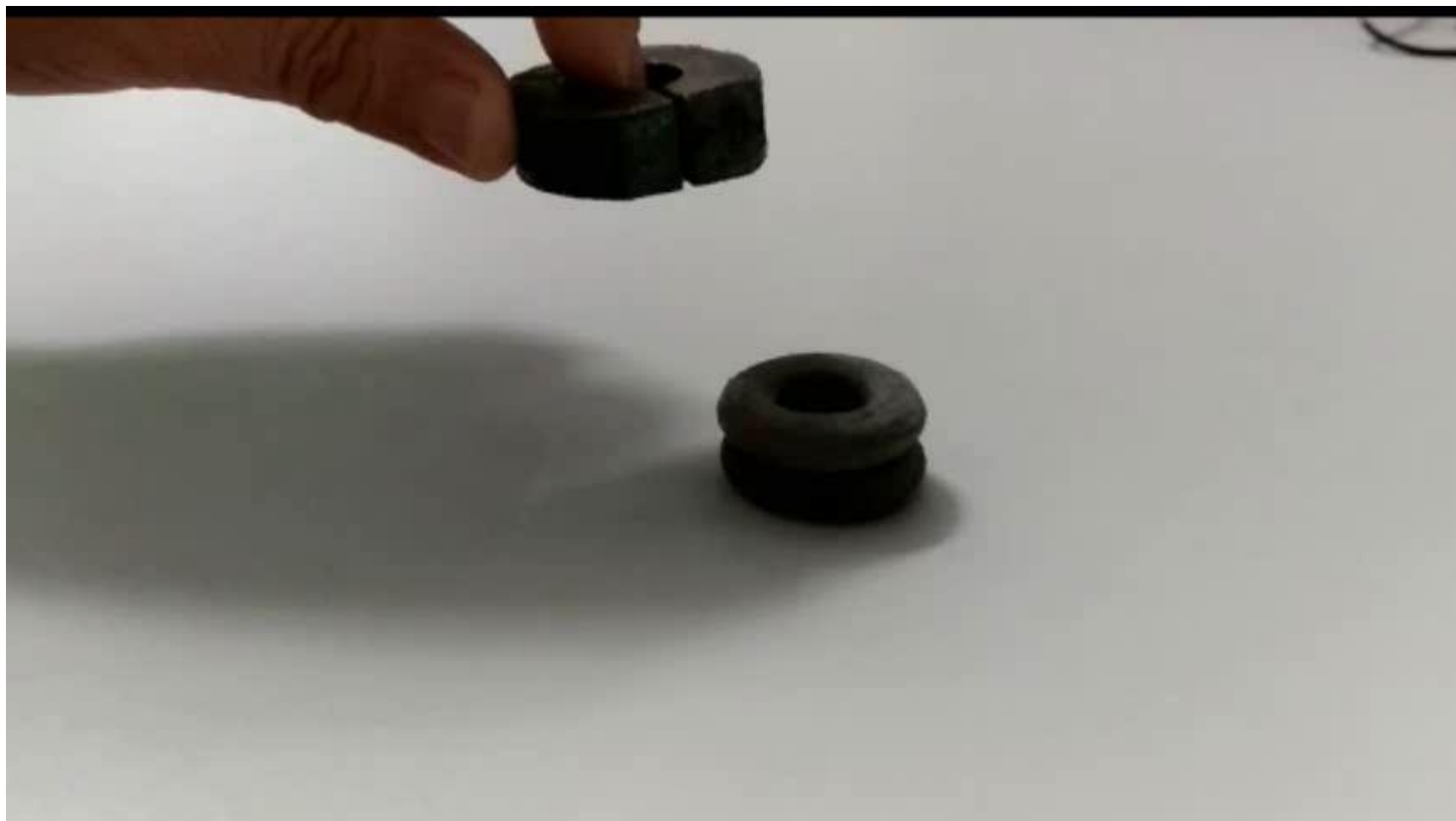


Manufatura Aditiva de ímãs permanentes de terras raras – Desenvolvidimentos



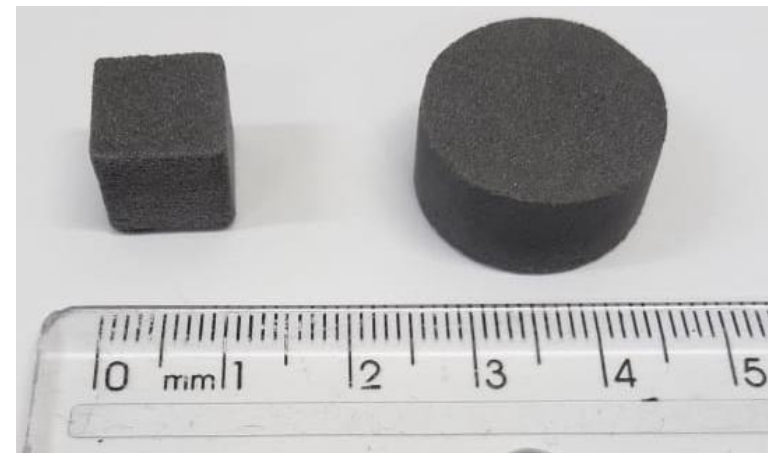
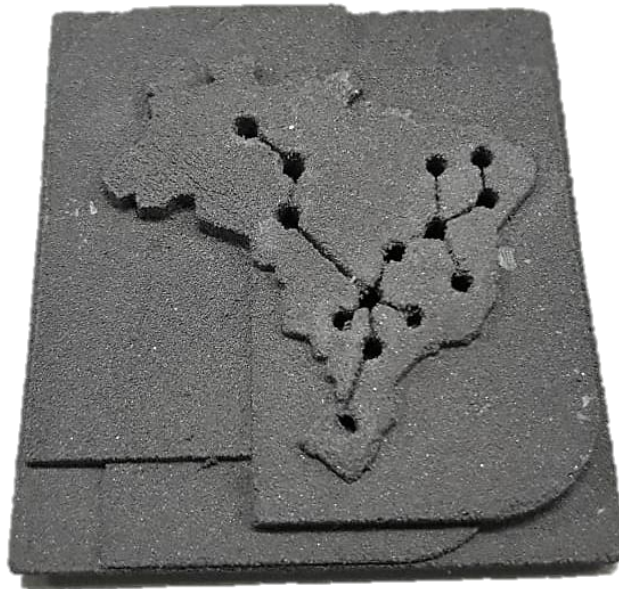


Geometrias complexas



Ímã compósito produzido por MA

Manufatura Aditiva de ímãs permanentes de terras raras – Desenvolvimentos



Manufatura Aditiva de ímãs permanentes de terras raras – Histórico e desenvolvimentos futuros

2017

- **Additive Manufacturing of Bonded Magnets – Effect of Process Parameters on Magnetic Properties**
- *Baldissera et al.* - <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2715722>

2018- 2019

- **Additive Manufacturing of Sm-Fe-N magnets**
- *Engerhoff et al.* - <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.04.012>

2019- 2020

- **Increasing Packing Density of Additively Manufactured Nd-Fe-B Bonded Magnets**
- *Fim et al.* - <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101353>.

2020-2021

- **Fusão em Leito de Pó de ímãs a base de Sm-Fe-N**
- *Msc. Melissa Röhrig*

2020-2021

- **Ímãs anisotrópicos de Nd-Fe-B obtidos por Manufatura Aditiva**
- *Msc. Rafael Gitti*

Conclusão

- **Iniciativas importantes em mineração e separação de TRs, além de desenvolvimentos de produtos como ímãs estão se fortalecendo no Brasil e devem ser apoiadas por programas de PD&I**
- **Os desafios científicos e tecnológicos vencidos abrirão espaço para novas aplicações e, portanto, momento de inovar e estabelecer a cadeia produtiva no Brasil para atender as novas demandas **é agora.****
- **Não podemos esperar o bonde passar.**
- **Cooperacao em Nivel Nacional e Internacional pode ser chave para encurtar o caminho.**

