

**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

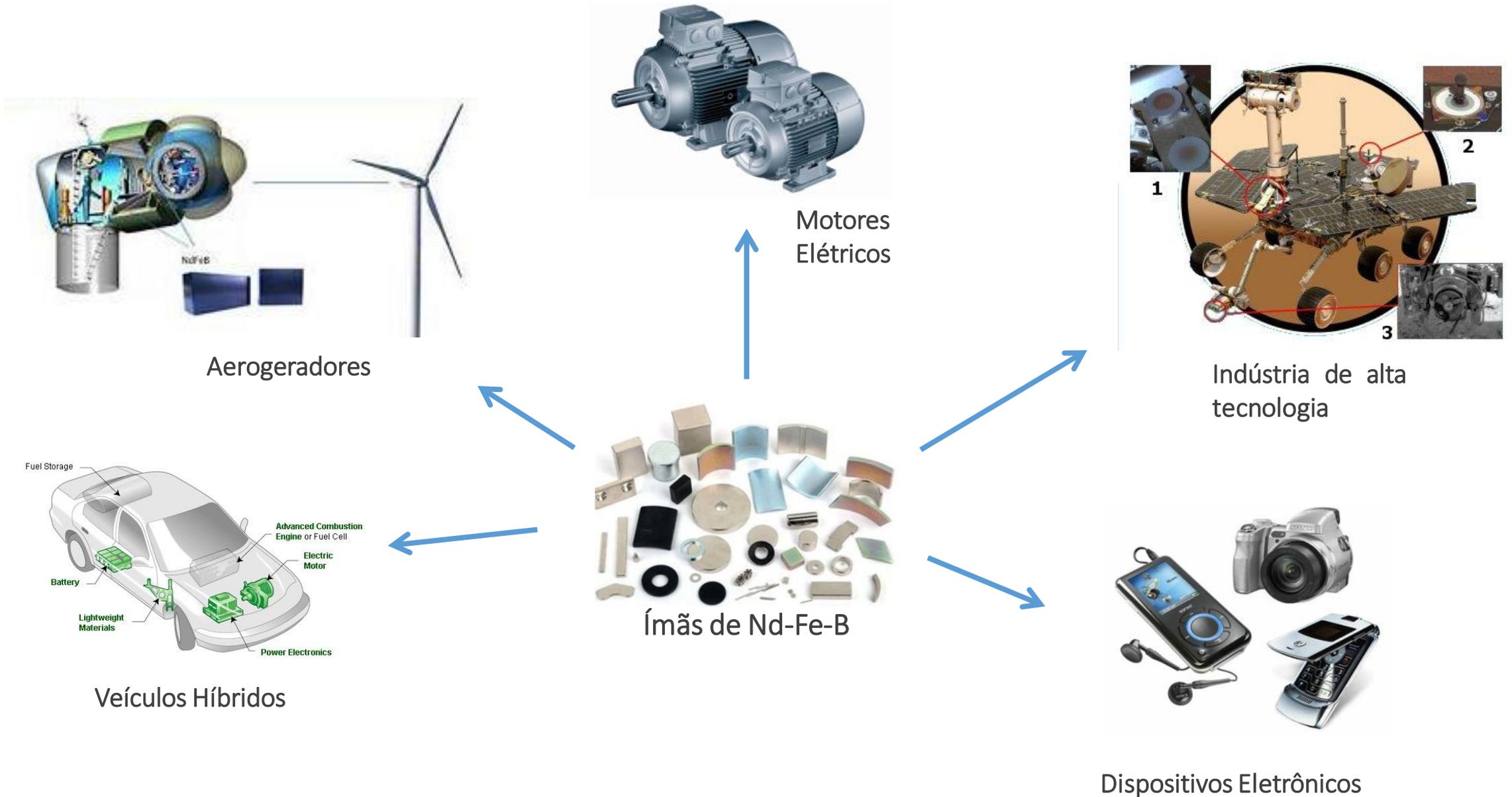


# AGREGACAO DE VALOR: Ímãs de Terras Raras

Value Chain for Didymium-Fe-B Magnets:



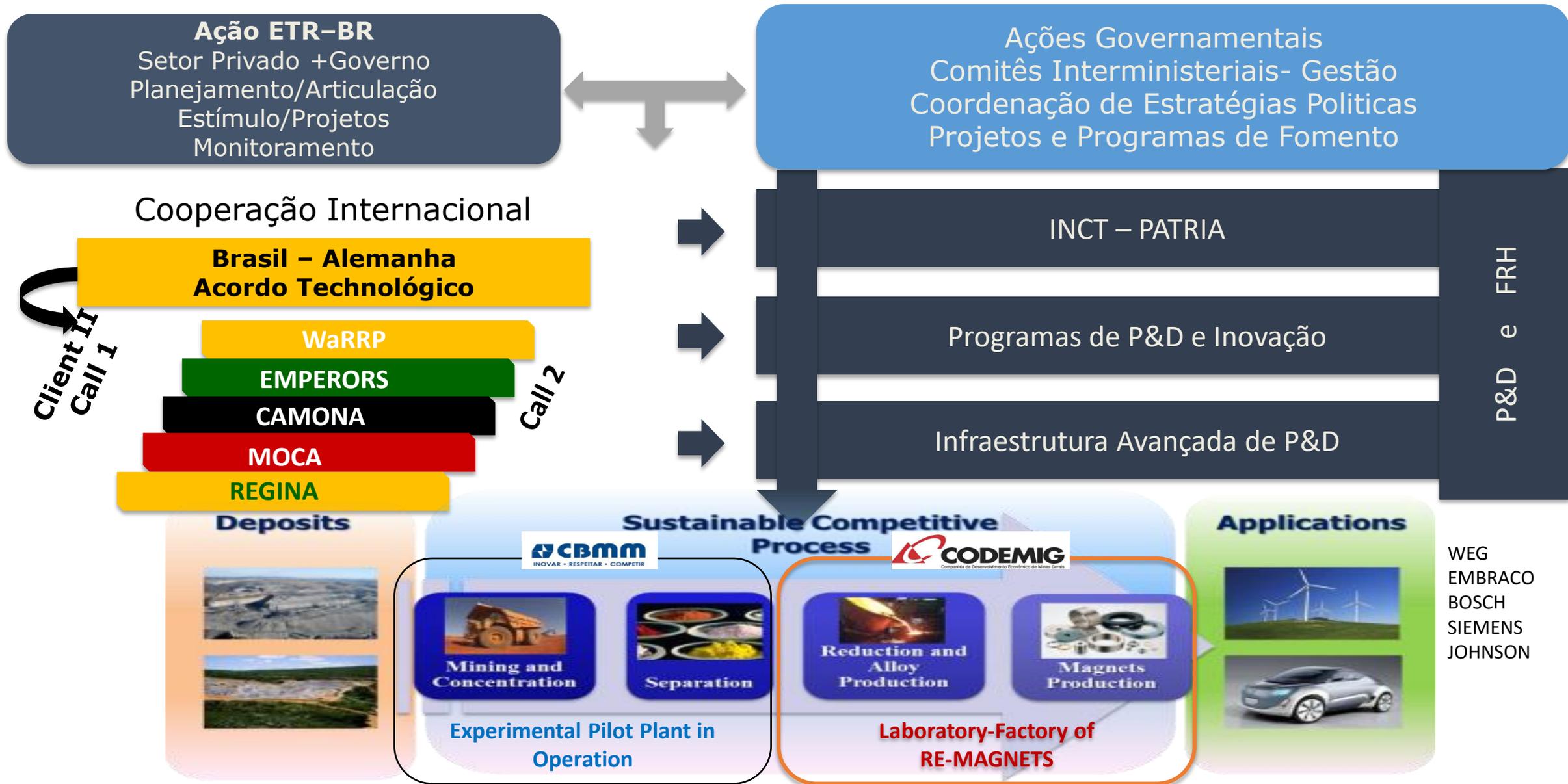
# Introdução: Aplicações de ímãs de Nd-Fe-B



# BRAZILIAN INSTITUTIONS



# Formação do Projeto de Cooperação em TRs

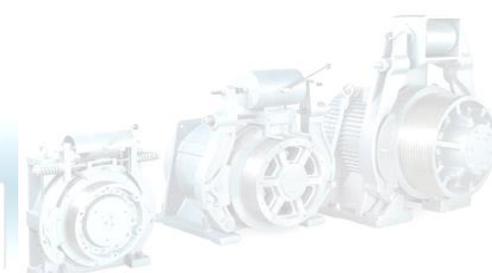
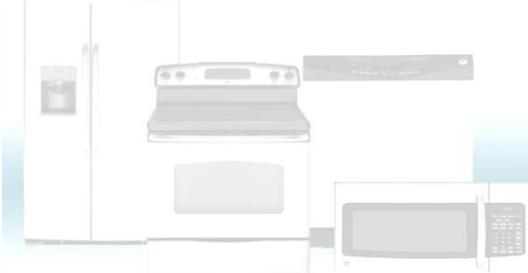




# German – Brazilian WORKSHOP



**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**

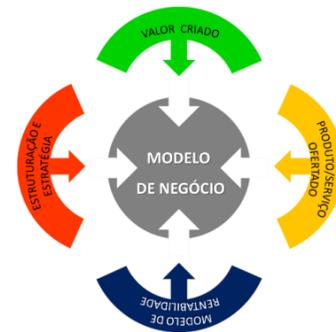
Fabricação de  
Ligas

**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

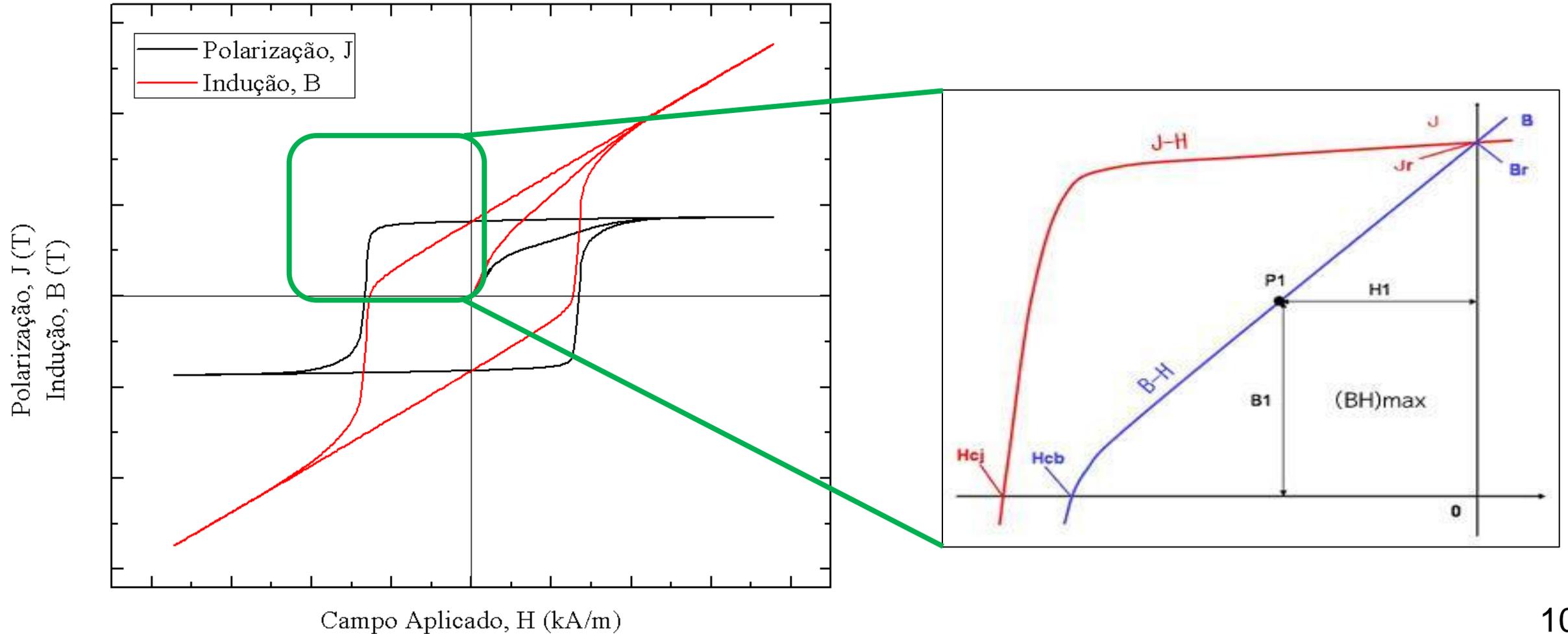
# Histerese magnética

## Curva JxH:

Resposta do material frente a um campo magnético

## Curva BxH:

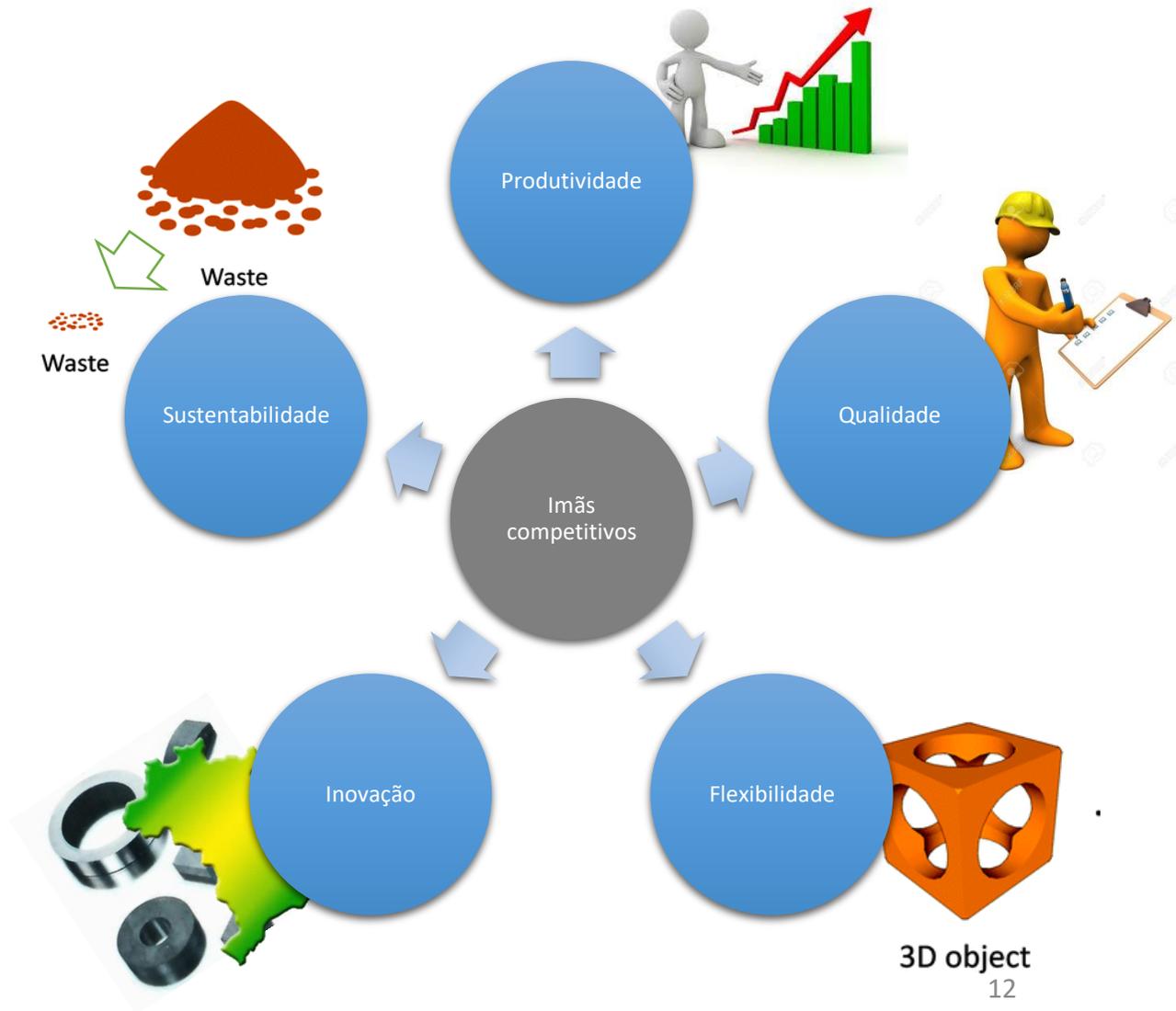
$$B = \mu_0 H + J$$



# Desafios Tecnológicos

## *Produção de Ímãs*

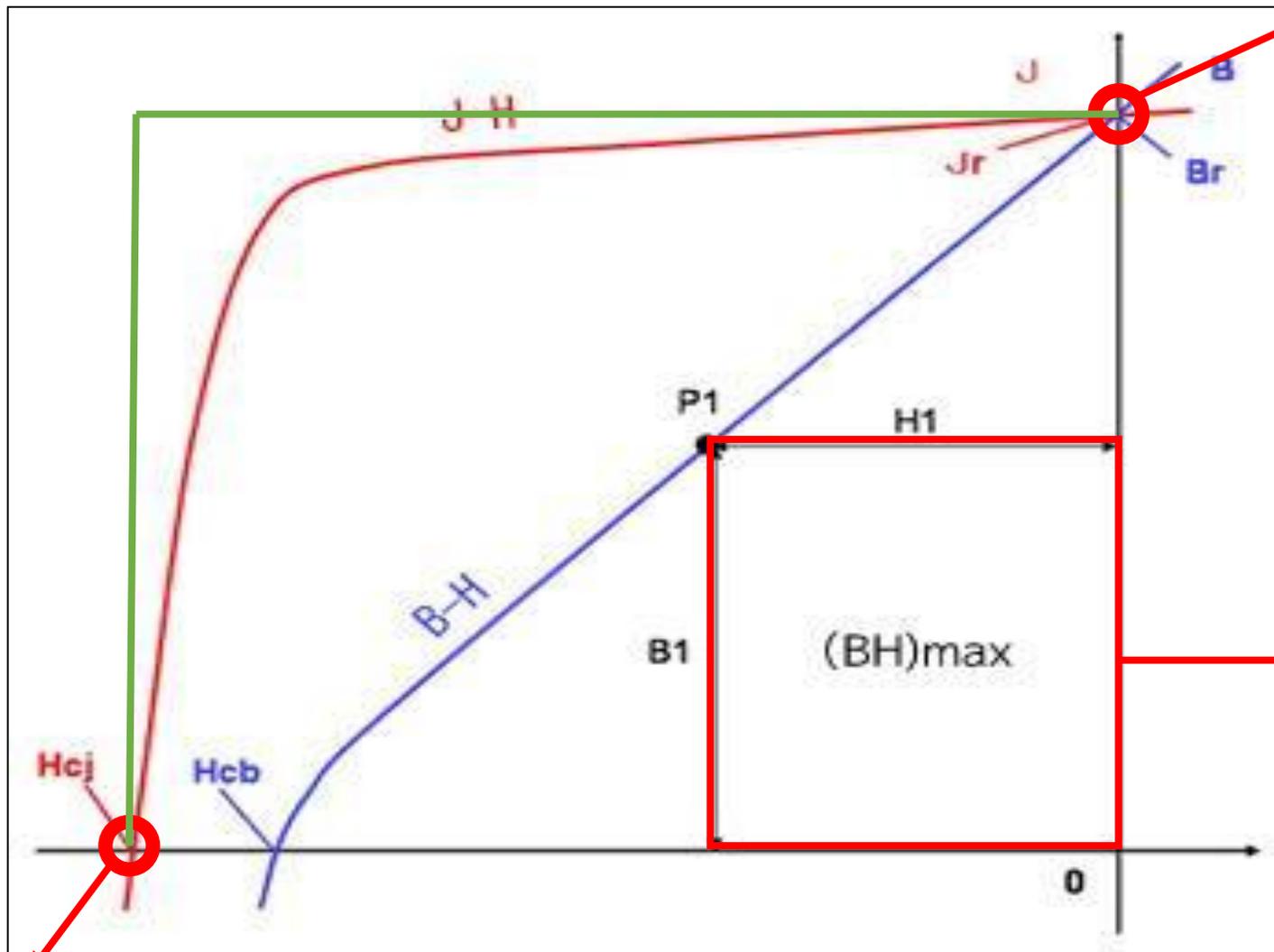
# Desafios Científicos e Tecnológicos



# Uso Racional de Materias-Primas

# Segundo Quadrante: Curva de desmagnetização

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



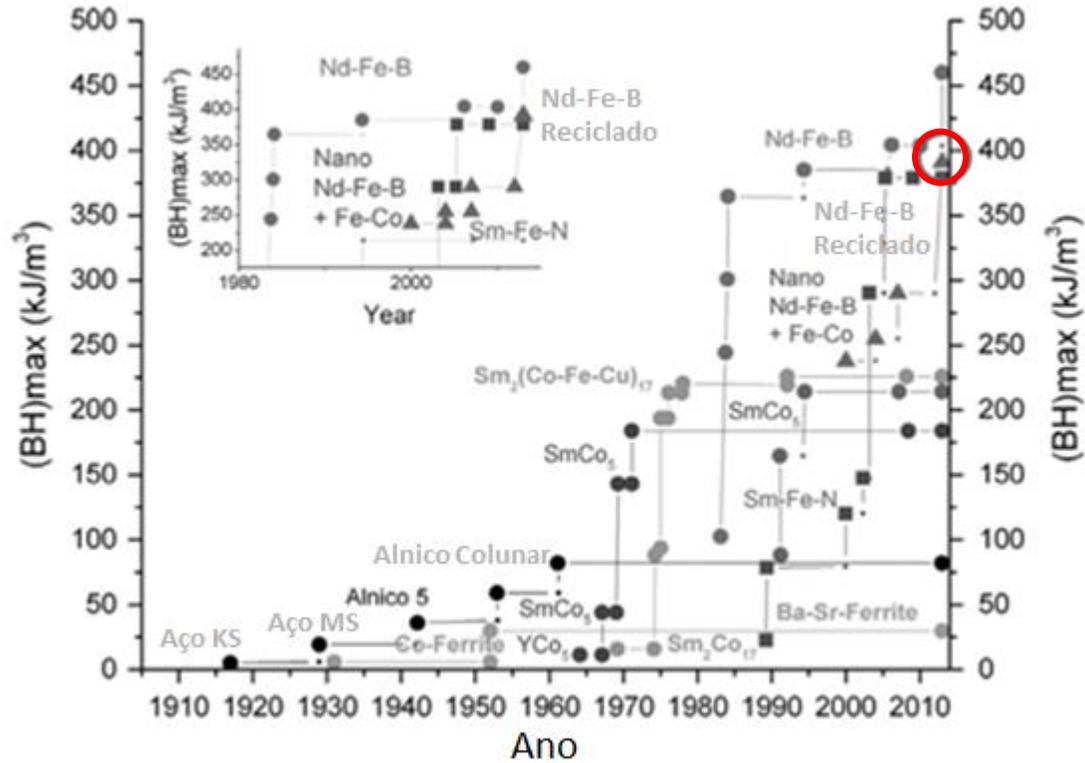
$$B = \mu_0 H + J$$

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

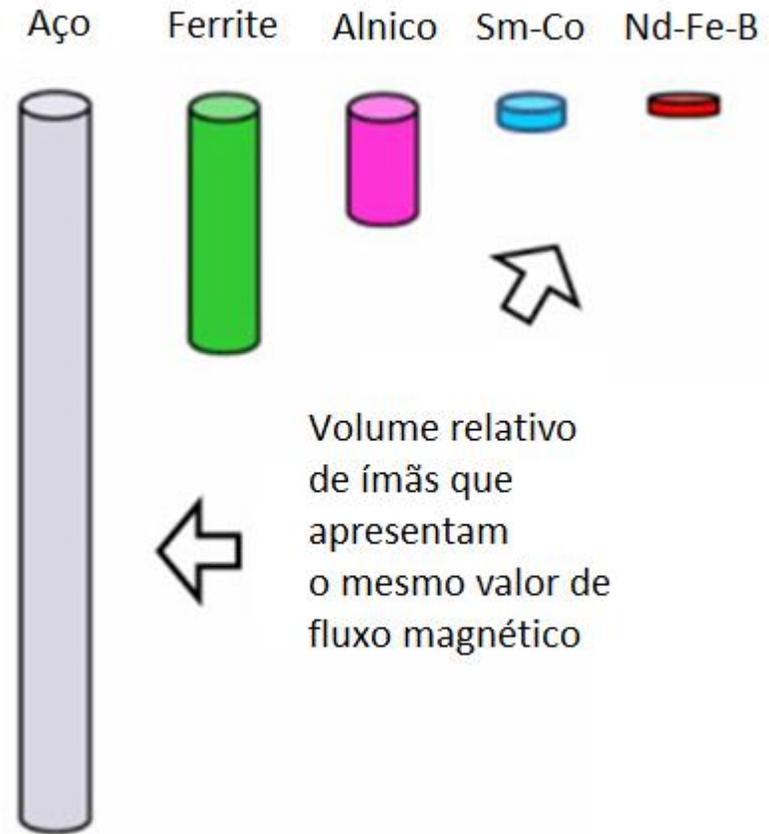
Produto-energia máximo,  
 $(BH)_{max}$  ( $\text{kJ/m}^3$ )

Coercividade,  $H_{cj}$  ( $\text{kA/m}$ )

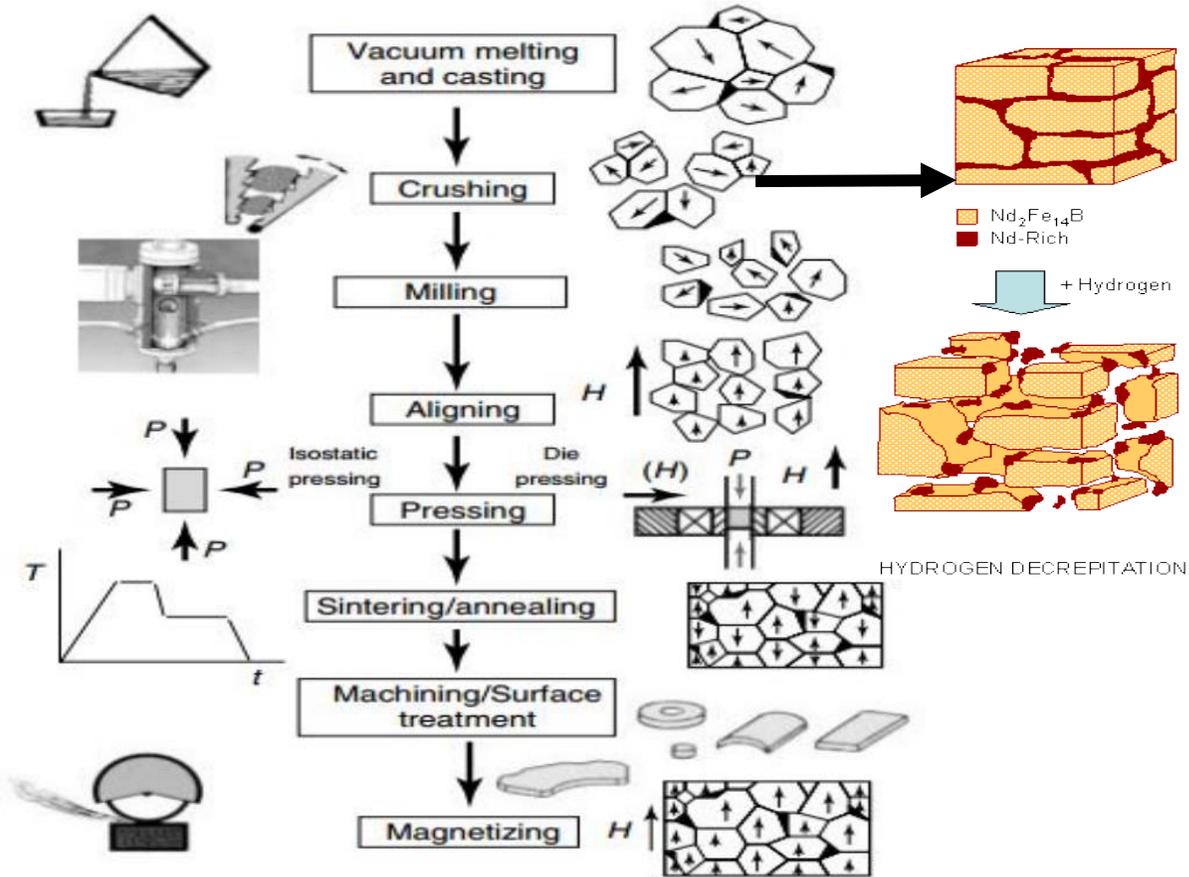
# Introdução: Tipos de Ímãs Permanentes



(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

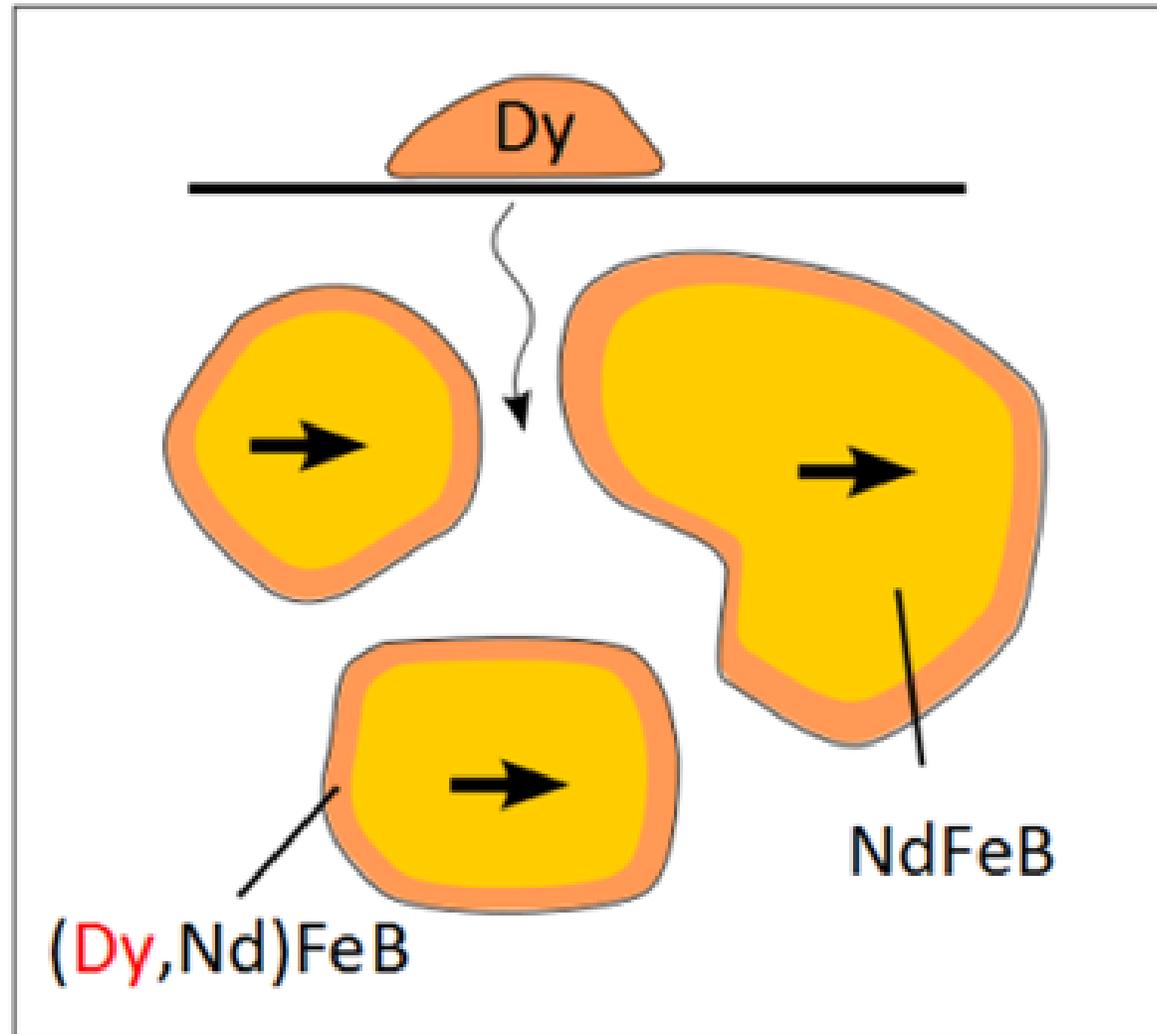
**Dy, Tb** Aumento da Temperatura de operação dos ímãs

**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



# Inovações & Tecnologias

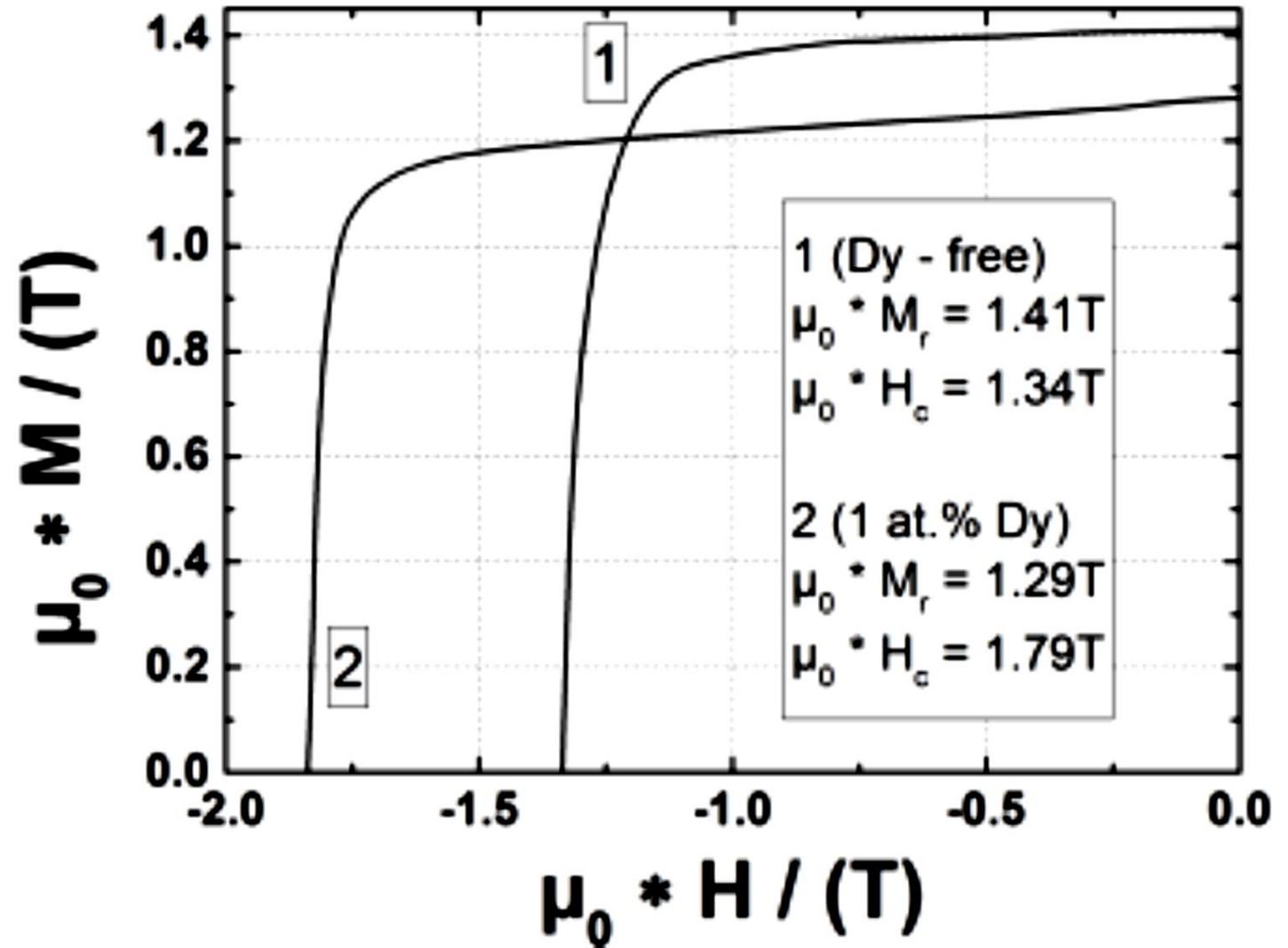
Necessidade de Adição de Elementos Críticos como Disprósio (Dy) e Térbio (Tb)

↑ Dy e Tb

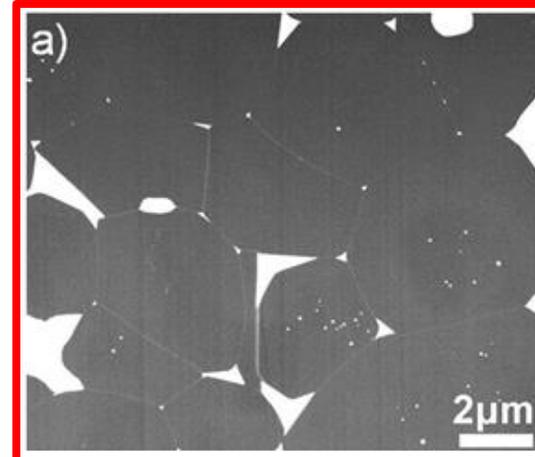
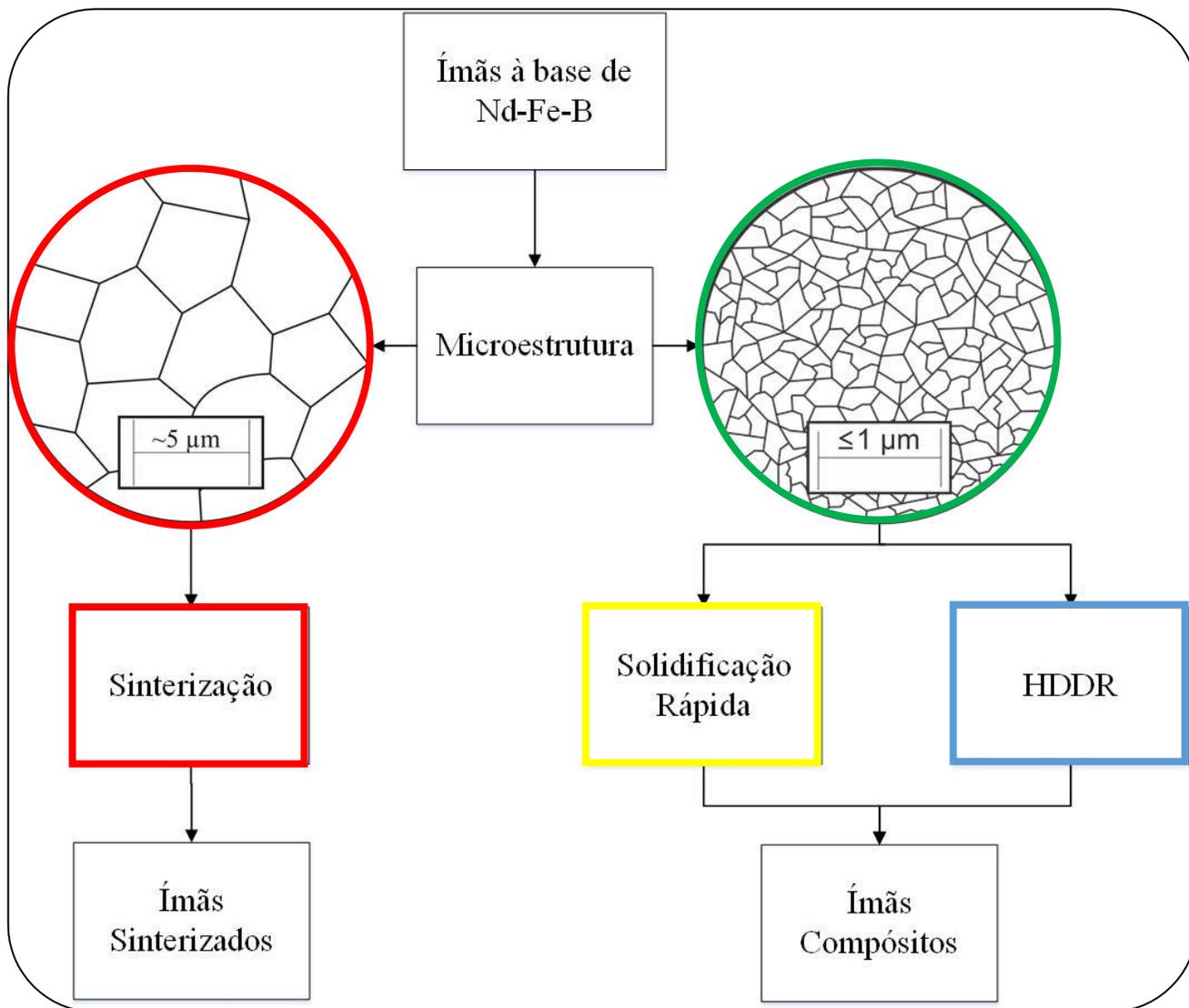
↑ Resistência à Desmagnetização (necessário para aplicações em altas temperaturas)

↓ Fluxo Magnético

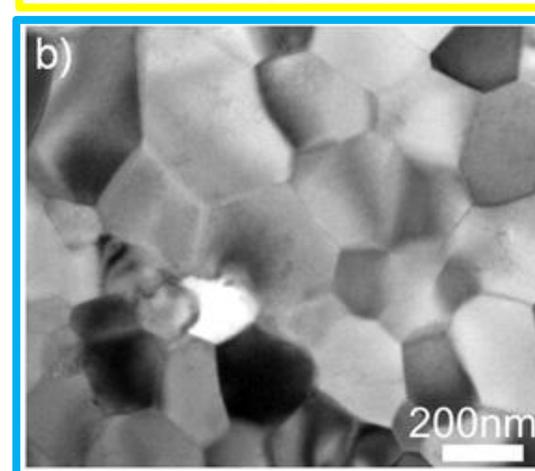
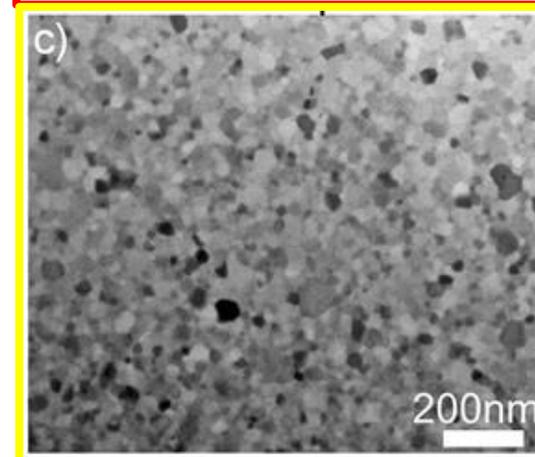
↑ CUSTO FINAL DO ÍMÃ



# Tipos de Ímãs de Nd-Fe-B



Elevada densificação > 95%

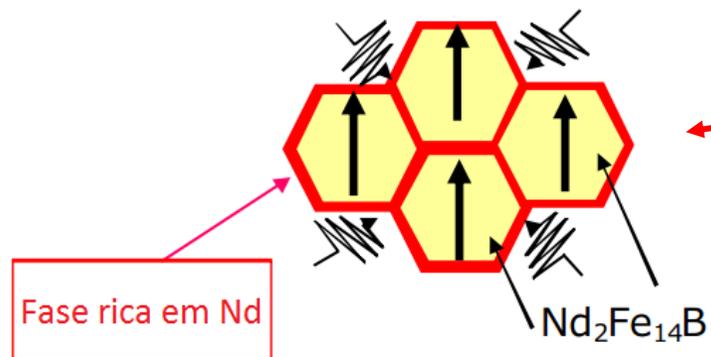


Pós misturados com resina Diluição da densidade de energia do ímã em fase polimérica

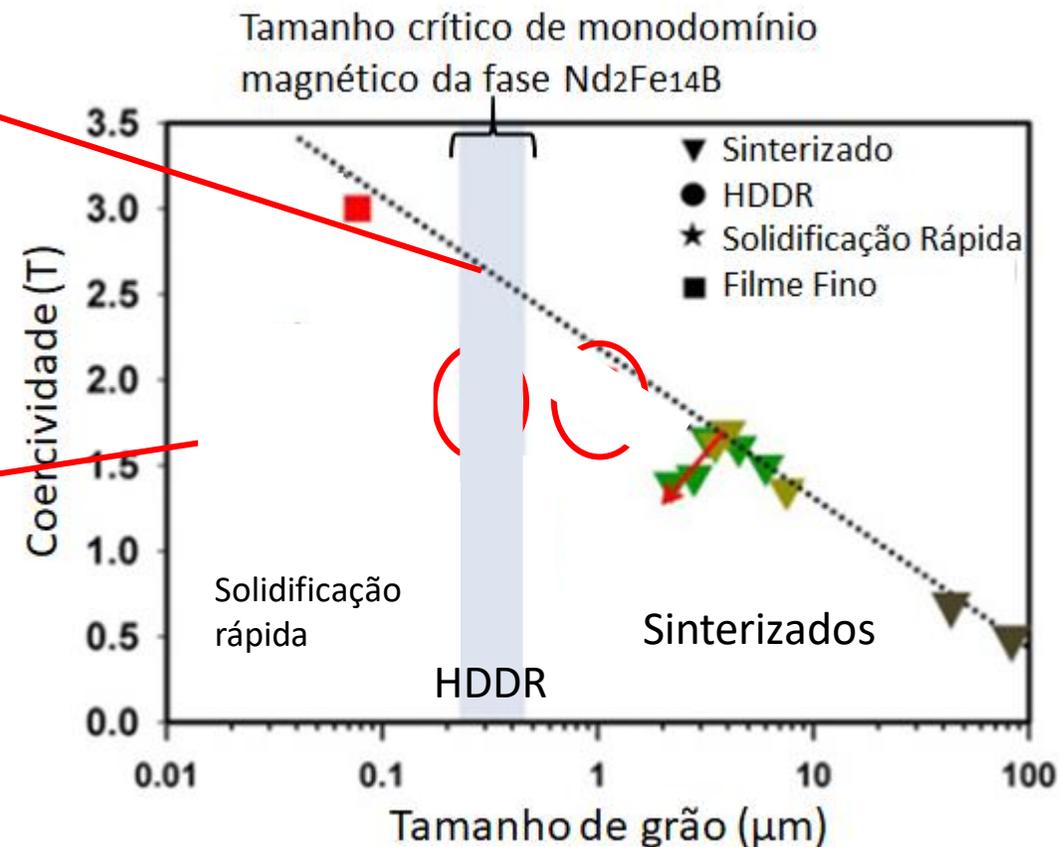
# Redução do tamanho de grão

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

(RAMESH; SRIKRISHNA, 1988)

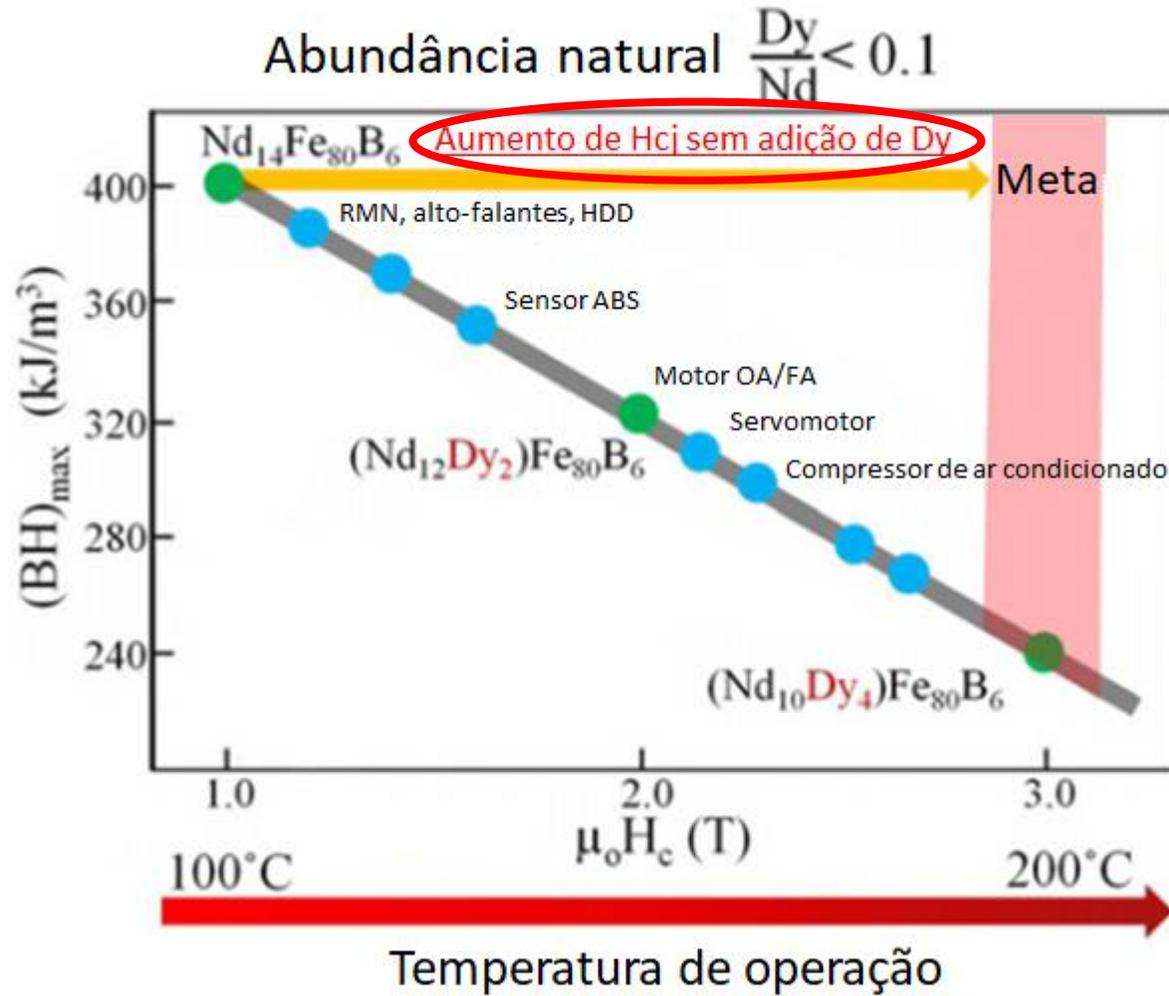


(SEPEHRI-AMIN, H. et al, 2010)

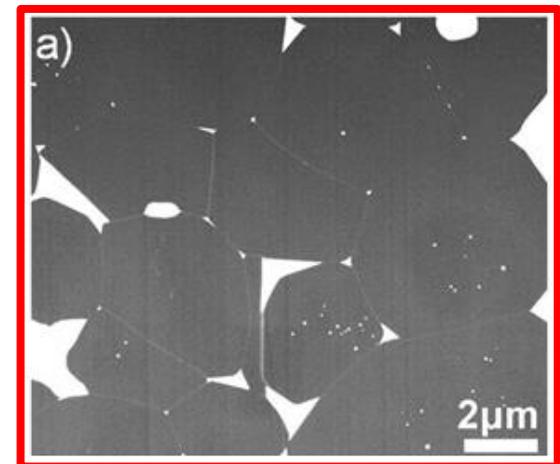
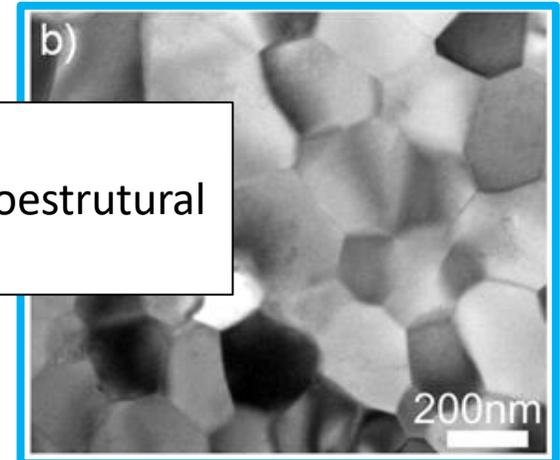
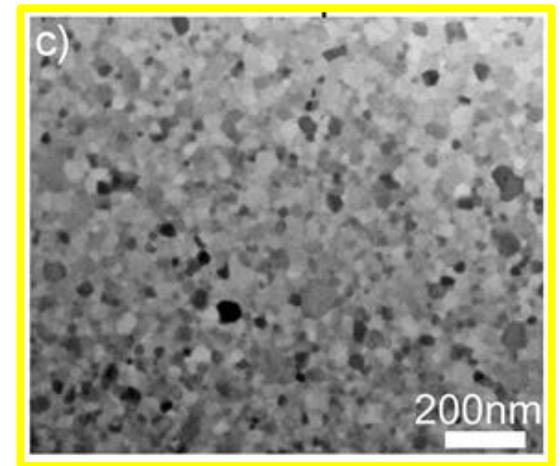


(HONO; SEPEHRI-AMIN, 2012)

# Requisitos para aplicações

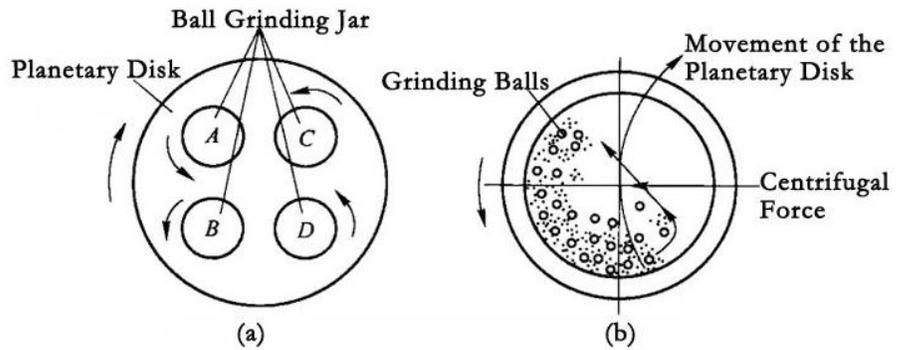


Refino de grão  
+ Engenharia Microestrutural  
↑ Coercividade



# Nd-Fe-B sinterizados

## Moinho planetário



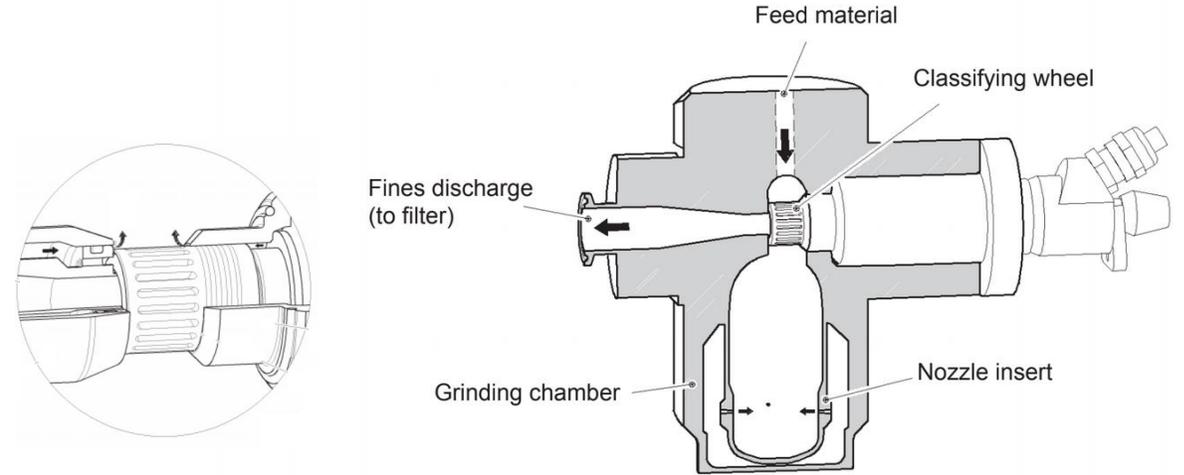
Working Principle of Lab Planetary Ball Mill

(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

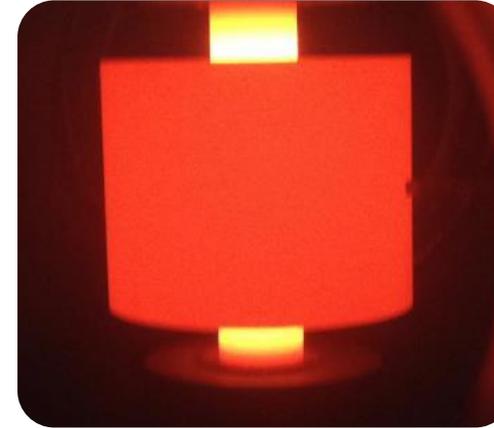
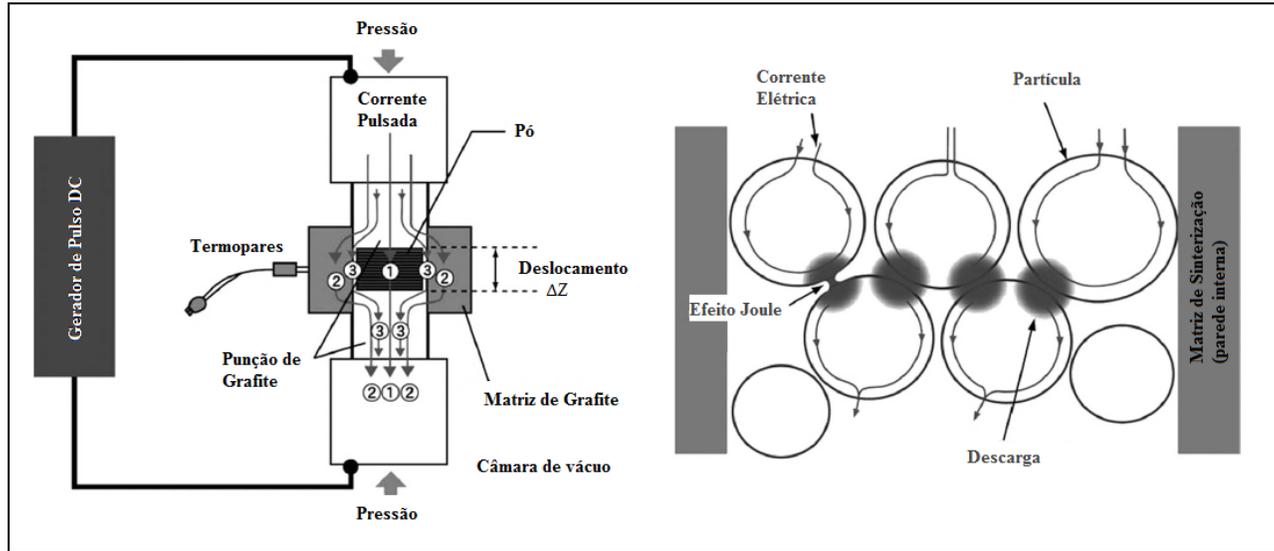


## Nd-Fe-B sinterizados



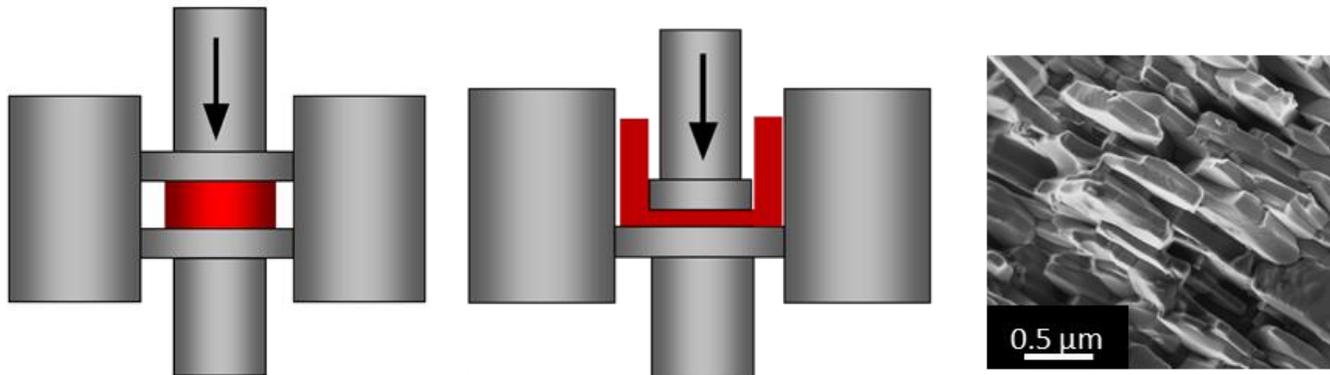
# Técnicas de Consolidação

Compactação a quente:



(SOMIYA; TOKITA, 2013)

Deformação a quente:



Equipamentos específicos (\$\$)  
Baixa produtividade

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

# Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

- Indústria Convencional Nd-Fe-B Sinterizados:

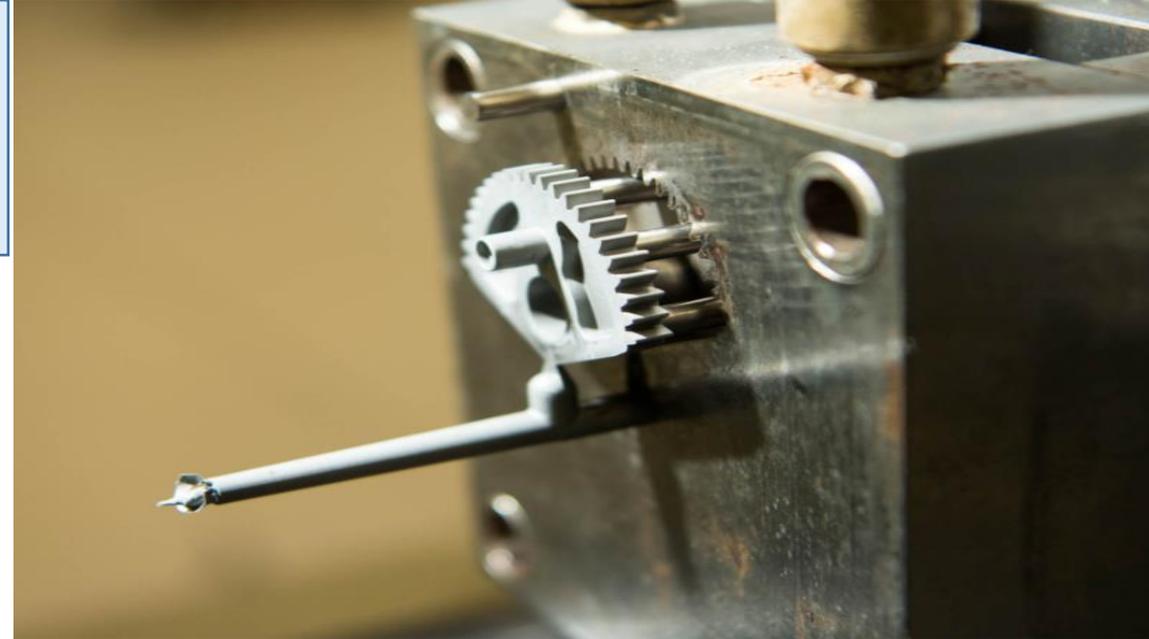
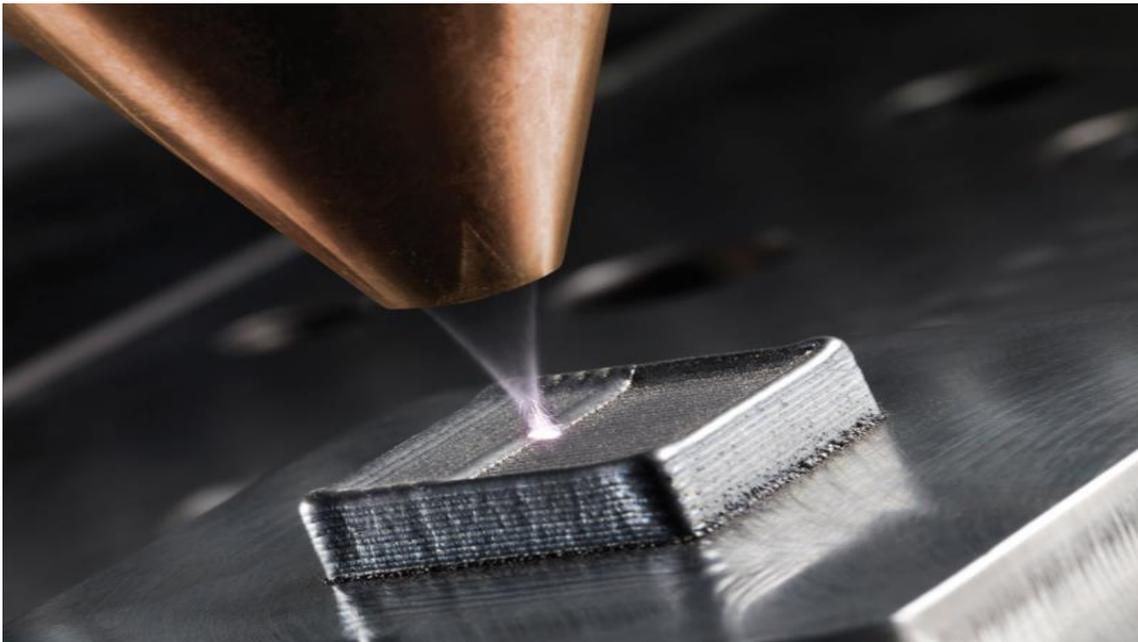
<b>Ímãs Retangulares ou Cilíndricos</b>		<b>Perdas de Usinagem de 20 a 30% em peso</b>
<b>Ímãs em Formato de Arco</b>		<b>Perdas de Usinagem de 40 a 50% em peso</b>
<b>Ímãs em Formato de Anéis</b>		<b>Perdas de Usinagem de 50 a 70% em peso</b>

# 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

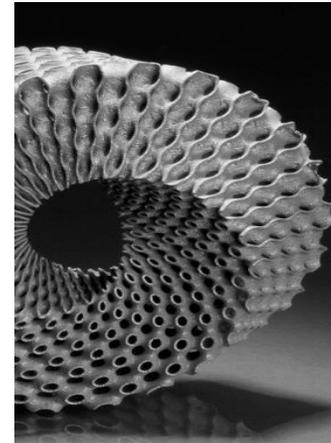


Manufatura Aditiva

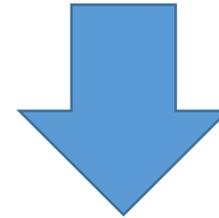




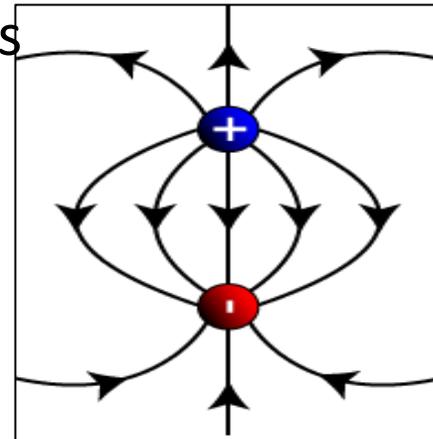
Eliminação ou diminuição da usinagem



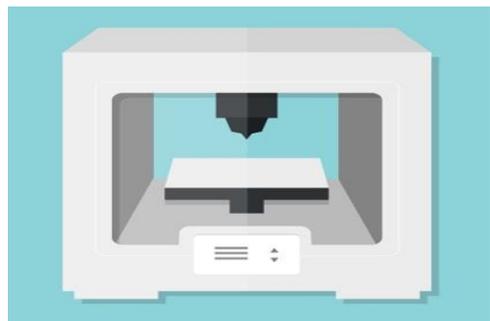
Obter geometrias complexas



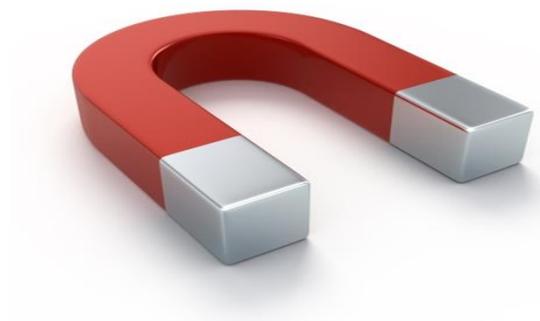
Materiais compósitos ou providos de gradientes



Controle sobre geometria das linhas de campo



MPI



Ímãs

# Obtenção de Ímãs *Net-Shape*

- Moldagem de pós por Injeção

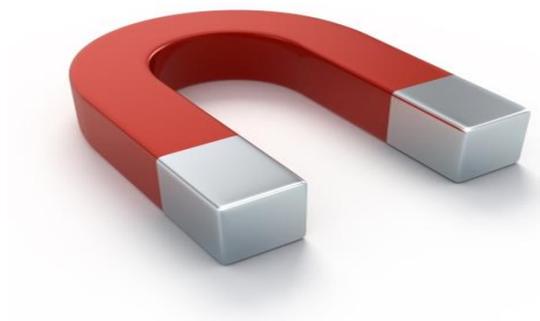


# Obtenção de Ímãs *Met-Chane*





MA



Ímã



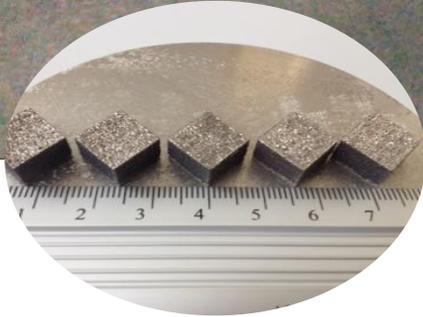
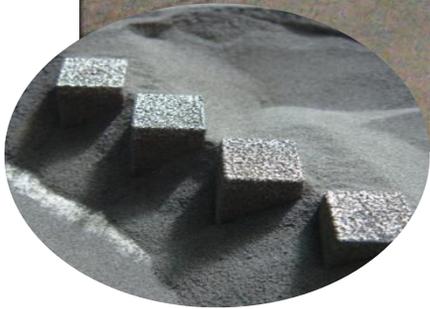
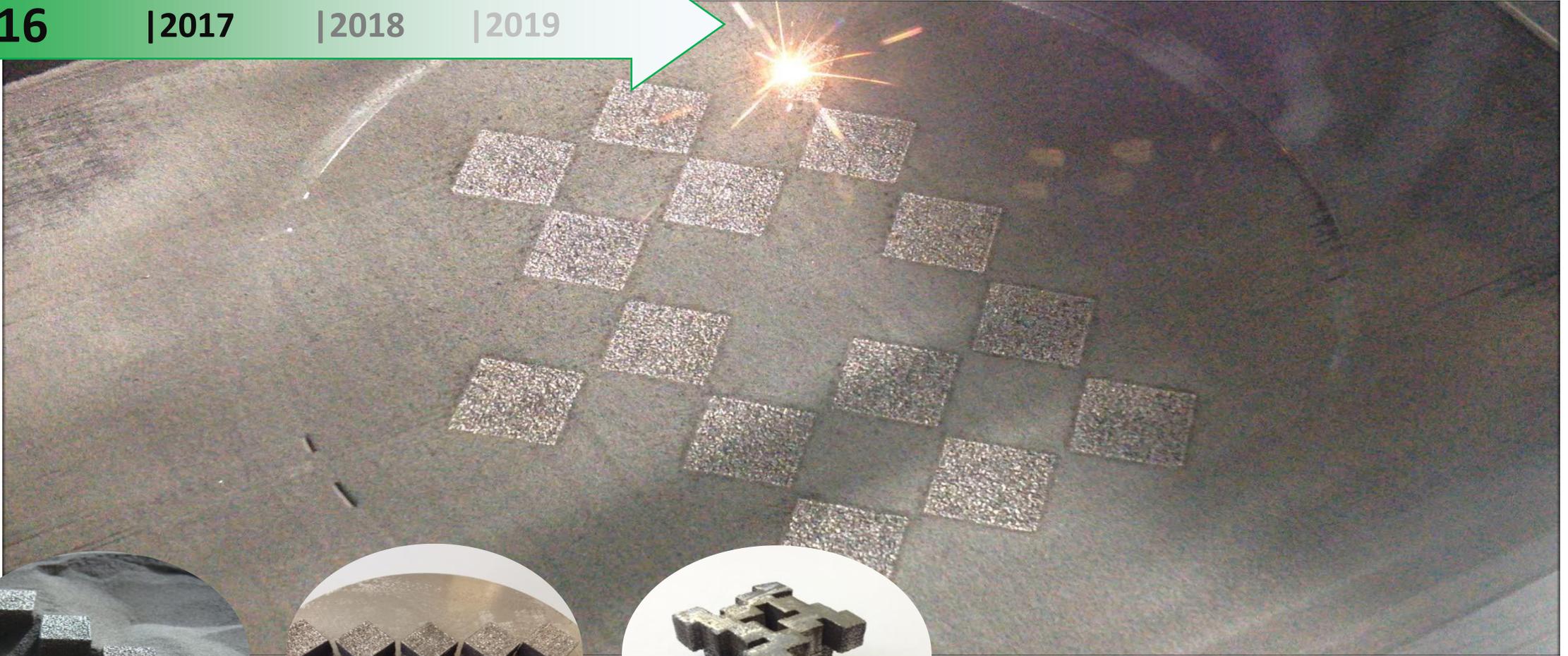
# Histórico

2016

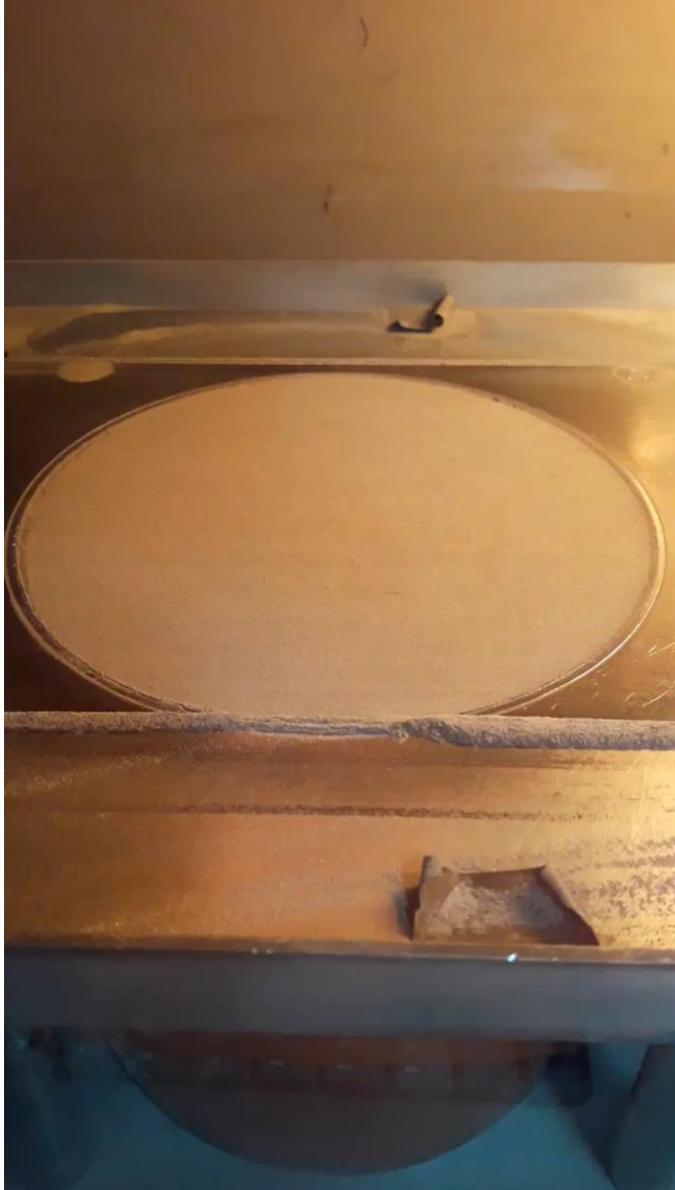
2017

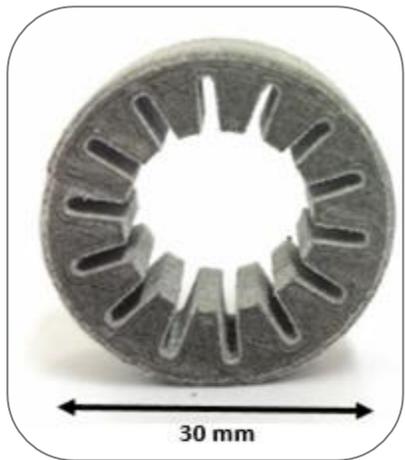
2018

2019

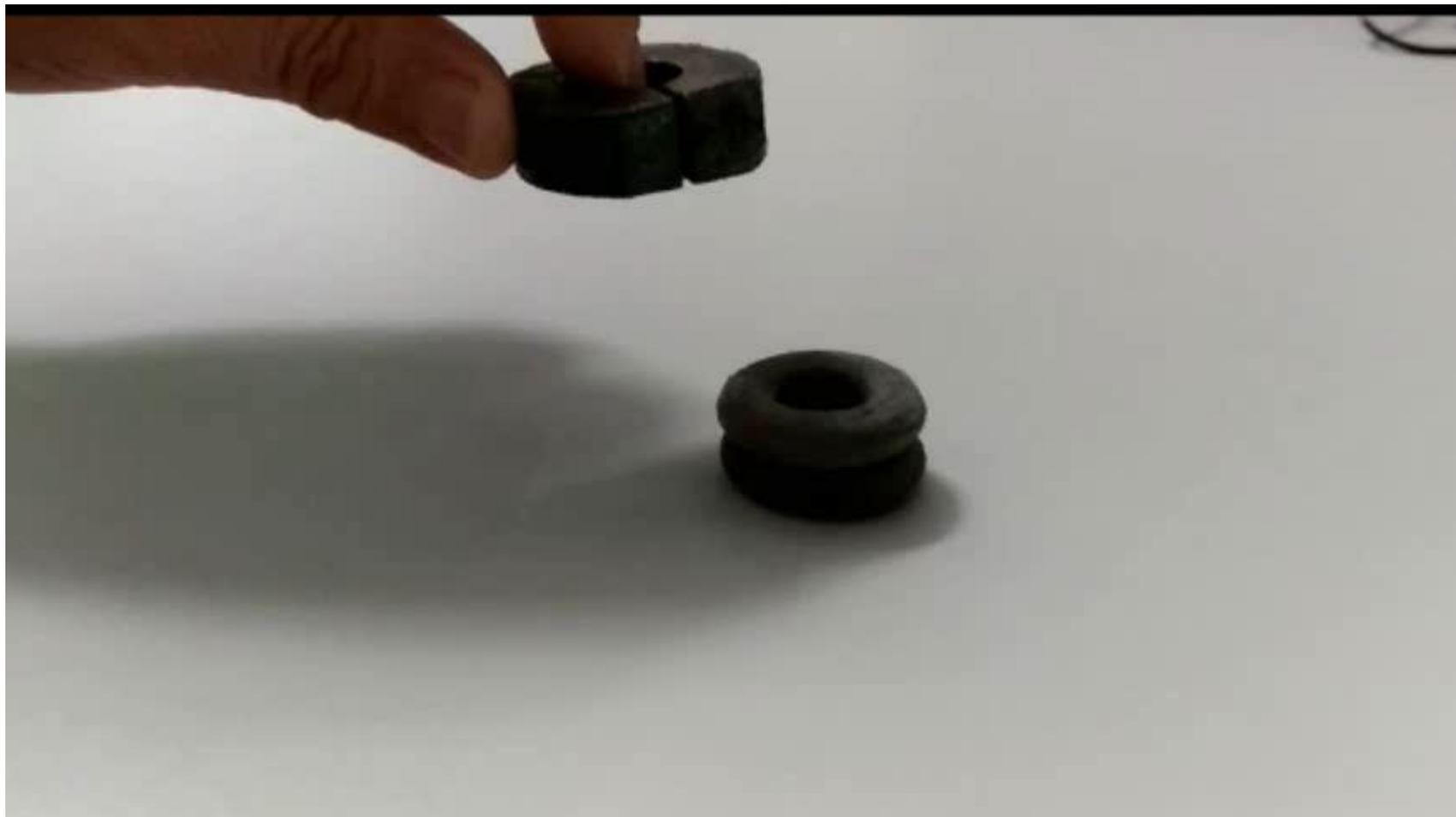


# Manufatura Aditiva de ímãs permanentes de terras raras – Desenvolvimentos



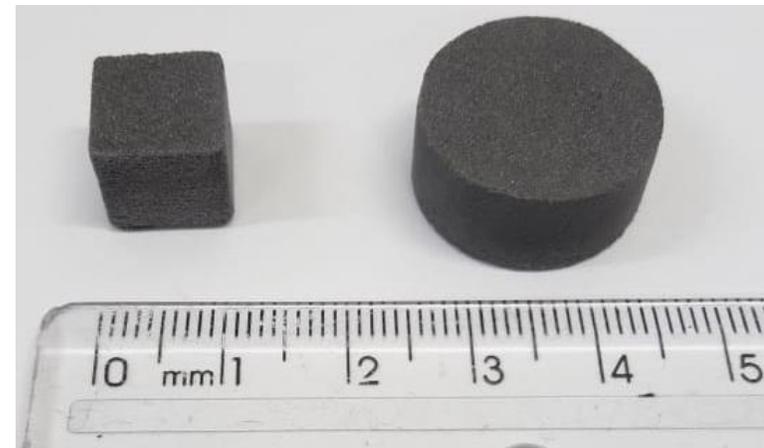
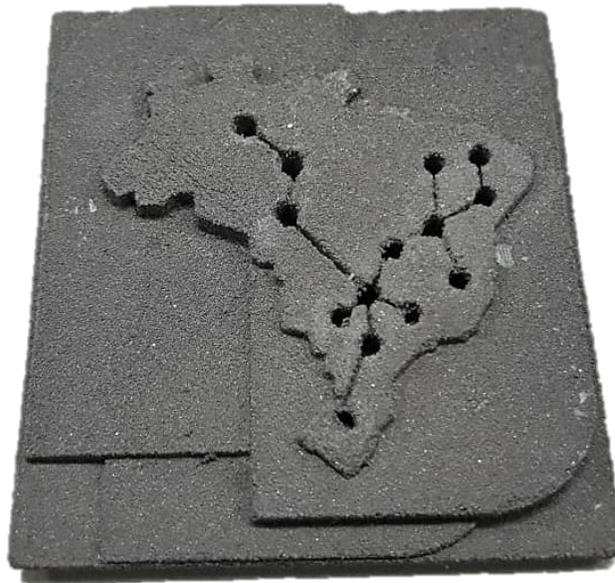


Geometrias complexas



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.**

