

# VI Seminário Brasileiro de **TERRAS-RARAS**

*7 e 8 de novembro de 2023*

PD&I para o Desenvolvimento Competitivo Sustentável de Processos e Produtos da Cadeia Produtiva de Terras Raras no Âmbito de  
Cooperação Internacional  
**Prof. Paulo A. P. Wendhausen**



# Sumário

## 1. PD&I: Projeto REGINA (2018-2024)

## 2. Desafios Científicos e Tecnológicos

- Escalonamento na Fabricação de Ímãs Sinterizados de Nd-Fe-B
- Uso Racional de Terras Raras: Processo GBD
- Fabricação de Ímãs *Near-Net-Shape* e *Net-Shape*: PLP, PIM e AM

## 3. Sustentabilidade na Cadeia Produtiva de ITRs

## 4. Considerações Finais



## REGINA

### Rare Earth Global Industry and New Applications



BMBF

Bundesministerium für  
Bildung und Forschung



Em **2015**, o MCTI e o BMBF firmam uma Declaração Conjunta de Intenções referente à Cooperação Científica e Tecnológica na área de matérias-primas de importância econômica estratégica.



Em **2018**, o Projeto REGINA entra em vigor, englobando 20 instituições.

**Brasil:** UFSC, CETEM, CERTI, USP/IPT, CDTN, COPPE, ABDI, CODEMIG, CBMM e WEG

**Alemanha:** HZDR, Outotec, TUC, THGA, IME, KME, IWKS, TUD e GMB



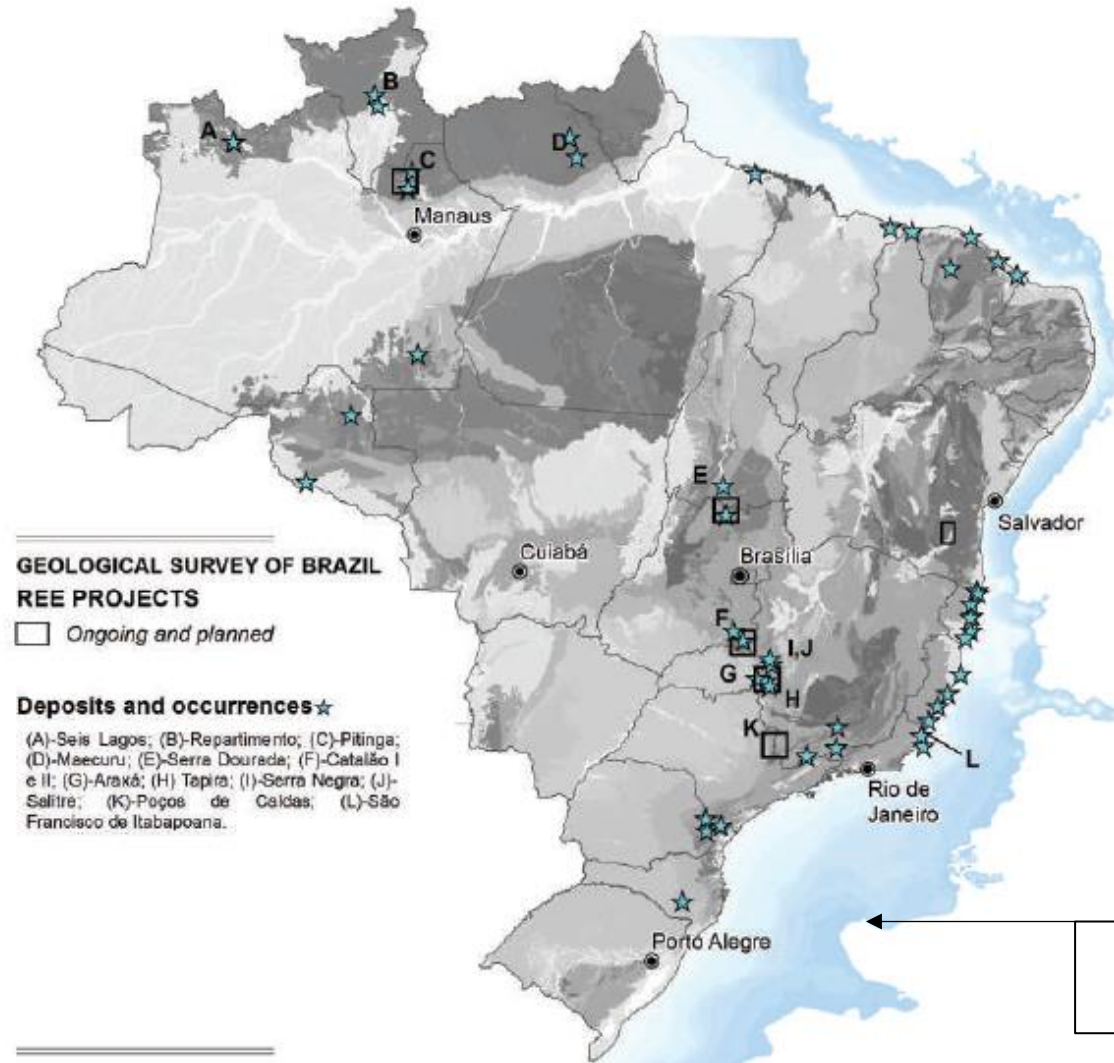
Financiamento do projeto do lado brasileiro:  
~ R\$ 1.500.000



Ministério da Ciência,  
Tecnologia e Inovação

# Projeto REGINA: Motivações

## Rare Earth Elements



Mineral  
Royalties: 2%



3rd world's  
biggest reserve  
(21 Mt OxTR)<sup>2</sup>



US\$ 1 million  
invested in  
exploration  
programs<sup>1</sup>



Total Produced  
REE 903t<sup>2</sup>



## Brasil

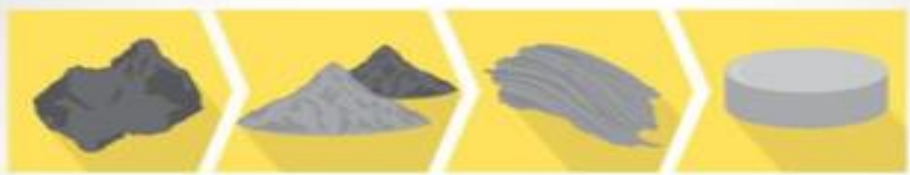
- O Brasil tem a terceira maior reserva de terras raras de todo o mundo, com 21 milhões de toneladas, ao lado da Rússia.
- Apesar do tamanho das reservas, a extração realizada no país ainda é pequena.
- Necessita de desenvolvimento integral da cadeia



## Alemanha

- Possui capacidade industrial para a produção de ITRs sinterizados.
- A empresa Vacuumschmelze, por exemplo, produz ímas de Nd-Fe-B desde 1985, e é a única empresa europeia a sobreviver a quase hegemônica presença das fábricas chinesas.
- Experiência nas áreas de caracterização e aplicação de ITRs e em

Silva, G.F.; Cunha, I.A., Costa, S.L. An overview of Critical Minerals Potential of Brazil. Serviço Geológico do Brasil, Brasília – DF (2023) (para subsidiar a cadeia produtiva de ITRs).





ETR-BR

# Cooperação Brasil – Alemanha (Terras Raras)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

 Light Rare Earth Element

 Heavy Rare Earth Element

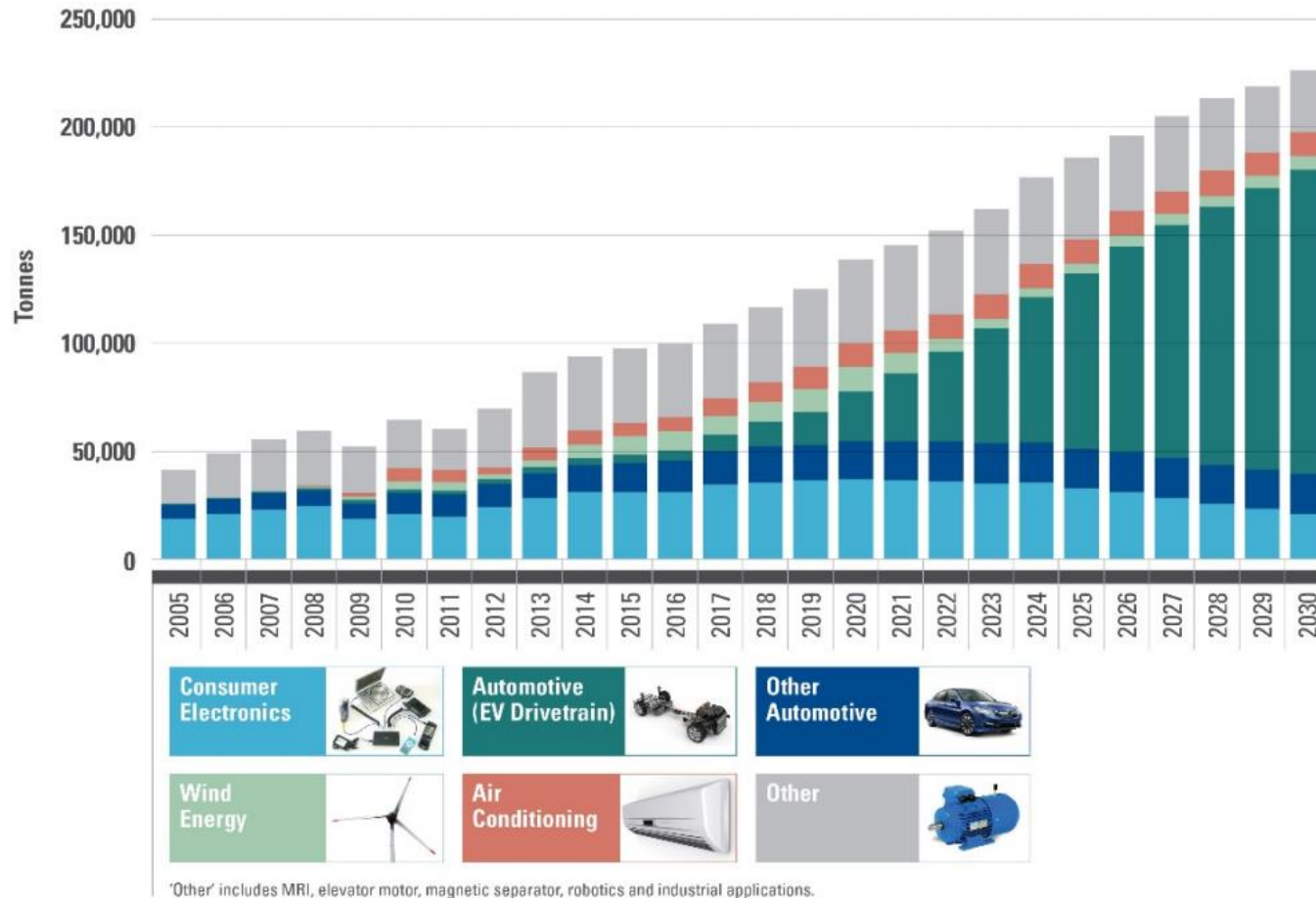


# Agregação de Valor: Ímãs de Didímio-Fe-B



# Demanda Global e Necessidade de uma Cadeia Produtiva

NdFeB Magnet Demand by Application



- Desde o início da década de 2010, nota-se um crescimento exponencial na **demanda global** de ímãs de Terras Raras (ITRs). Demanda impulsionada principalmente pela indústria automobilística (transição para veículos elétricos).
- Em 2022, 10% de todos os carros vendidos mundialmente foram modelos **100% elétricos** (*International Energy Agency, 2023*).
- Motivado por esta crescente demanda e pelas abundantes reservas de TRs, desde 2014 o Brasil vem desenvolvendo ações para a consolidação da **cadeia produtiva** de ITRs, apoiadas por parcerias já firmadas entre universidades, institutos de pesquisa, empresas e governo.
- Uma destas ações está na criação de **Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I)** que buscam, a partir de interações nacionais e internacionais, construir os alicerces para esta consolidação da cadeia produtiva.

S. Bobba et al., *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study (2020)*

# Work Packages (WPs)

Sustentabilidade

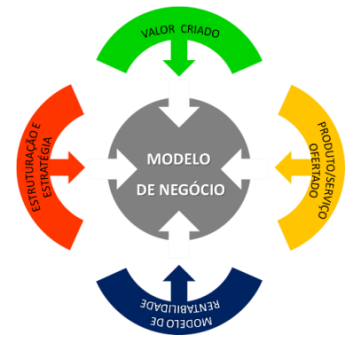
Processos de  
Separação

Processos de  
Redução

Fabricação de  
Ligas

Produção de  
Ímãs

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



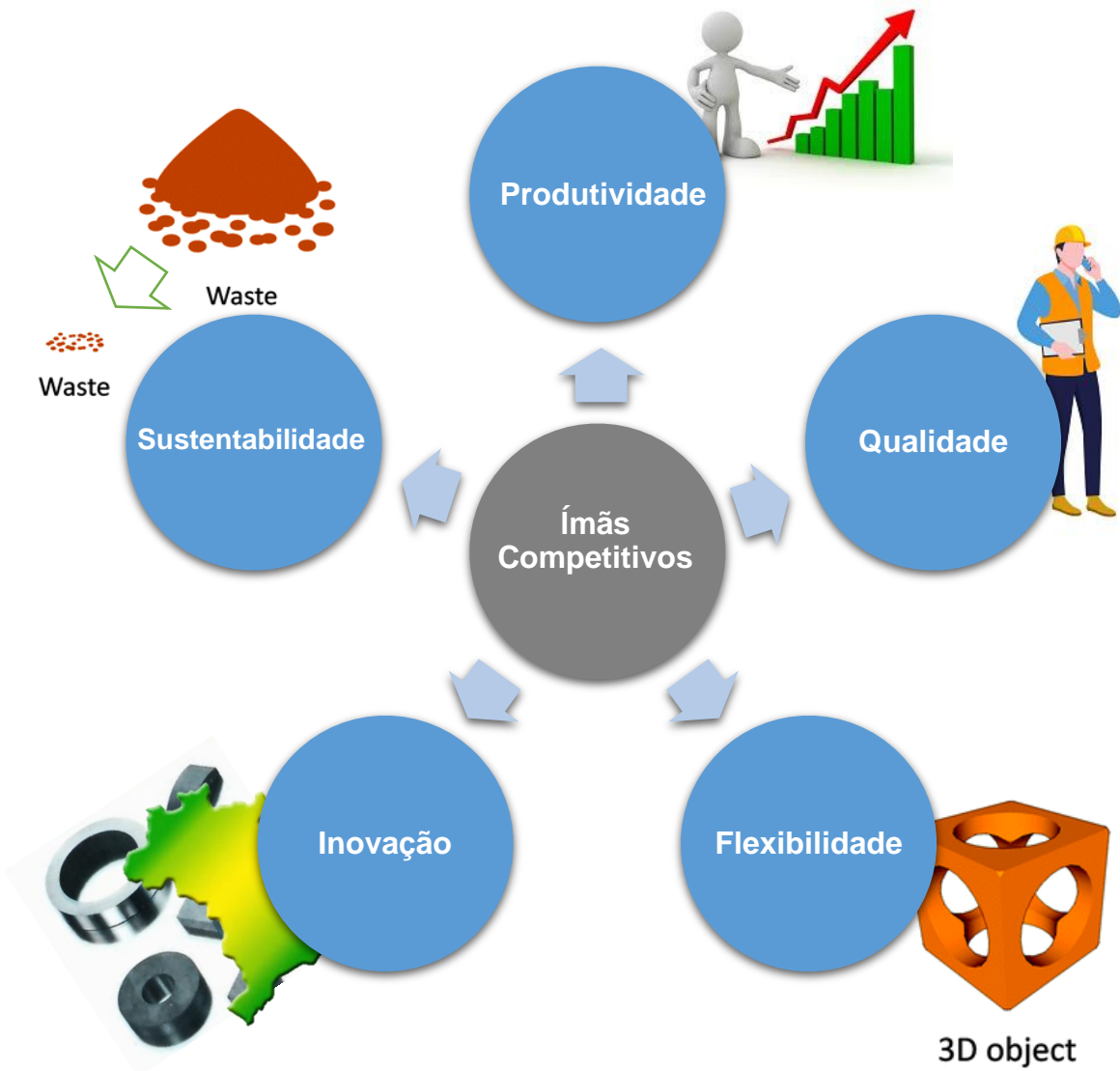
- **WP0** – HIF|OUTOTEC
- **WP1** – TUC
- **WP2** – IME|KME
- **WP3** – TUD|IWKS|GMB
- **WP4** – IWKS|TUD
- **WP5** – THGA

# Projeto REGINA: Expectativas Iniciais

- Promover pesquisa conjunta, desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis para o fornecimento de terras raras e outras matérias-primas primárias e secundárias de importância econômica estratégica (**desenvolvimento da cadeia produtiva de OxTRs**).
- Promover pesquisa conjunta, desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis para a fabricação de ímãs permanentes (**desenvolvimento da cadeia produtiva de ITRs**).
- Apoiar a inovação em pequenas e médias empresas de ambos os países.
- Realizar intercâmbio de pesquisadores e de informação, objetivando o desenvolvimento de recursos humanos de alto nível.
- Promover o desenvolvimento de **tecnologias para a industrialização** de produtos baseados em terras raras nacionais, especialmente ITRs competitivos, de caráter estratégico no âmbito mundial.



# Desafios Científicos e Tecnológicos



- De forma resumida, os WPs possuem um objetivo em comum: subsidiar a cadeia produtiva de **ITRs competitivos**.
- ITRs competitivos exigem com que metas de produtividade, qualidade, sustentabilidade, flexibilidade e inovação sejam estabelecidas e atingidas.
- E é neste ponto que nos deparamos com os **Desafios Científicos e Tecnológicos**.

# ...quais propriedades buscamos nos ITRs?

Propriedades magnéticas **extrínsecas**

$J_r$  – Remanência  
 $H_{cj} / H_{cb}$  – Coercividade  
 $(BH)_{max}$  – Produto-Energia  
 $\alpha / \beta$  – Coeficientes de Temperatura

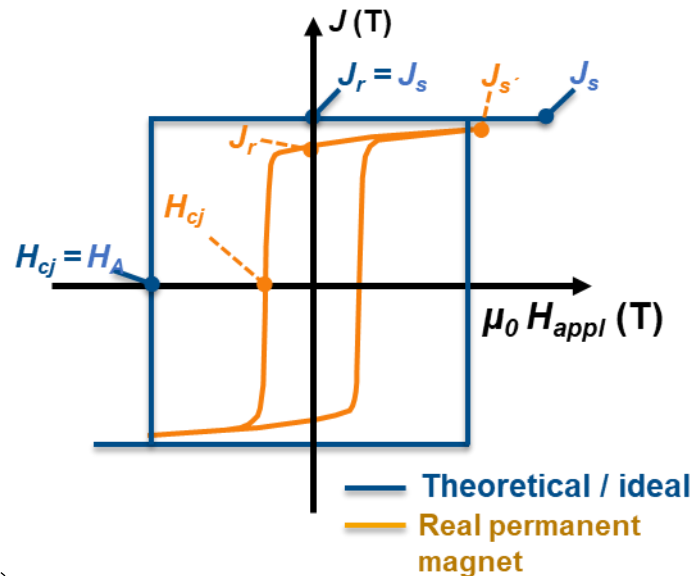
Propriedades magnéticas **intrínsecas** (fase magnética)

$J_s$  – Polarização de Saturação  
 $H_A$  – Campo de Anisotropia  
 $T_C$  – Temperatura de Curie

Microestrutura resultante para um dado **processamento**

- (1) Tamanho e Distribuição de Tamanho de Grãos
- (2) Textura Cristalográfica
- (3) Fases Formadas
- (4) Porosidade

## Curva de Histerese Magnética



J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials* (book), Cambridge University Press (2010)

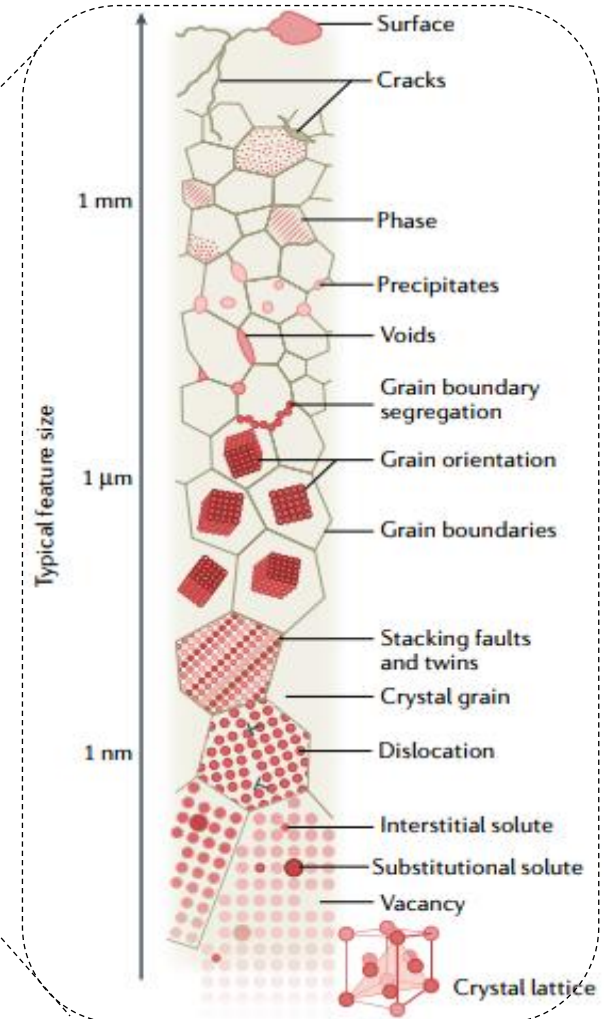
Propriedades

Microestrutura

Diferentes tipos de defeitos

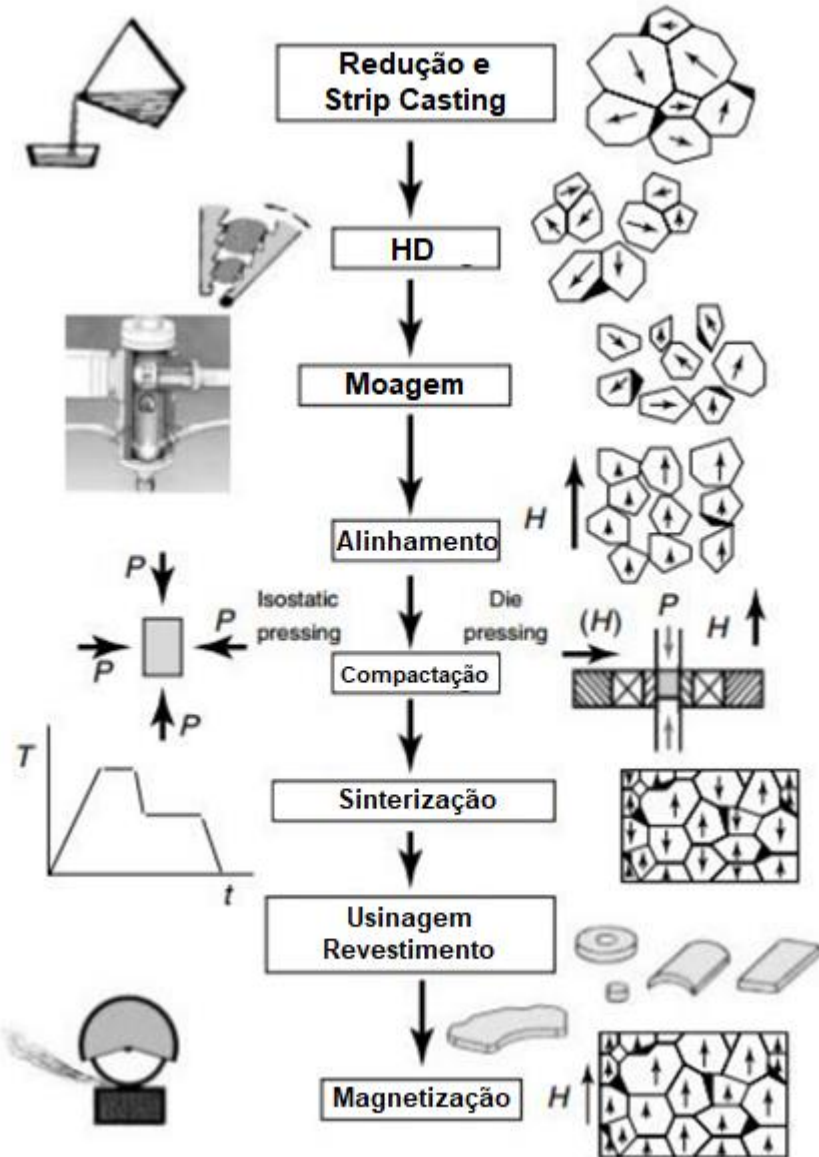
Projeto

Processamento



Adaptado de B. Gault et al., *Nat. Rev. Methods Primers* 1, 51 (2021)

# Processamento: Requisitos e Desafios



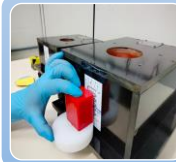
## Processos de Redução e Fabricação de Ligas

- **Requisitos:** Composição química (redução) e microestrutura adequada (strip-cast).
- **Desafios:** Evitar contaminações e formação de fases espúrias.



## Fragilização (HD) e Moagem (Jet Milling)

- **Requisitos:** Obtenção de monocristais, de tamanho de partícula reduzido ( $< 5 \mu\text{m}$ ) e distribuição estreita.
- **Desafios:** Ajuste dos parâmetros para atingir os requisitos e garantir o rendimento da moagem.



## Alinhamento

- **Requisitos:** Partículas alinhadas uniformemente, com momentos magnéticos paralelos ao campo aplicado.
- **Desafios:** Evitar desalinhamento em decorrência do atrito.



## Compactação Isostática

- **Requisitos:** Obtenção de peças verdes íntegras.
- **Desafios:** Ajuste de carga/moldes para evitar desalinhamento e gradientes de densidade.



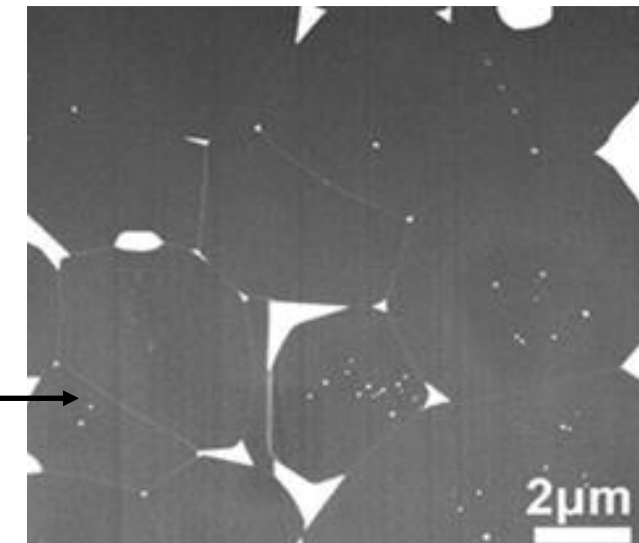
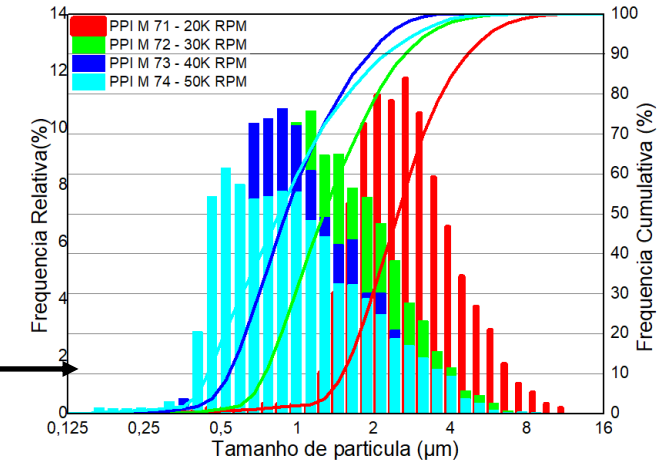
## Sinterização e Recozimento

- **Requisitos:** Eliminação de hidrogênio, densificação homogênea e distribuição adequada de fase rica nos contornos de grão.
- **Desafios:** Ajuste dos parâmetros para atingir os requisitos.



## Usinagem

- **Requisitos:** Precisão e baixa geração de cavaco/refugo.
- **Desafios:** Economia de tempo de corte e evitar danos superficiais nos ímãs.



# Rota Tradicional: Metalurgia do Pó

# I. Desafios Científicos e Tecnológicos (WP4)

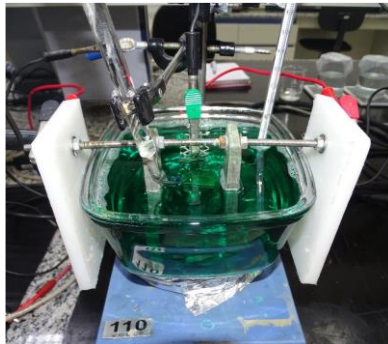
## Escalonamento na Fabricação de Ímãs de Nd-Fe-B

### Avanços

- Bateladas de sinterização de até 2 kg;

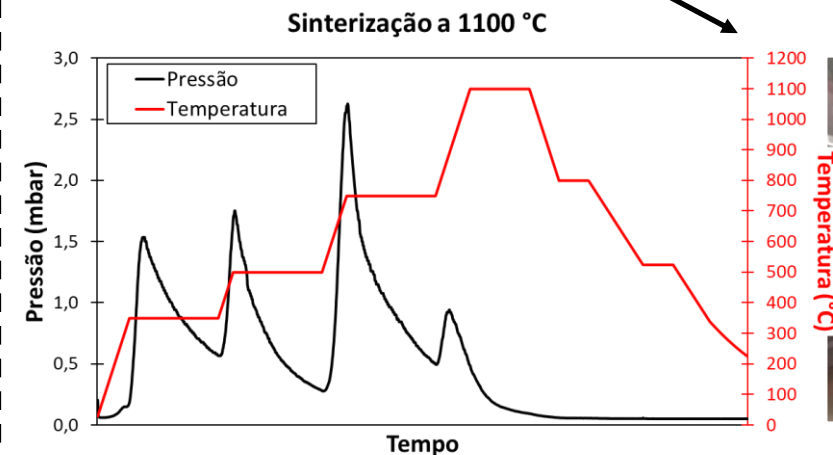
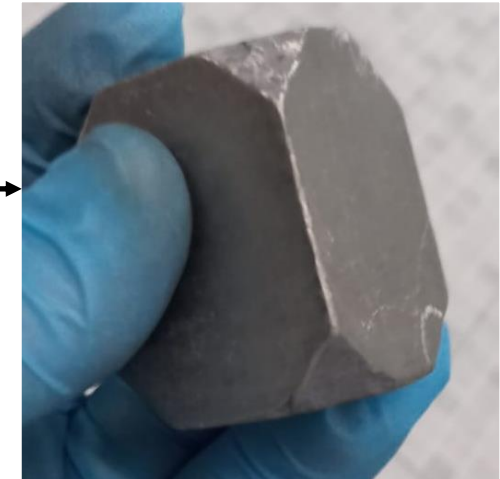


- Usinagem e revestimento de blocos sinterizados e obtenção de ITRs (placas) com baixa dispersão de propriedades;



### Desafios


- Adequar a pressão de compactação para evitar gradientes de densidade e chanframento;
- Adequar os patamares de pré-sinterização a fim de evitar trincas durante a liberação de hidrogênio residual;

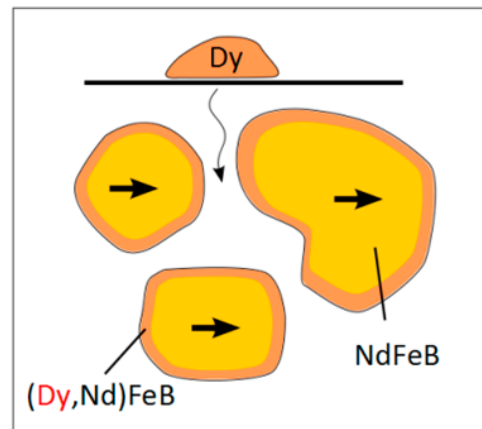


# II. Desafios Científicos e Tecnológicos (WP4)

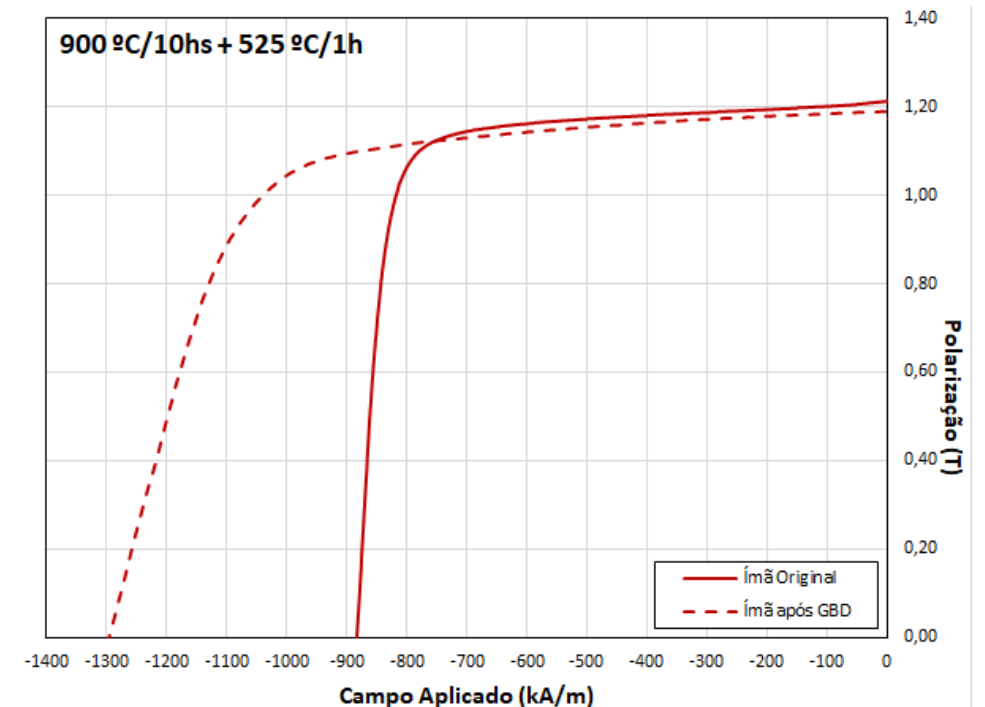
## Uso Racional de Terras Raras: Processo GBD

- Sabe-se que a adição de **TRs pesadas**, como o Dy e Tb, promove o aumento de coercividade em ímãs de Nd-Fe-B, além de aumentar a temperatura de operação destes ímãs;
- Contudo, estes são elementos que possuem **alto valor agregado** e reduzem a remanência dos ímãs de Nd-Fe-B caso sejam adicionados em excesso;
- O processo GBD (*Grain Boundary Diffusion*) se mostra eficaz para a **adição inteligente** destes elementos nos ímãs de interesse, a partir de tratamentos térmicos pós-sinterização;

 ETR	Custo Médio (US\$/kg)
<b>Tb</b>	<b>550,00</b>
<b>Dy</b>	<b>310,00</b>
<b>Nd</b>	<b>120,00</b>



- **Avanços:** A partir da adição de barbotina de uma liga de Dy-Cu particulada em ímãs sinterizados, observamos um considerável aumento da coercividade destes ímãs.
- **Desafios:** (1) Ajustar o método de adição para garantir homogeneidade da barbotina em toda a superfície do ímã e (2) Ajustar os patamares de tratamento térmico para otimizar o processo de difusão de Dy nos contornos de grão.



# III. Desafios Científicos e Tecnológicos (WP4)

## Fabricação de Ímãs *Near-Net-Shape* e *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 (usinagem);
- Maximiza aproveitamento da matéria prima;
- Minimiza geração de resíduos.

○ Como?

- PLP (*Pressless Process*)
- PIM (*Powder Injection Moulding*)
- AM (*Additive Manufacturing*)

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



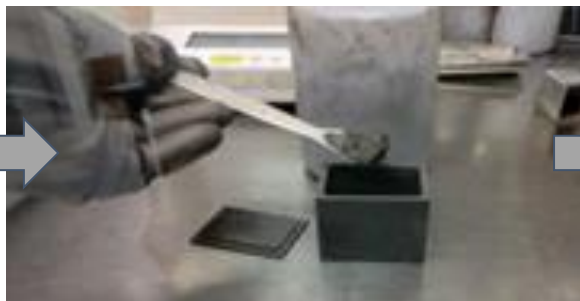
# Pressless Process (PLP) – Near-Net-Shape

- Processo que não requer a etapa de compactação.
- A compactação pode ter efeitos deletérios, principalmente em termos de controle de oxigênio, deformação das peças e controle de textura magnética.

Todos os estágios do processamento PLP podem ser realizados em ambiente altamente anaeróbico  
[HD > Jet Milling > Alinhamento Magnético > Sinterização]



Moldes de Grafite



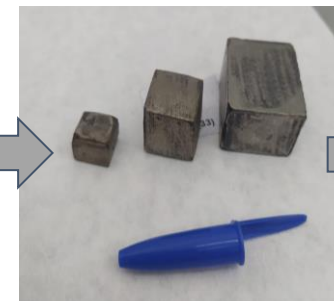
Preenchimento  
(1,6 até 3,4 g/cm<sup>3</sup>)



Alinhamento  
(1,0 até 4,5 T)



Sinterização



Ímãs Sinterizados  
(10 até 110 g)

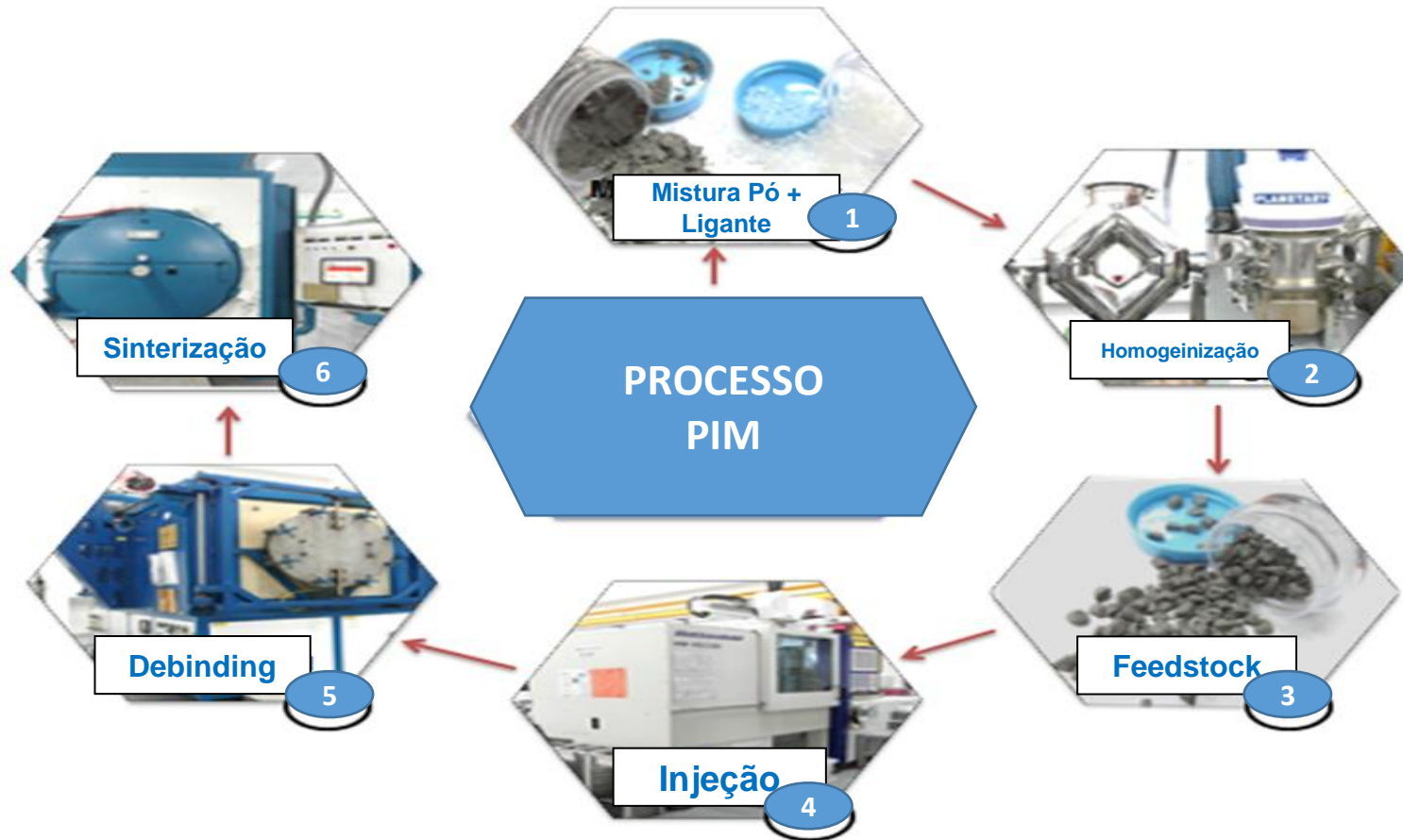


Caracterização Magnética  
(Bobina de Helmholtz e Histeresígrafo)

- **Avanços:** Produção de peças *near-net-shape* (blocos) de até 110 g.
- **Desafios:** Ajustar a densidade de preenchimento dos moldes a fim de otimizar a densidade e o grau de alinhamento dos ímãs após sinterização.

# Powder Injection Moulding – Net-Shape

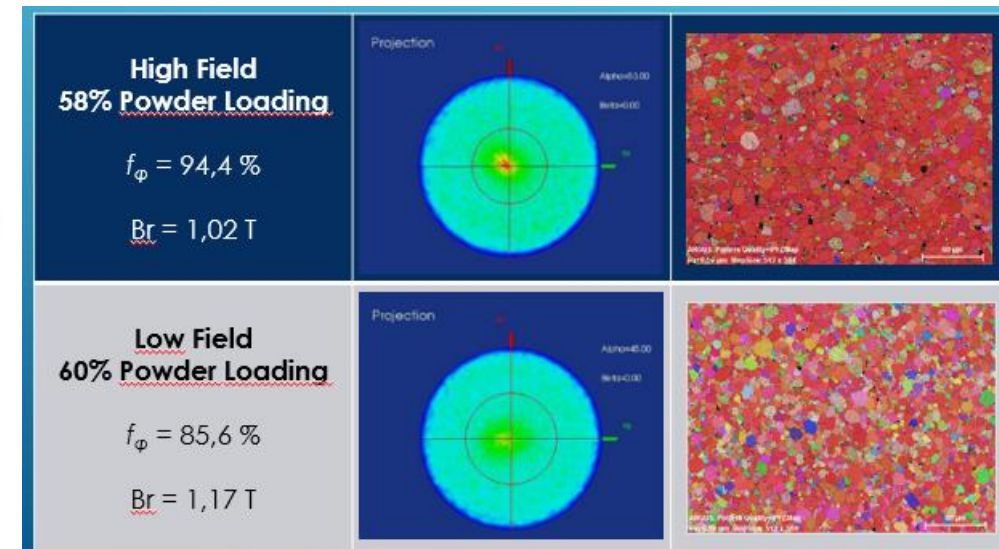
- Processo comumente utilizado para obtenção de ímãs compósitos *Net-Shape*.



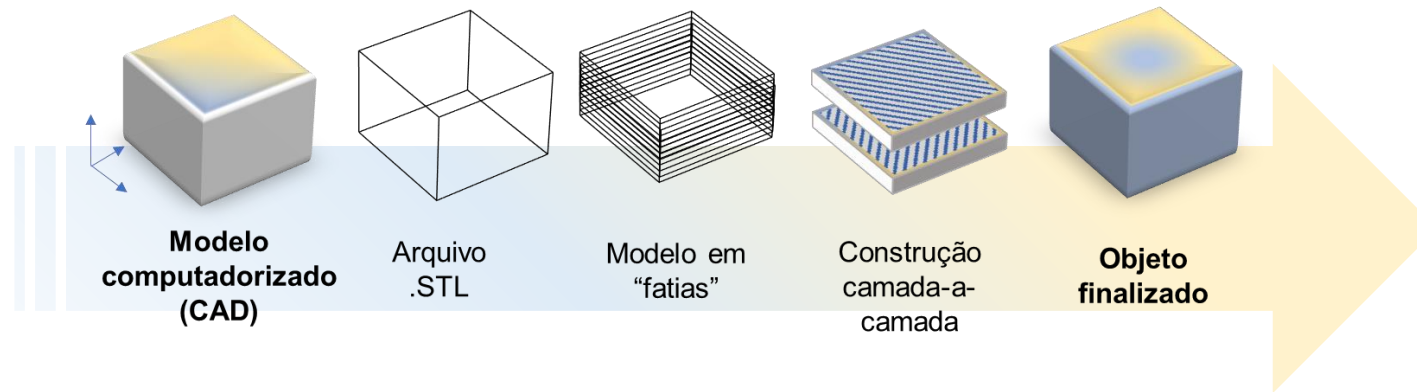
Exemplos: peças comercializadas



Pesquisas realizadas: Fator de alinhamento e avaliação de textura (EBSD Mapping)



# Additive Manufacturing – Net-Shape



## Ímãs permanentes "net-shape"

Reduzir/eliminar etapas subtrativas para adequação geométrica

Redução do desperdício de ETR's críticos

## Geometrias/estruturas com elevado grau de complexidade

Sem necessidade de moldes ou matrizes

## Produção altamente customizada

Necessidades e funcionalidades específicas

Desenvolvimento de protótipos de forma rápida

## Desenvolver e/ou agregar novas funcionalidades aos ímãs permanentes

Gradientes funcionais e manipulação dos campos magnéticos

# Histórico – Pesquisa em AM – Laboratório MAGMA

Alkimat

2015 – Protótipo da máquina de AM para pesquisa

magma

2019 Engerhoff et al.

Alkimat

2021 – Desenvolvimento de técnicas para preparação do feedstock

magma

Alkimat

2023 – AM-RPM BR

2017  
Baldissera et. al

magma

2020  
Fim et al.

magma

2022  
Röhrig et al.

magma



Increasing packing density of Additively Manufactured Nd-Fe-B bonded magnets

R.G.T. Fim\*, A.A. Mascheroni, L.F. Antunes, J.B.E. Engerhoff, C.H. Ahrens, P.A.P. Wendhausen

Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC 88040-001, Brazil



Journal of Magnetism and Magnetic Materials

ELSEVIER journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jmmm](http://www.elsevier.com/locate/jmmm)

Laser powder bed fusion of anisotropic Nd-Fe-B bonded magnets utilizing an in-situ mechanical alignment approach

K. Schäfer<sup>a,f,1,\*</sup>, R.G.T. Fim<sup>a,b,1,\*</sup>, F. Maccari<sup>a,f</sup>, T. Braun<sup>a,f</sup>, S. Riegg<sup>a,f</sup>, K.P. Skokov<sup>a,f</sup>, D. Koch<sup>c</sup>, E. Bruder<sup>d,f</sup>, I. Radulov<sup>e,f</sup>, C.H. Ahrens<sup>b</sup>, P.A.P. Wendhausen<sup>b</sup>, O. Gutfleisch<sup>a,f</sup>

<sup>a</sup> Functional Materials, Institute of Material Science, Technical University of Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany

<sup>b</sup> Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, 88040-001, Brazil

<sup>c</sup> Structural Research, Institute of Material Science, Technical University of Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany

<sup>d</sup> Physical Metallurgy, Institute of Materials Science, Technical University Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany

<sup>e</sup> Fraunhofer IWS, Fraunhofer Research Institution for Materials Recycling and Resource Strategies, 63457 Hanau, Germany

<sup>f</sup> Additive Manufacturing Center, Technical University Darmstadt, 64289 Darmstadt, Germany



On the feasibility of using  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  powders obtained via HDDR process for laser powder bed fusion of bonded permanent magnets

Röhrig M.<sup>a,\*</sup>, Fim R.G.T.<sup>a</sup>, Quispe L.T.<sup>b</sup>, Landgraf F.J.G.<sup>c</sup>, Ahrens C.H.<sup>a</sup>, Plá Cid C.C.<sup>a</sup>, Wendhausen P.A.P.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC 88040-001, Brazil

<sup>b</sup> Laboratorio de Películas Delgadas, Escuela Profesional de Física, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Av. Independencia s/n, Arequipa, Peru

<sup>c</sup> Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of São Paulo, São Paulo, SP 05508-030, Brazil

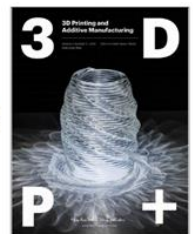


3D Printing and Additive Manufacturing > Ahead of Print >

Laser Powder Bed Fusion of Sm-Fe-N Bonded Magnets Employing Flake Powders

Melissa Röhrig , Rafael Gitti Tortoreto Fim , Rubens Nunes de Faria, Cristiani Campos Plá Cid, Carlos Henrique Ahrens, and Paulo Wendhausen

Published Online: 29 Mar 2022 | <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0228>

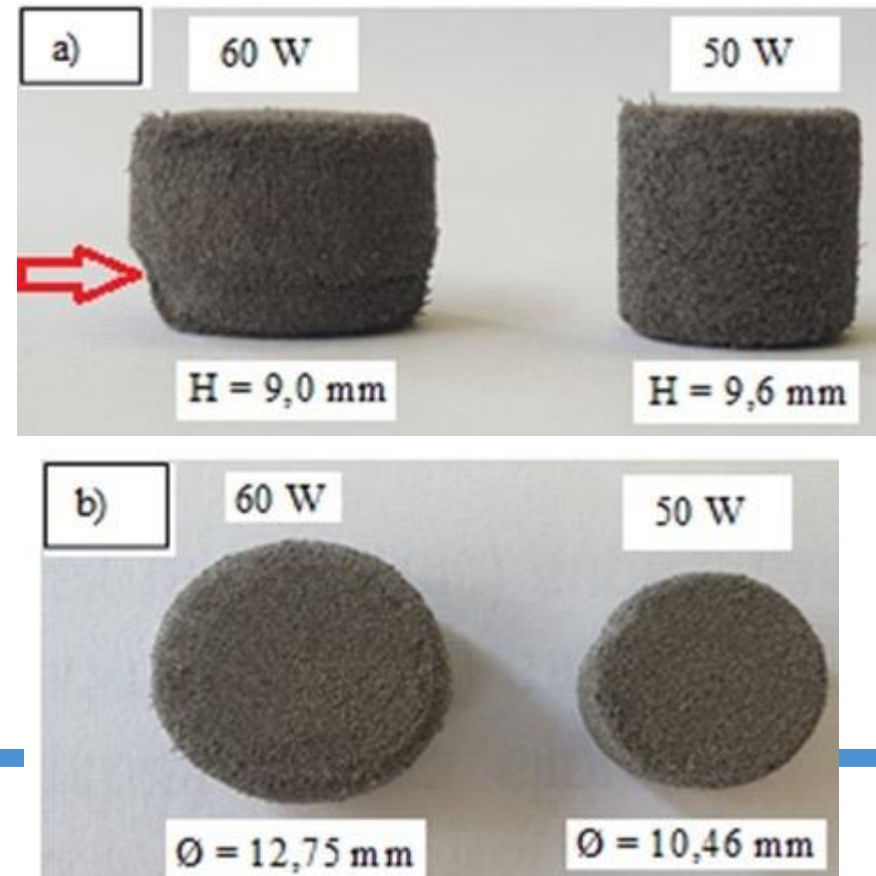


# Avanços e Desafios – AM

- Ímãs compósitos de baixa porosidade (~30%);
- Parâmetros de impressão ainda não otimizados.
- **Conceito de prova: LPBF aplicado a ímãs a base de TRs → ímãs compósitos de Nd-Fe-B.**

2017  
Baldissera et. al  
**magma**

Ímãs compósitos de Nd-Fe-B  
inicialmente impressos via LPBF

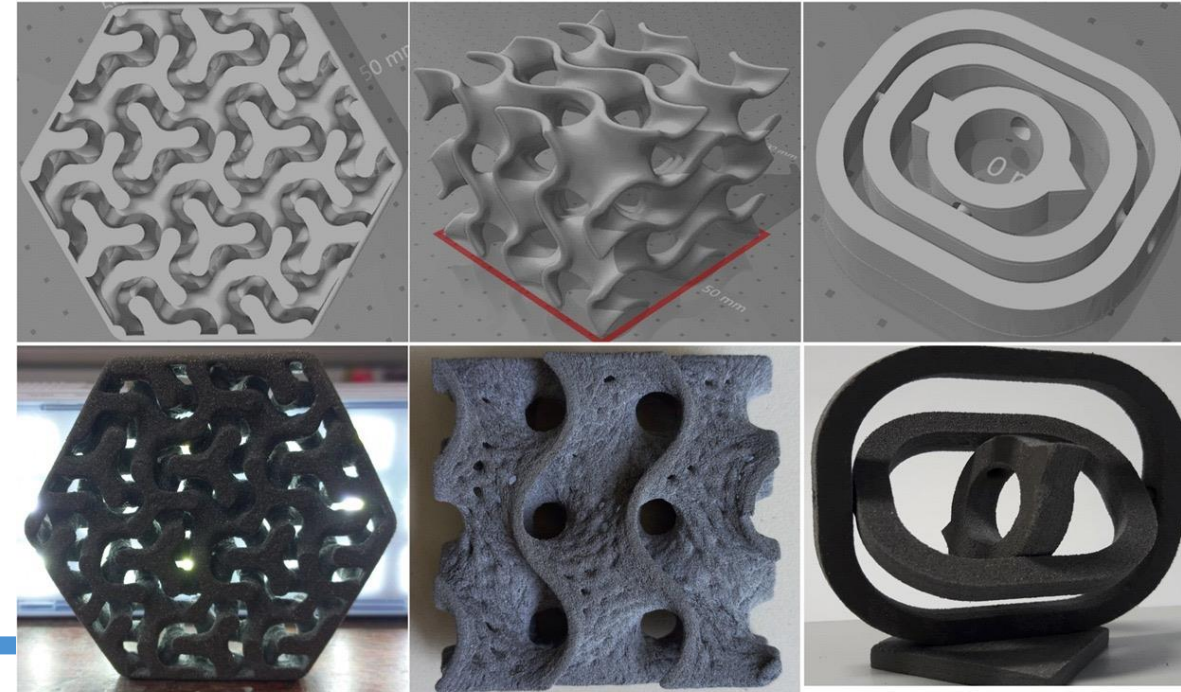


# Avanços e Desafios – AM



2020  
Fim et al.  
**magma**

- Otimização dos parâmetros de impressão
- Como aumentar a densidade?
- Existe uma forma de induzir a anisotropia?



Ímãs compósitos de Nd-Fe-B produzidos via LPBF

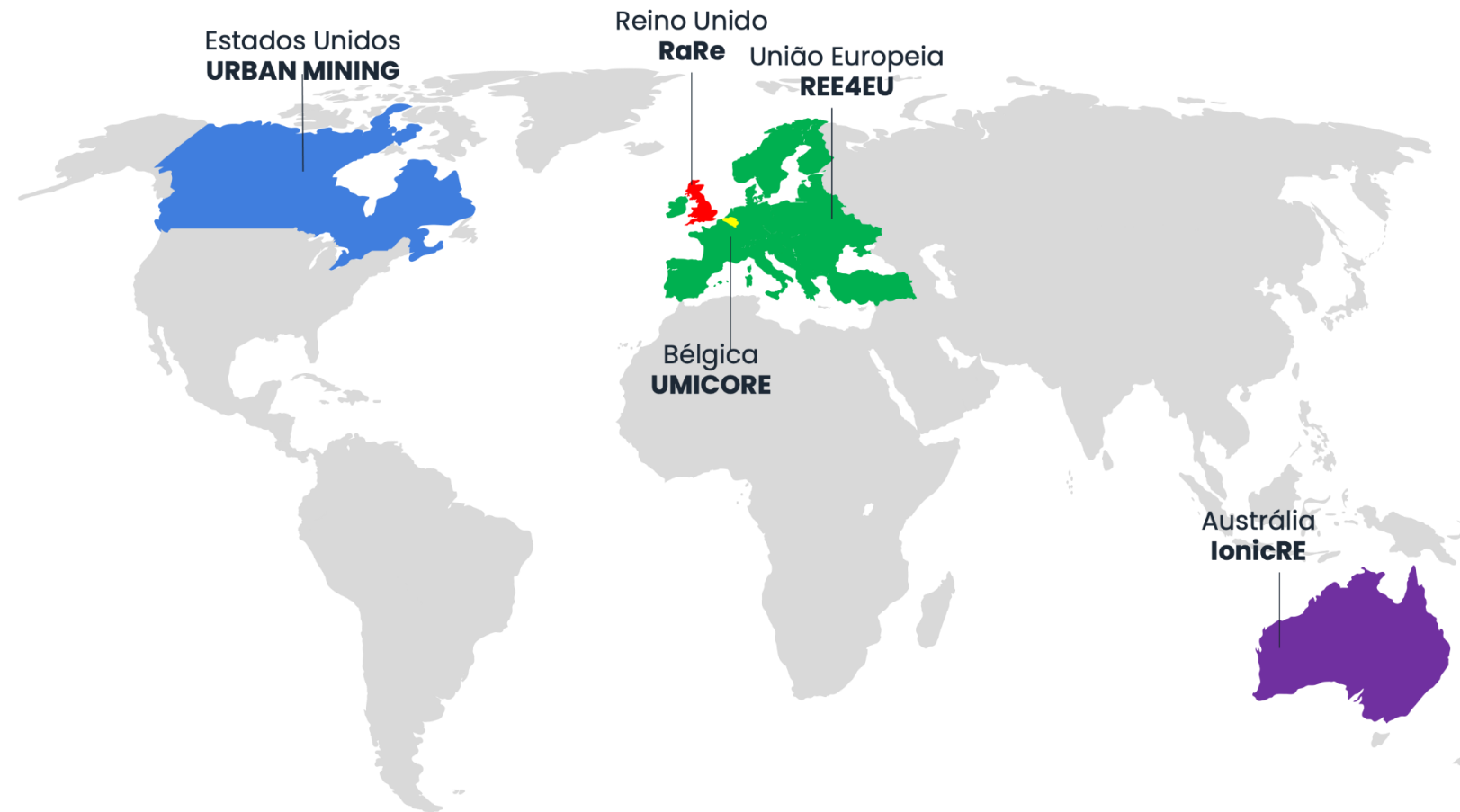
## Sustentabilidade na Cadeia Produtiva de ITRs

### Por que reciclar?

- Mineração Urbana: recuperar valor dos materiais que já existem e evitar a exploração de novos recursos naturais.
- Aproveitar o estoque existente de matéria-prima secundária.
- Imprimir o caráter sustentável na cadeia produtiva a partir da reciclagem, por exemplo, de cavaco (processamento) e de ímãs em fim de vida (pós-consumo).
- Estratégia Global: UE estima uma capacidade de atendimento de 50% da demanda em 2030 a partir de ímãs reciclados.



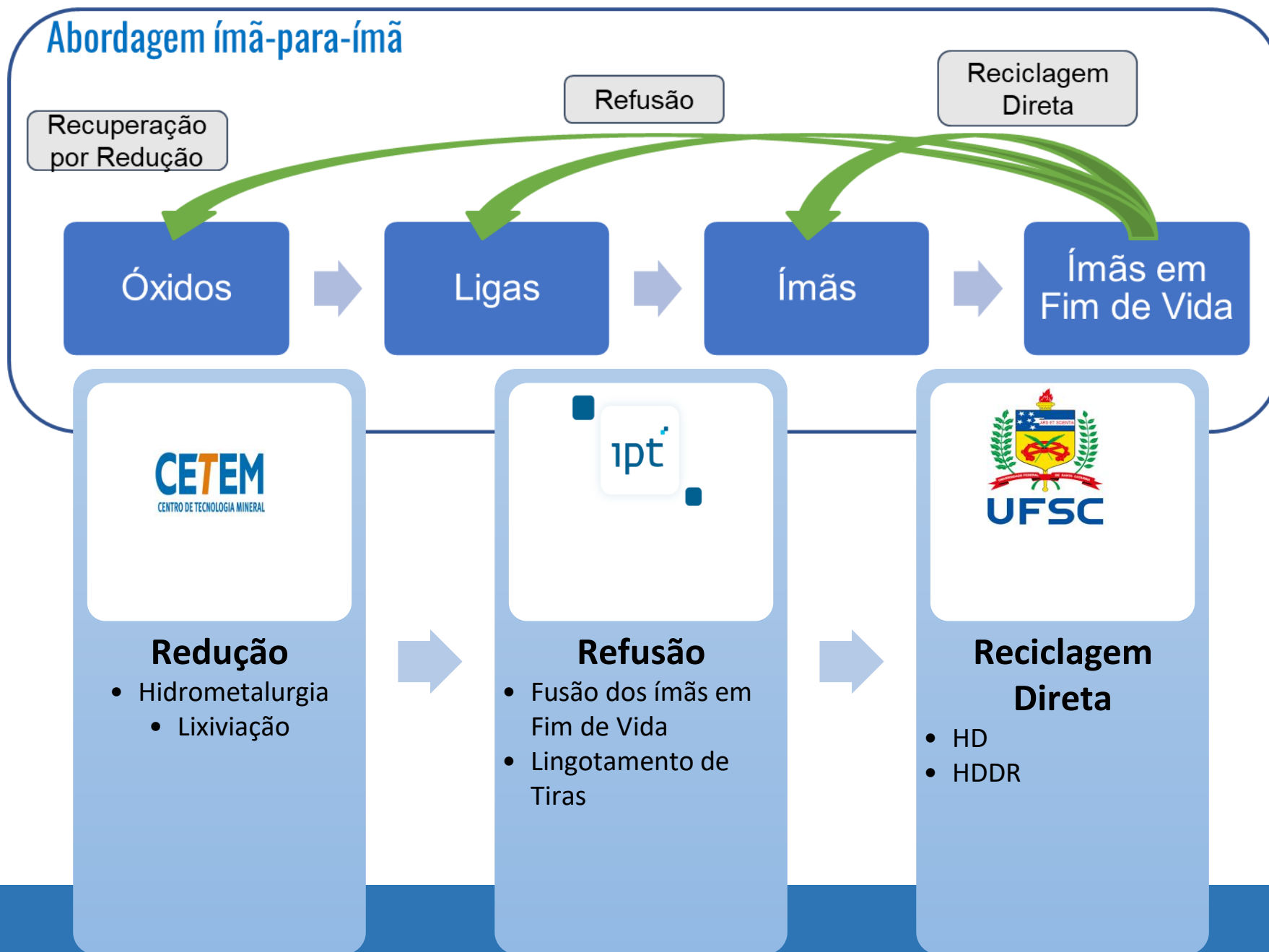
# Estado Atual das Iniciativas de Reciclagem



Responsável	Região	Escala
<b>RaRe</b> (Rare Earth Recycling for E-machines) e Hypromag	Reino Unido	Transição laboratorial - industrial
<b>REE4EU</b>	União Europeia	Transição laboratorial - industrial
<b>IonicRE</b>	Austrália	Industrial
<b>Umicore</b>	Sediada na Bélgica, coleta na Alemanha, Brasil, China, França e Japão	Industrial
Urban Mining	EUA	Industrial



# Como Reciclar?



# Visão de Futuro

- Domínio das técnicas de reciclagem em **escala industrial**.
- Produção do **LabFabITR** abastecida utilizando matéria-prima secundária.
- LabFabITR como **referência** em reciclagem de ITR na América Latina, apoiando o desenvolvimento de outras StartUps (para gerenciamento dos resíduos, coleta, desmantelamento, rastreio, por exemplo).
- Primeira fábrica de motores e turbinas com selo de **circularidade**.
- Fabricas utilizando ímãs **reciclados** em seus motores.
- Cadeia produtiva de **veículos elétricos** de baixa emissão de carbono.
- Geração de **energia eólica** de baixo carbono.

# Considerações Finais

- 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, o momento de inovar e estabelecer a cadeia produtiva no Brasil para atender as novas demandas é agora.
- A cooperação em nível Nacional e Internacional pode ser chave para encurtar o caminho.