

Desafios e Perspectivas na Fabricação de Ímãs de Terras Raras Utilizando Técnicas de Moldagem sem Pressão

Paulo. A. P. Wendhausen

Wagner C. Macedo

Marcelo. A. Rosa



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA**



inct
institutos nacionais
de ciência e tecnologia

magma

**LABORATÓRIO DE MATERIAIS
MAGNÉTICOS**

Sumário

1. Contextualização

- Processo Tradicional
- Por que processos de moldagem sem pressão?

2. Técnicas de Moldagem sem Pressão

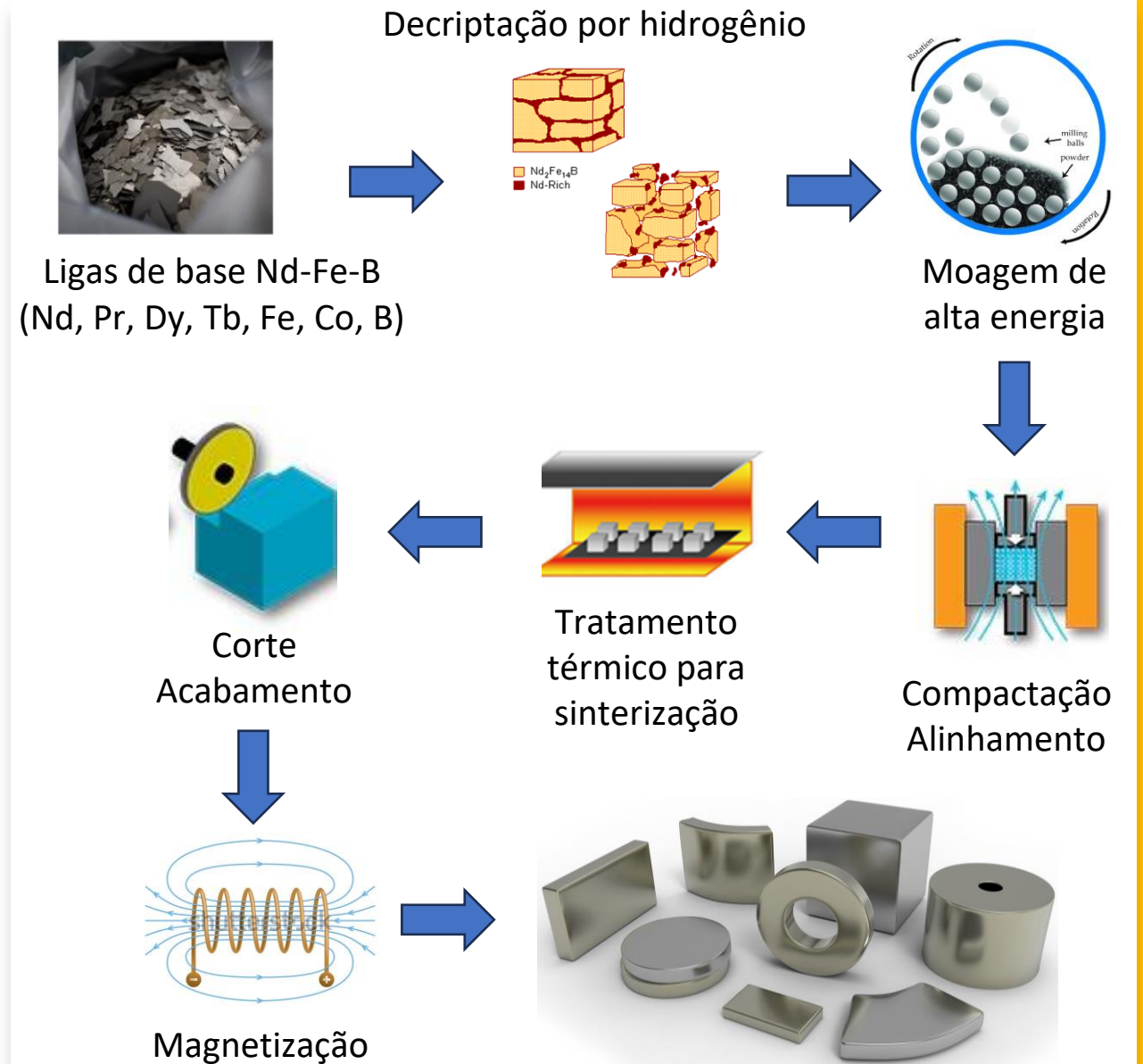
- *Pressless Processing* (PLP)
- Estudo de Caso: PLP Aplicado a Reciclagem de Ímãs

- Manufatura Aditiva
- Estudo de Caso: Otimização de Remanência de Ímãs Compósitos Obtidos via Fusão em Leito de Pó

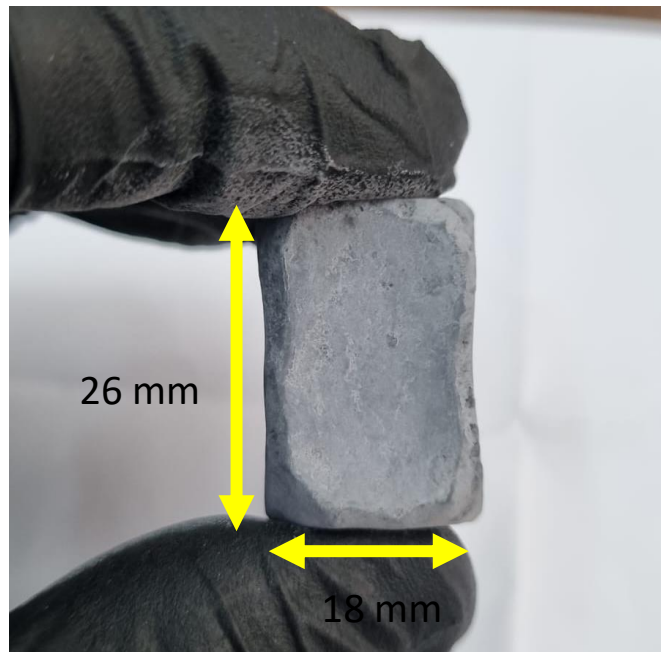
3. Perspectivas

Contextualização

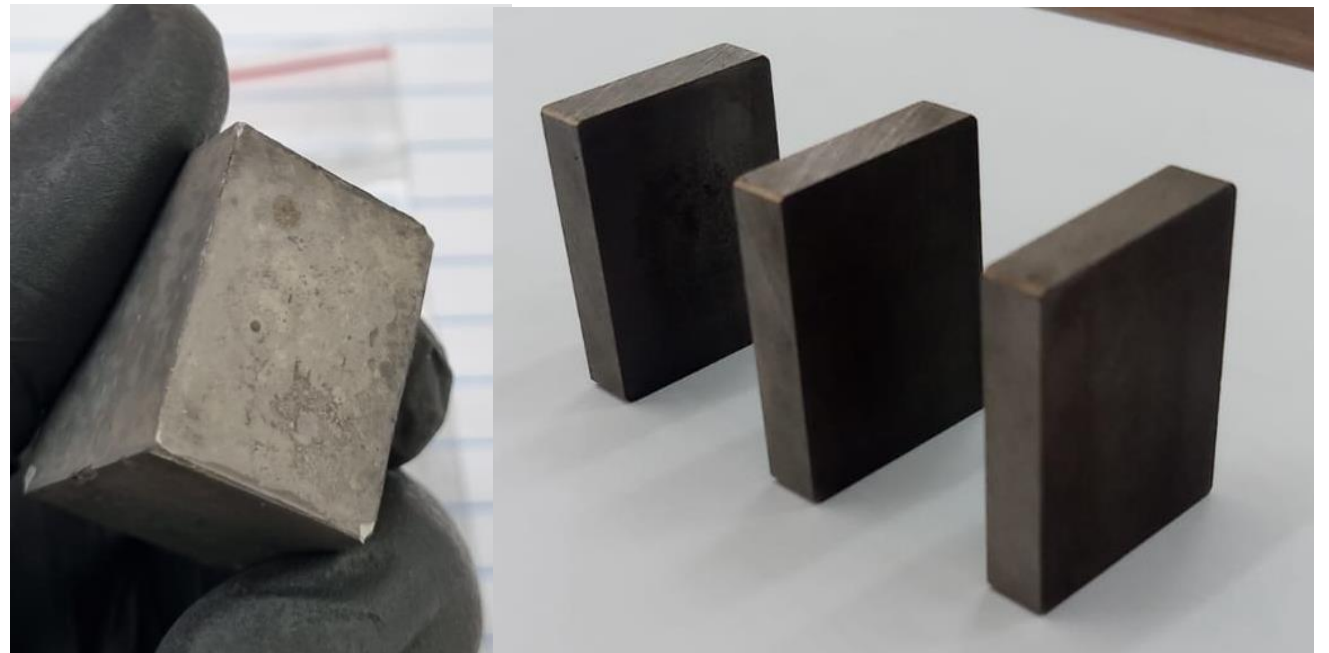
- **Metalurgia do Pó: rota tradicional** para fabricar ímãs de terras raras;
- Moldagem do ímã realizada via **compactação**;
- Durante o **tratamento térmico de sinterização**, ocorrem **distorções**;
- Operações posteriores de **usinagem**;



Peça após tratamento térmico de sinterização



Após operações de corte/acabamento



Contextualização

- Durante a **usinagem: perda de matéria prima com alto valor agregado;**
- Há casos em que o desperdício é maior do que 50% em peso!
- Processos ***near net shape***;
- O processamento possibilita a obtenção de um ímã com o formato o mais próximo possível daquele necessário na aplicação;

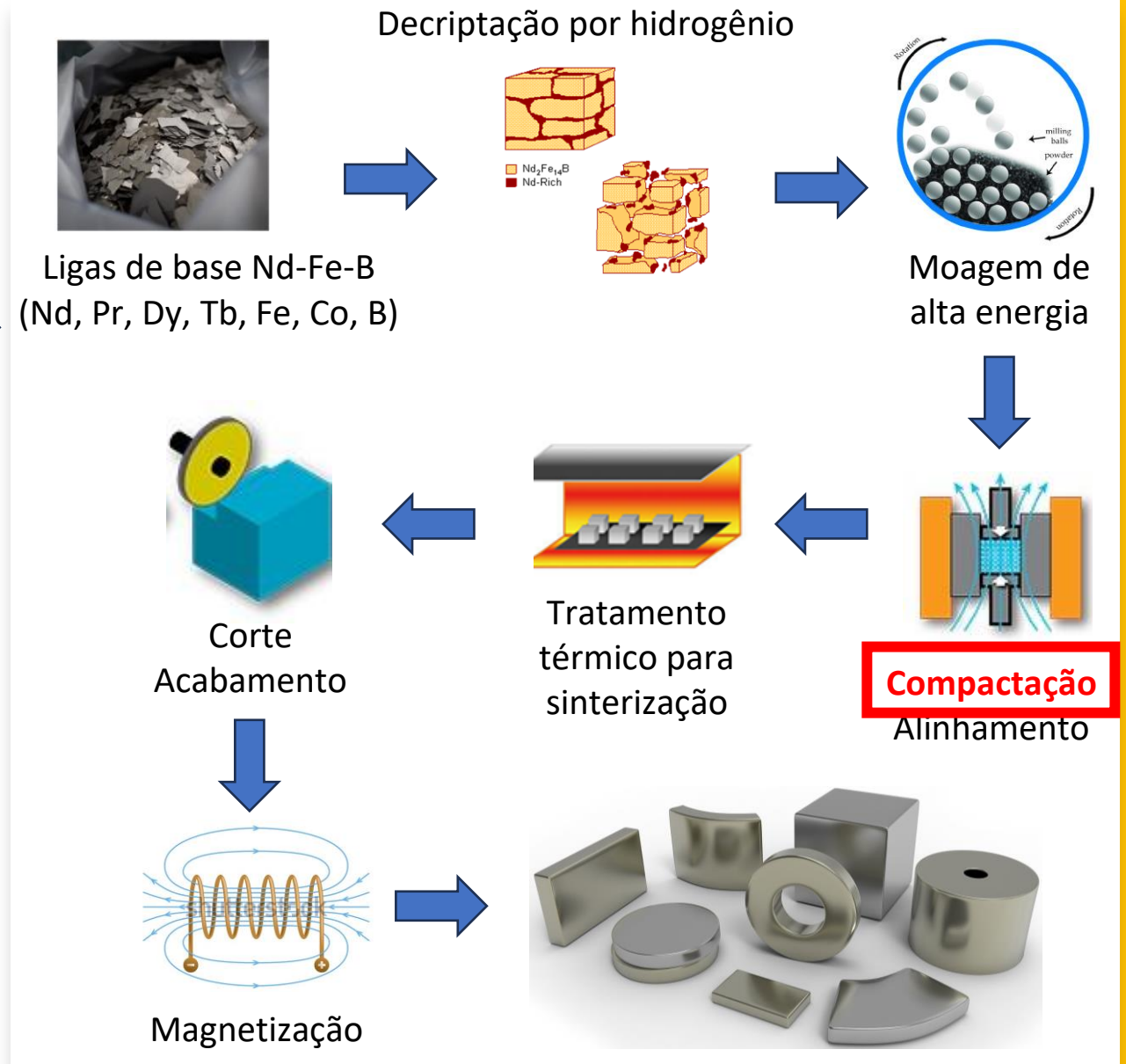
Ímãs Retangulares ou Cilíndricos		Perdas de Usinagem de 20 a 30% em peso
Ímãs em Formato de Arco		Perdas de Usinagem de 40 a 50% em peso
Ímãs em Formato de Anéis		Perdas de Usinagem de 50 a 70% em peso

Pressless Processing PLP

- Processo tradicional: inclui a etapa de compactação
- **PLP: dispensa a etapa de compactação**
- Preenchimento de molde para sinterização



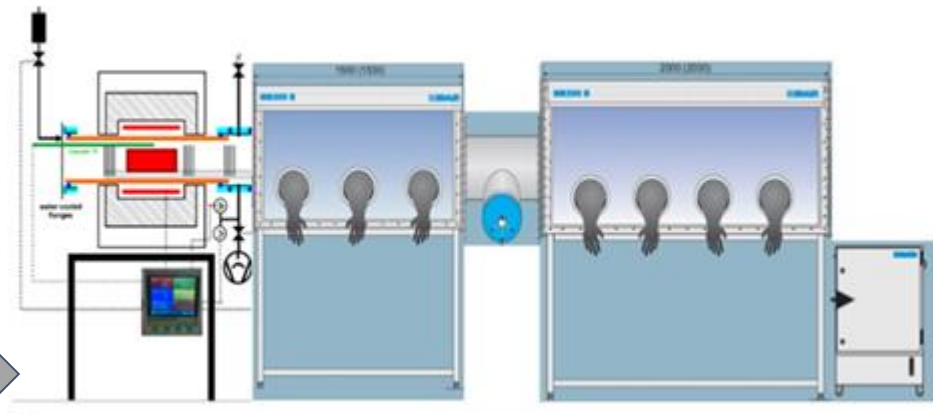
Preenchimento de molde de grafita para processo PLP.



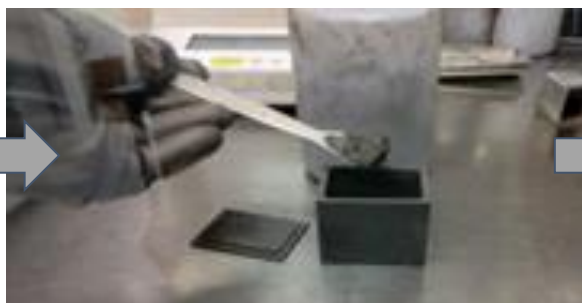
Processo PLP

Todas as etapas do processo conduzidas em ambiente anaeróbico
[HD > moagem > alinhamento > sinterização]

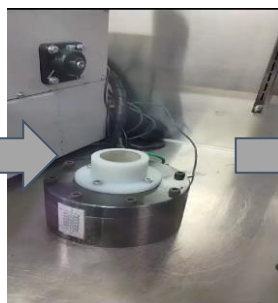
Forno e GB (O₂ < 3 ppm)



Moldes de grafita



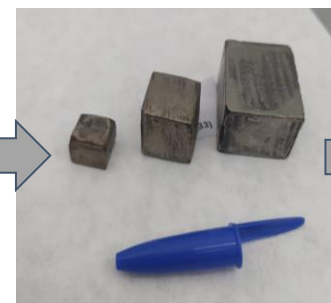
Preenchimento (1,6 até 3,4 g/cm³)



Alinhamento (1,0 até 4,5 T)



Carregamento do forno



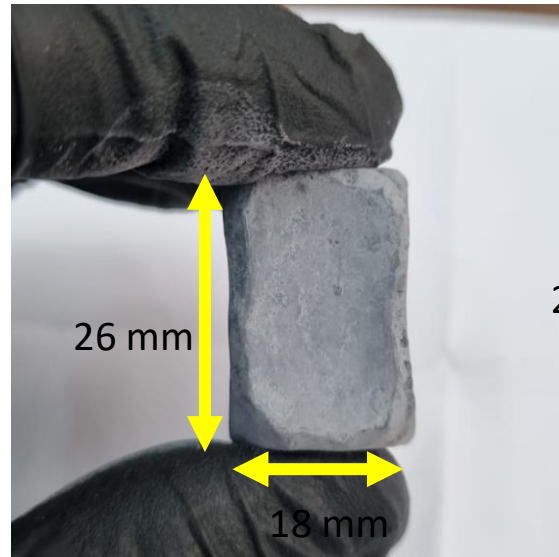
Ímãs PLP (10 até 110 g)



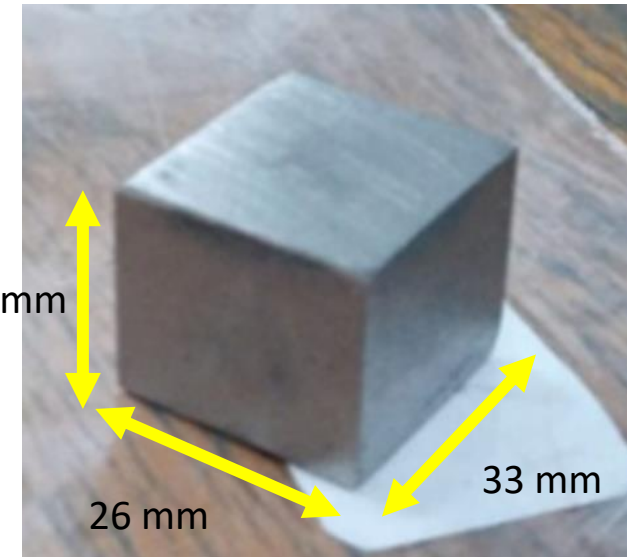
Caracterização magnética

Pressless Processing PLP

- **Problemas** da etapa de **compactação**
- **Distorções** pós sinterização: em decorrência de gradientes de densidade na peça a verde;



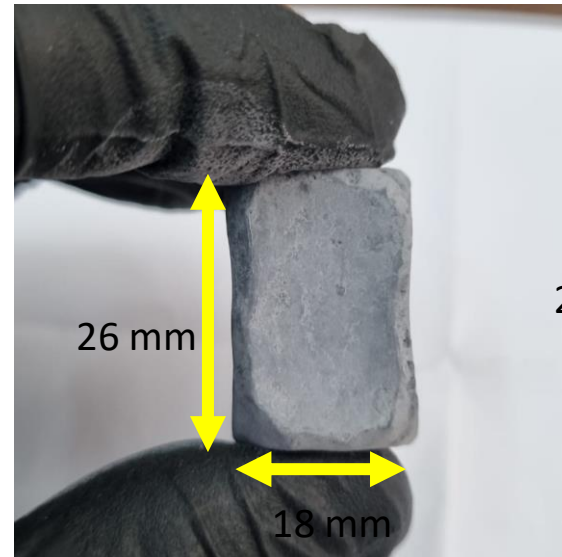
Ímã fabricado pelo processo convencional



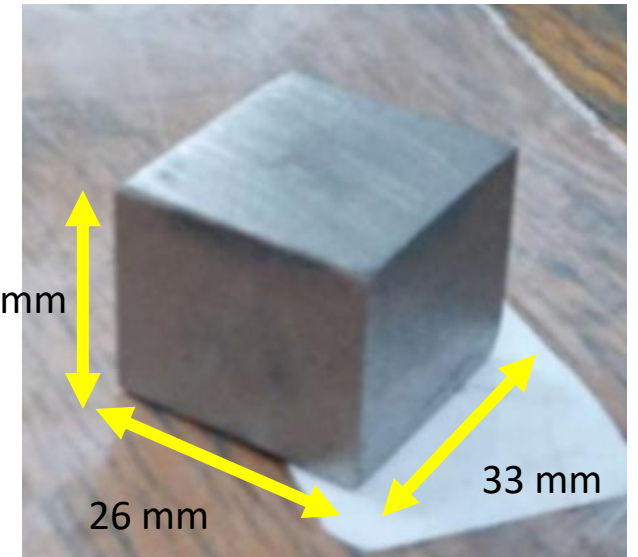
Ímã PLP

Pressless Processing PLP

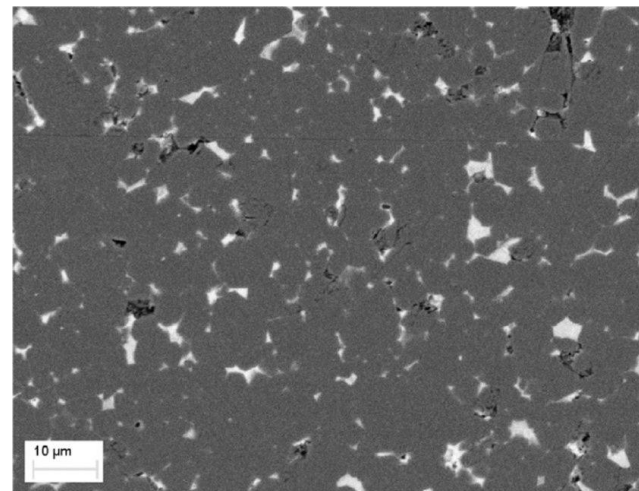
- **Problemas** da etapa de **compactação**
- **Distorções** pós sinterização: em decorrência de gradientes de densidade na peça a verde;
- Uma etapa a mais = mais chances de **incorporação de oxigênio**;
- **Oportunidade**: aplicação do PLP como **estratégia de reciclagem**.



Ímã fabricado pelo processo convencional



Ímã PLP



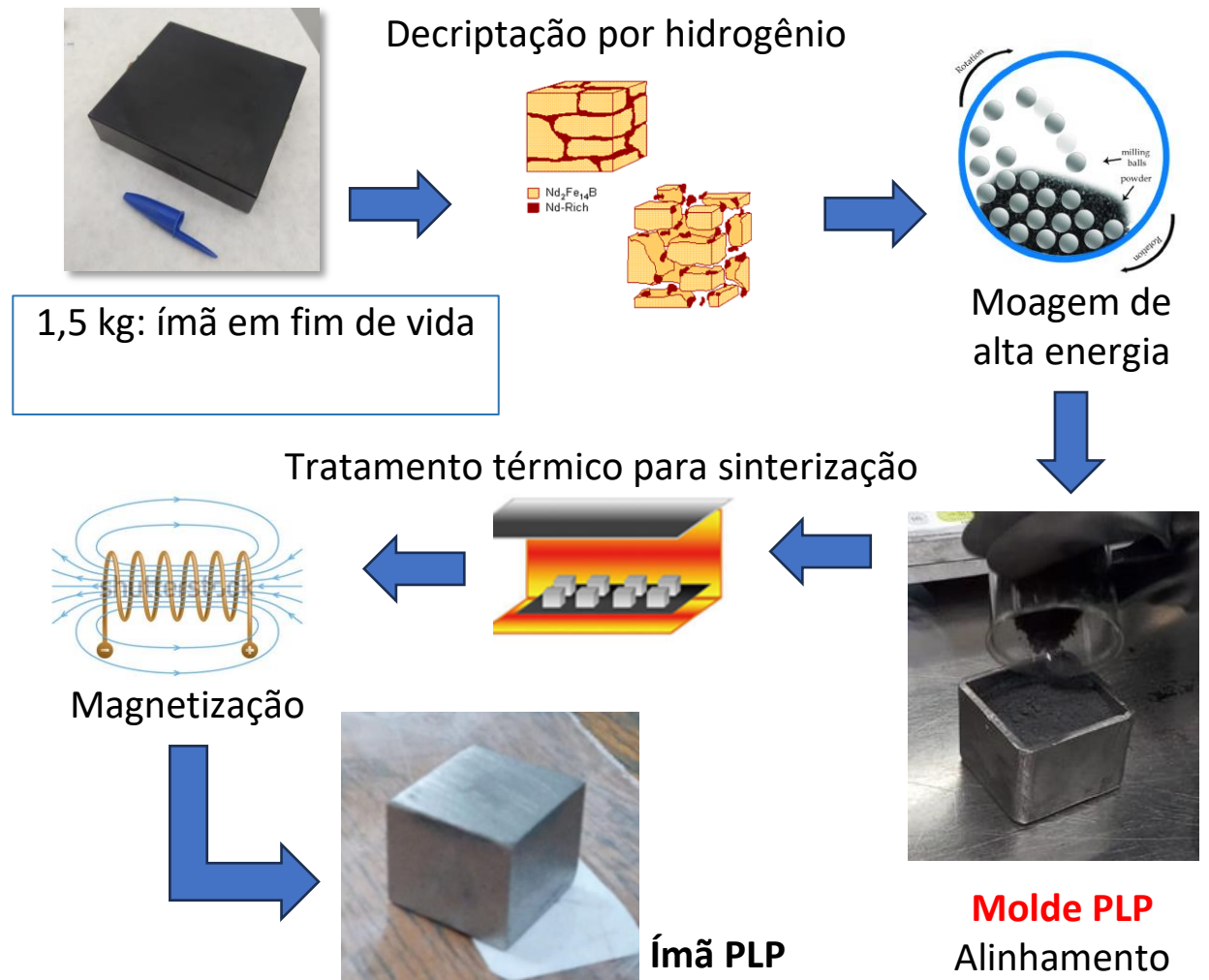
Problemas da incorporação de oxigênio:

- Oxidação e diminuição da fração de fase rica (no caso de ímãs à base de Nd-Fe-B)
- Degradação de propriedades magnéticas

Pressless Processing PLP

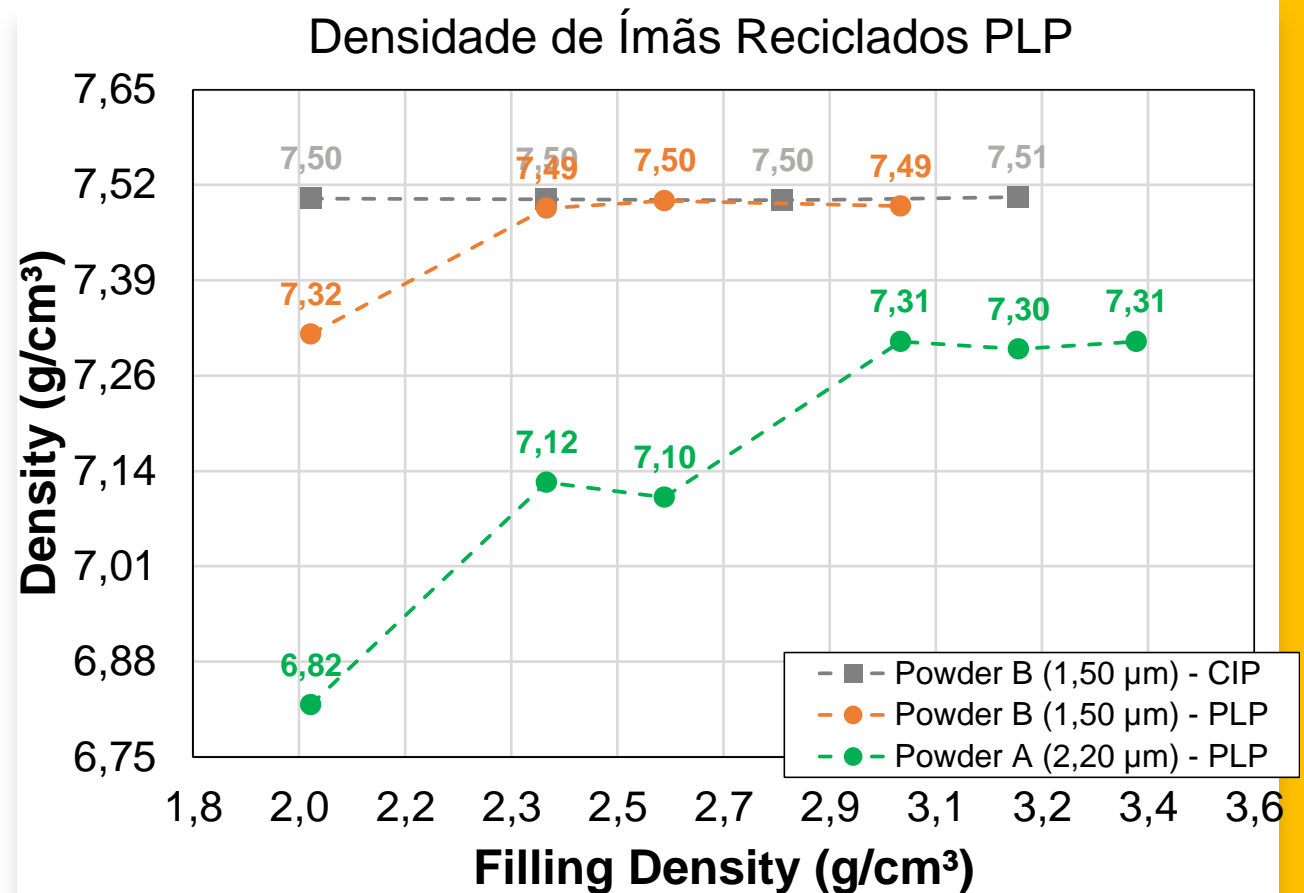
- Na reciclagem, ímã está sendo reprocessado;
- Cada etapa de processamento a mais implica incorporação de oxigênio;
- Assim, processo PLP pode ser uma forma de contornar o problema;
- Além das questões de *net shaping* já discutidas, associadas ao melhor aproveitamento de matérias primas!

Estudo de Caso: Rota de reciclagem de ímãs de aerogerador utilizando o *magnet-to-magnet approach* via PLP



Pressless Processing PLP

- Ímãs PLP densificam mesmo sem aplicação de pressão?
- Utilizando densidade de preenchimento do molde e tamanho de partícula apropriados, sim, conforme gráfico ao lado.

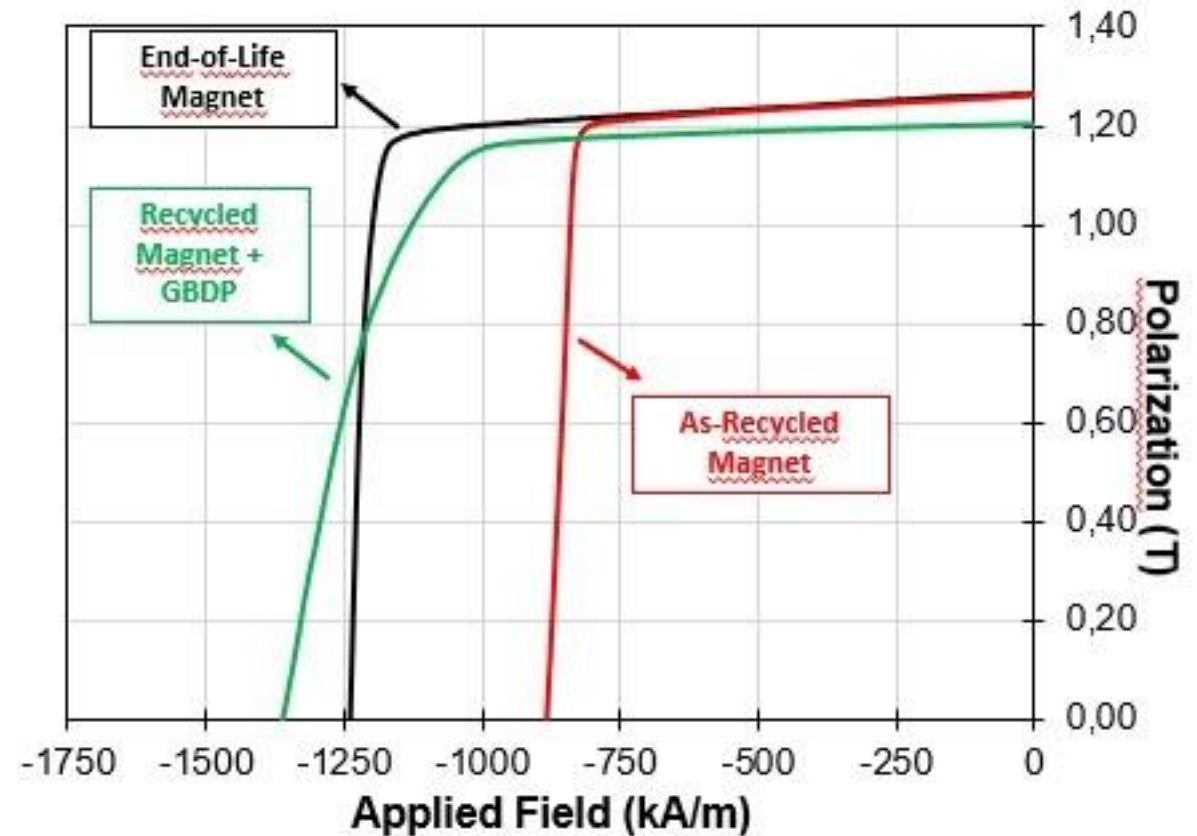


Curvas de densidade do ímã final em função da densidade de preenchimento, para diferentes tamanhos de partícula:

- Curva cinza: **processo convencional**, tamanho de partícula **1,5 µm**
- Curva laranja: processo **PLP**, tamanho de partícula **1,5 µm**
- Curva verde: processo **PLP**, tamanho de partícula **1,5 µm**

Pressless Processing PLP

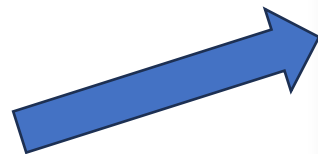
- Em termos de propriedades magnéticas...
- Decréscimo de propriedades pode ser atribuído a oxidação, mas é possível reciclar o ímã e obter propriedades adequadas;
- A coercividade pode até ser completamente restaurada utilizando técnicas como GBD, abordada na apresentação anterior.



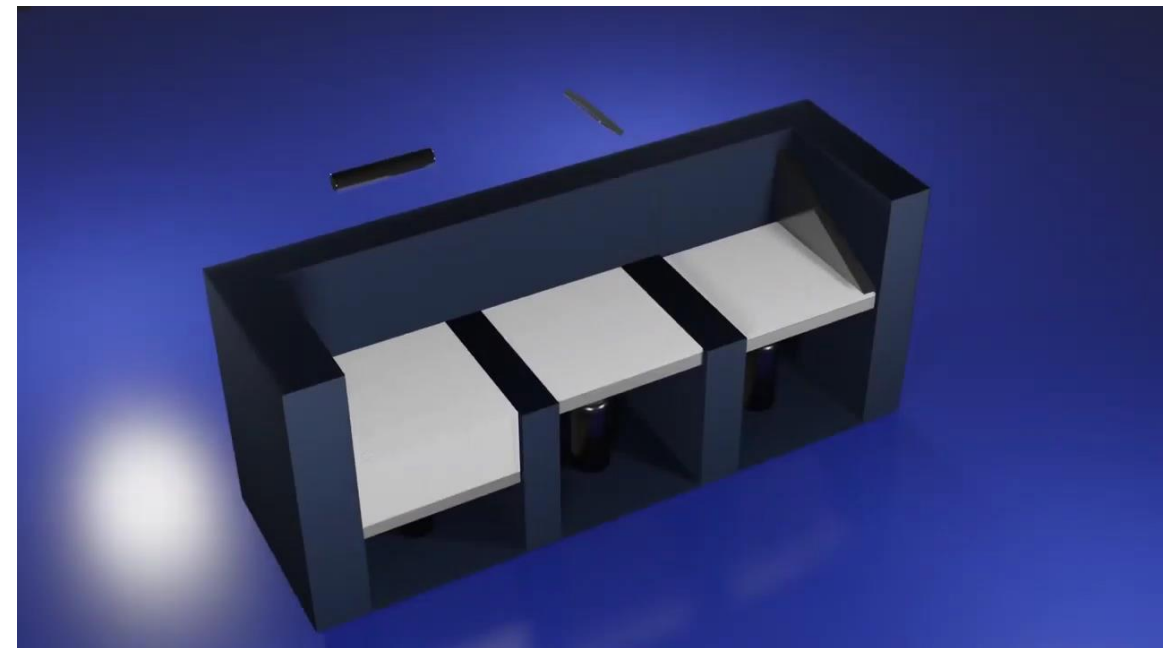
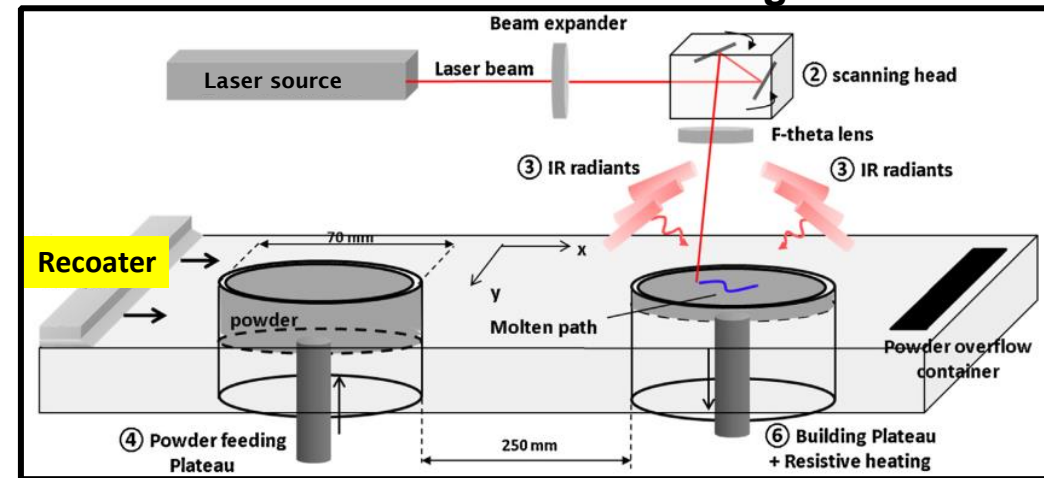
Ímã	Remanência (T)	Coercividade (kA/m)
<i>Fim de Vida</i>	<i>1,25</i>	<i>1250</i>
<i>Reciclado</i>	<i>1,25</i>	<i>860</i>
<i>Reciclado + GBD</i>	<i>1,20</i>	<i>1300</i>

Fusão em Leito de Pó a Laser

- Possibilidade de obter **ímãs compósitos**;
- Carga de impressão (*feedstock*) = **partículas magnéticas + partículas poliméricas** (ligante)
- Laser promove **fusão seletiva do polímero**;
- Como ocorre o processo?



Selective Laser Sintering



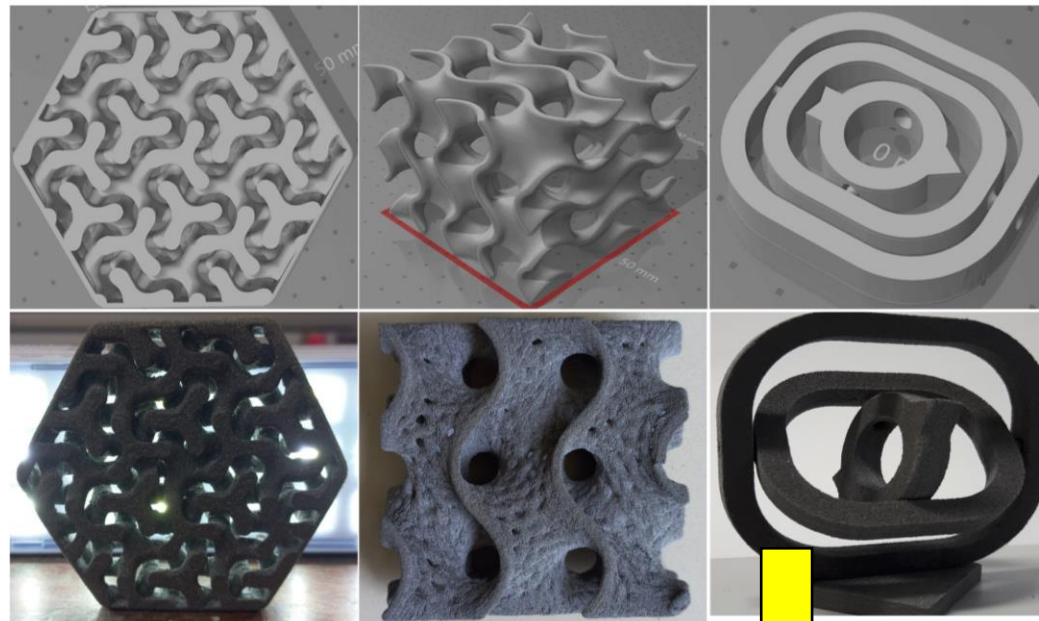
Fusão em Leito de Pó a Laser

- Plataforma de alimentação para cima;
- Espalhador conduz pó do *feedstock* até a plataforma de construção;
- Laser é irradiado;
- Plataforma de construção para baixo;
- Processo se repete.



Fusão em Leito de Pó a Laser

- **Parâmetros importantes:**
- De **processo**: potência do laser, velocidade de varredura, estratégia de varredura, espessura das camadas, ambientação do *feedstock*, etc;
- Do ***feedstock***: composição (quantidade de polímero), distribuição de tamanho de partículas, morfologia de partículas, etc.



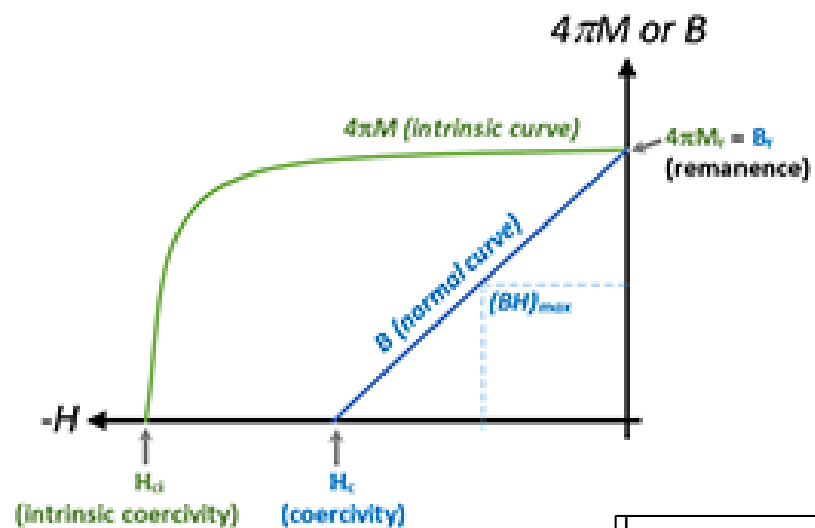
Exemplos de peças fabricadas

magma

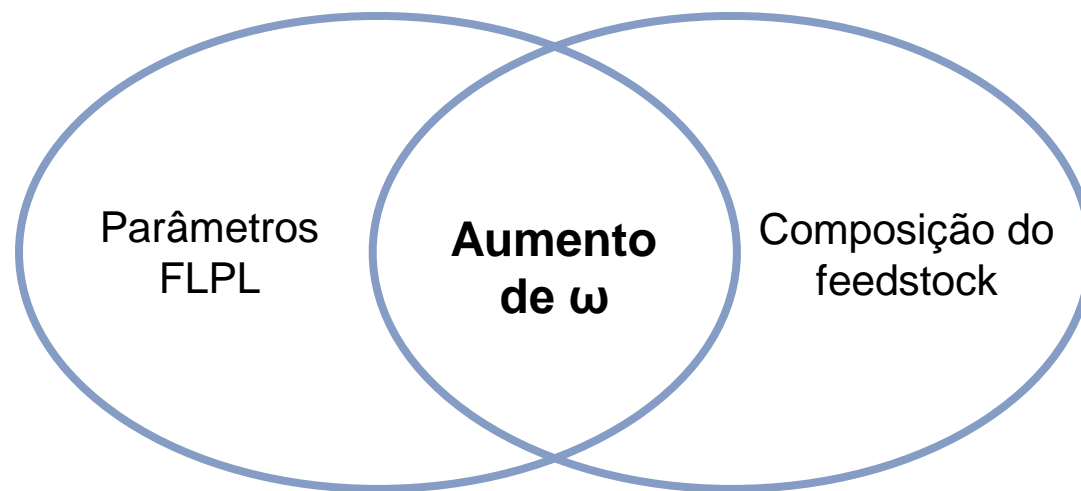


Fusão em Leito de Pó a Laser

- **DESAFIO: como aumentar a remanência (B_r) dos ímãs compósitos fabricados?**
- B_r depende de:
 - Polarização de saturação (J_s)
 - **Carga magnética (ω)**
 - **Grau de alinhamento das partículas ($\langle \cos\theta \rangle$)**
- Primeiro *approach*: aumentar ω

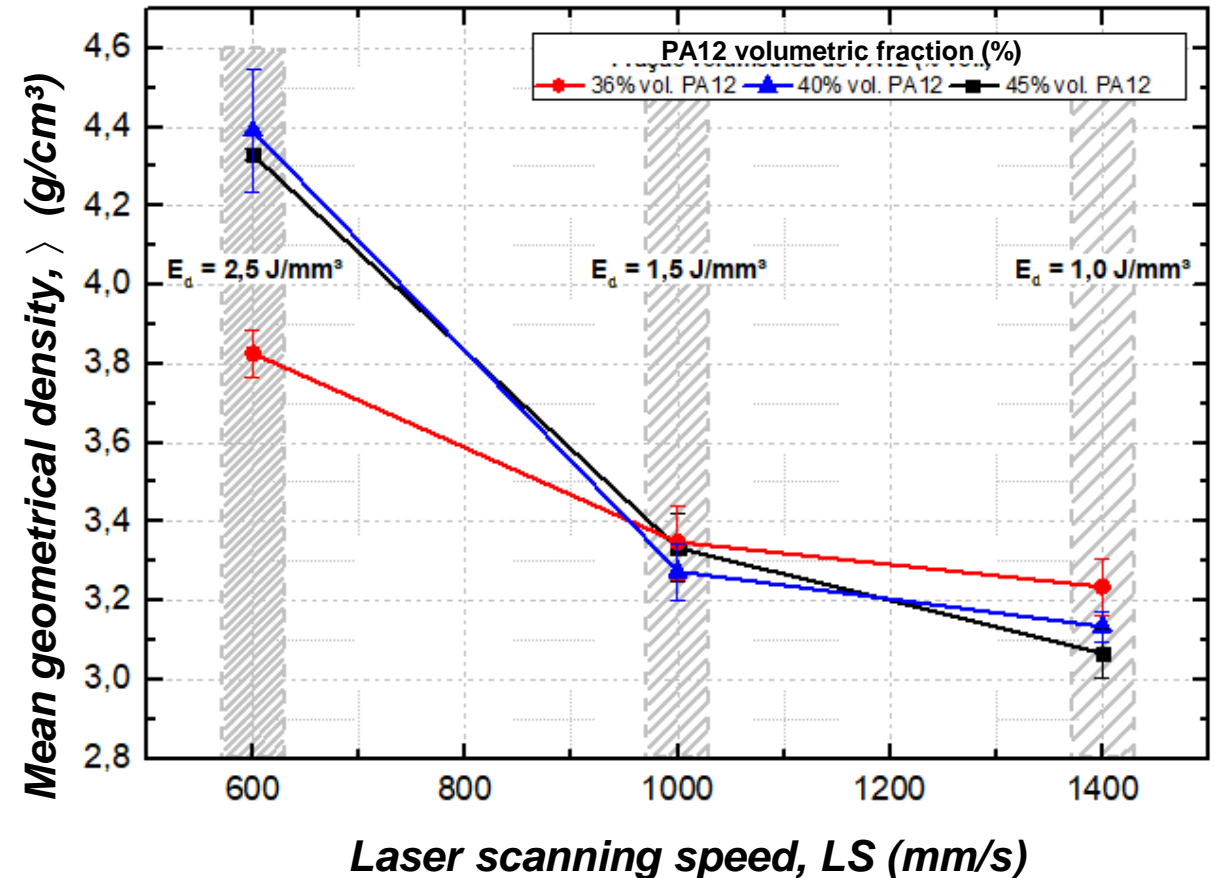


$$B_r = \langle \cos \theta \rangle * \omega * J_s$$



Fusão em Leito de Pó a Laser

- Exemplos de parâmetros:
- Velocidade de varredura do laser
 - **Menor velocidade** implica **maior densidade de energia (E_d)**, promovendo **fusão mais eficiente** do polímero
- Fração de polímero no *feedstock*
 - **Balço entre frações volumétricas**
 - Partículas magnéticas vs. matriz polimérica vs. porosidade



- Gráfico de densidade geométrica da peça em função da velocidade de varredura do laser, para diferentes frações de polímero (36% vol., 40% vol., e 45% vol.);
- *Sweet spot*: velocidade de varredura 600 mm/s e 40% vol. Polímero.

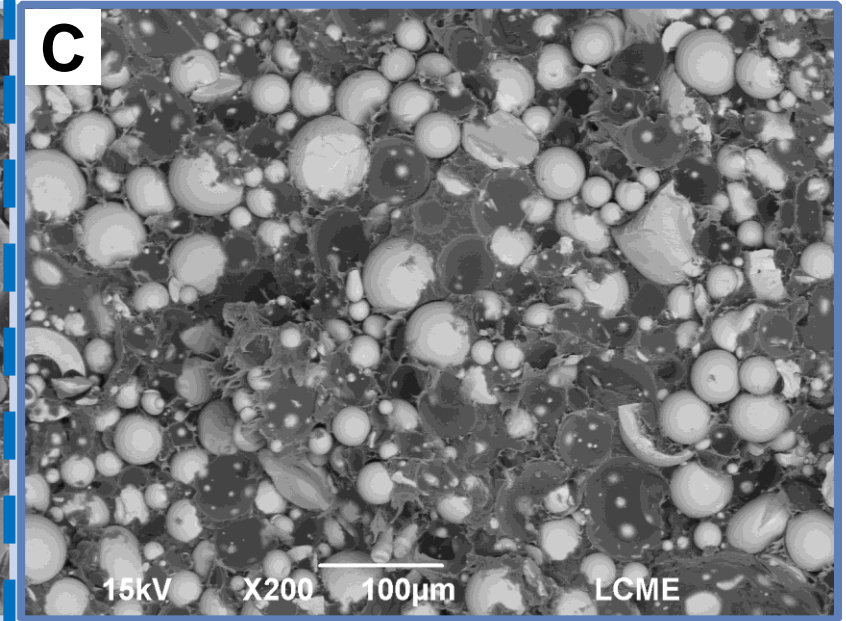
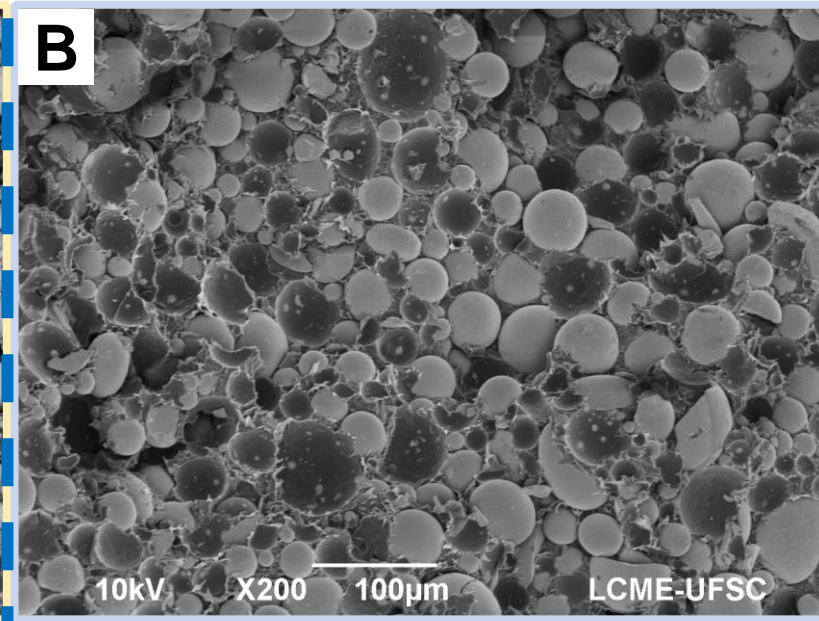
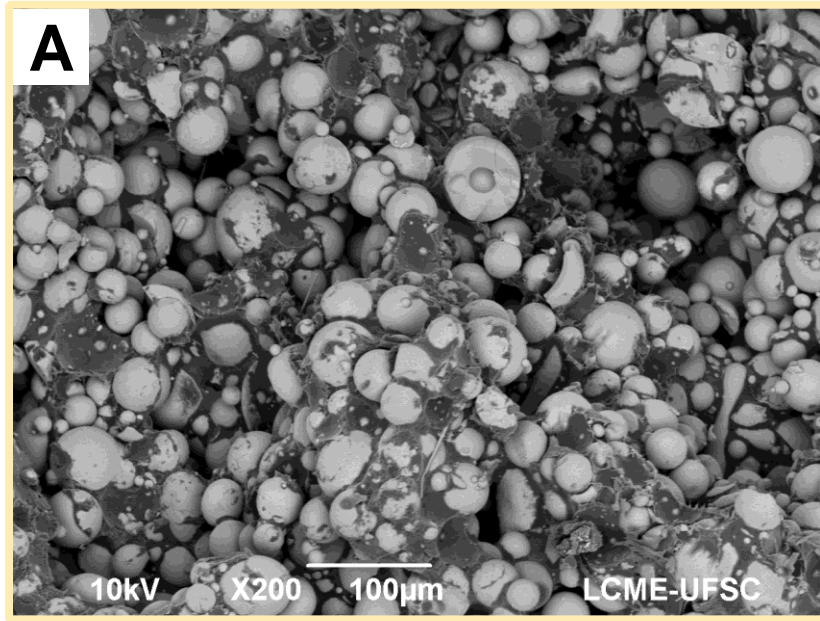
Aumentando a carga magnética de ímãs compósitos fabricados via FLPL...

- ★ Vol. PA-12: 36%
- ★ $\rho = 3.9 \text{ g/cm}^3$
- ★ Porosidade = 23%

Sweet Spot

- ★ Vol. PA-12: 40%
- ★ $\rho = 4.5 \text{ g/cm}^3$
- ★ Porosidade = 5%

- ★ Vol. PA-12: 45%
- ★ $\rho = 4.3 \text{ g/cm}^3$
- ★ Porosidade = 3%

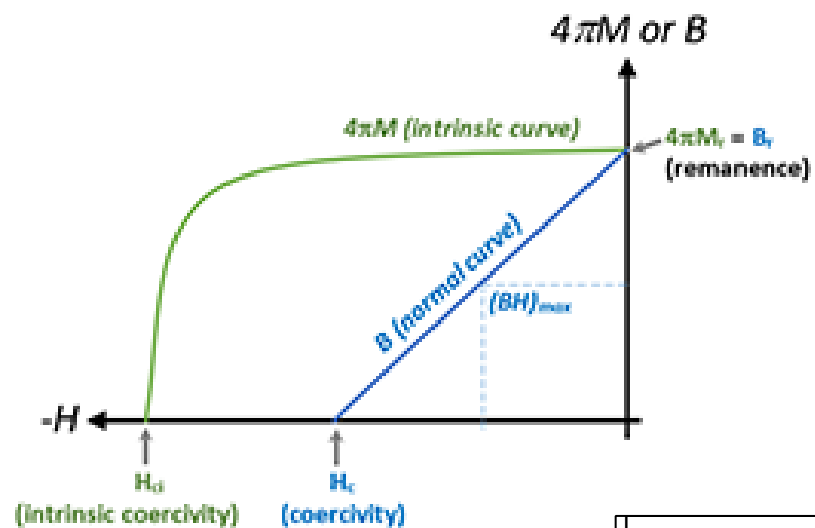


Aumento da fração de ligante no *feedstock*

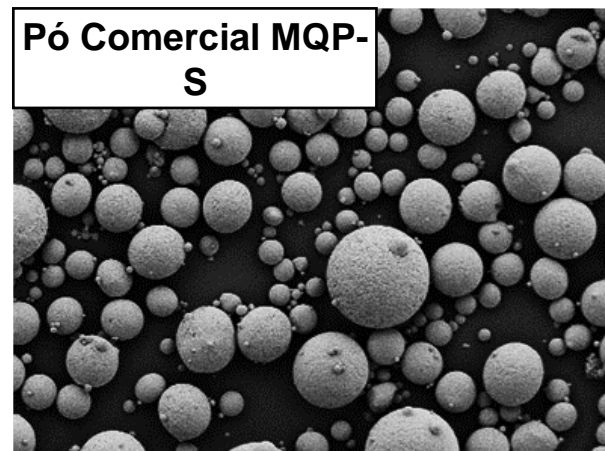
Velocidade de varredura do laser nos três casos foi a mesma, 600 mm/s.

Fusão em Leito de Pó a Laser

- **DESAFIO:** como aumentar a remanência (B_r) dos ímãs compósitos fabricados?
- B_r depende de:
 - Polarização de saturação (J_s)
 - Carga magnética (ω)
 - Grau de alinhamento das partículas ($\langle \cos\theta \rangle$)
- Segundo *approach*: induzir textura *in situ*



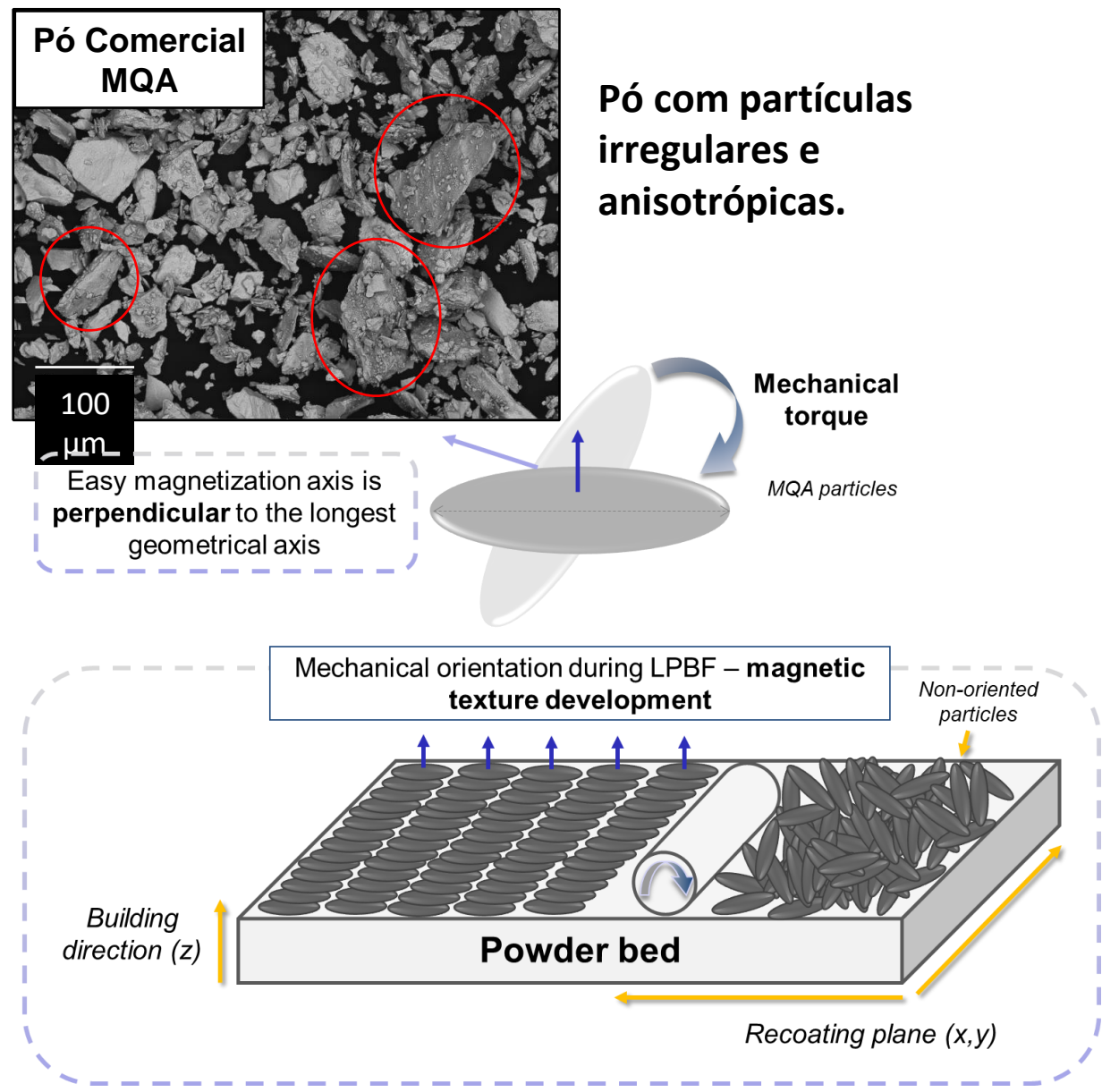
$$B_r = \langle \cos \theta \rangle * \omega * J_s$$



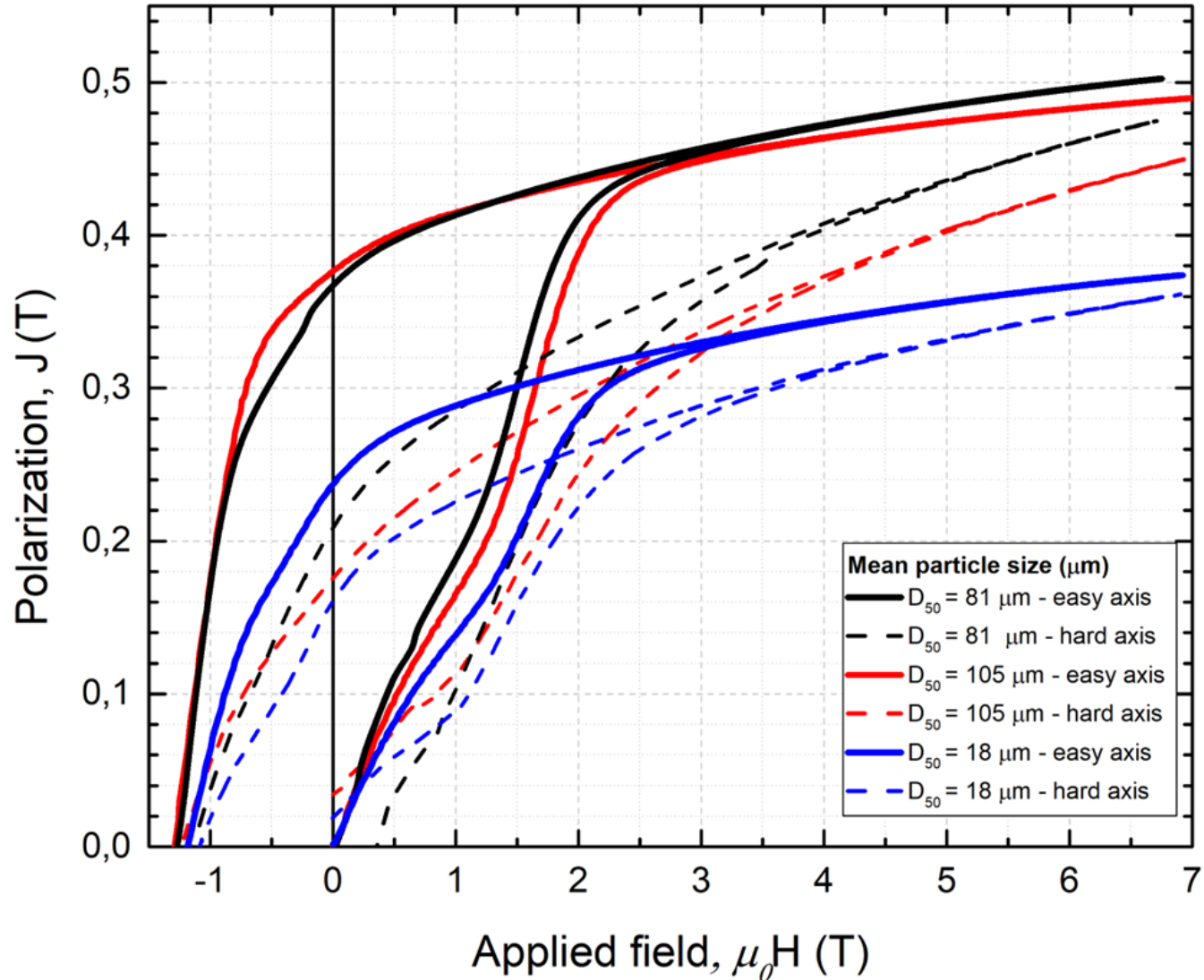
Pó com partículas esféricas e isotrópicas.

Fusão em Leito de Pó a Laser

- A alta razão de aspecto das partículas MQA faz com que durante a etapa de espalhamento elas tendam a se depositar na plataforma de construção de tal modo que uma textura é desenvolvida;
- Portanto, o ímã composto obtido é anisotrópico.



Desenvolvimento de Textura – Ímãs Compósitos Obtidos via FLPL



D_{50} (μm)	Porosity, $100 - \langle \cos \rangle_{\text{rel}}$ (%)	J_r^{easy} (mT)	J_r^{hard} (mT)	$\langle \cos \rangle$
81	33	363	188	0.75
105	34	377	176	0.78
18	50	237	160	0.64

Utilizando granulometria de feedstock adequada e estratégia de alinhamento aproveitando-se morfologia das partículas, foi possível obter ímãs compósitos com grau de alinhamento de até 78%.

Perspectivas

1. Utilização de processos *near net shape* sem pressão são alternativas para utilizar de forma mais estratégica matérias primas durante a fabricação de ímãs, evitando o desperdício de terras raras
2. Processo PLP
 - Potencial estratégia de processamento, em especial para reciclagem de ímãs
2. Manufatura Aditiva
 - Forma disruptiva de fabricar ímãs (a priori compósitos) de geometrias cada complexas e customizados

