

Sustentabilidade da cadeia produtiva dos imãs de terras raras

André Luiz Nunis da Silva

Palestra apresentada no V Seminário Brasileiro de Terras Raras, 2020.

*[https://www.cdtm.br/vseminariodeterrasrarasPeríodo 12 a](https://www.cdtm.br/vseminariodeterrasrarasPeríodo12a)
14/04/2021 - Online*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

+
+



Seu desafio é nosso

+
André Nunis
+
Laboratório de Processos Metalúrgicos
Área de Materiais Avançados



Sustentabilidade da Cadeia Produtiva dos imãs de Terras Raras

André Nunis
Laboratório de Processos Metalúrgicos
Área de Materiais Avançados



MINA

Concentração e separação



Redução



- Emissões gasosas (PFCs)
- Consumo de energia elétrica
- Consumo de fluoretos → rejeitos

- Consumo de H_2SO_4 , HCl
- Rejeitos com teores de U e Th

Liga: adição de Fe e B



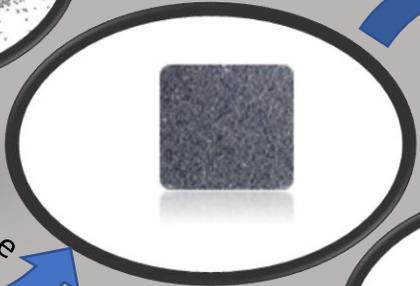
Hidretação e moagem



- Consumo de Hidrogênio e gases inertes
- Eletricidade
- Água

- Consumo de argônio
- Eletricidade
- Água

Orientação e compactação



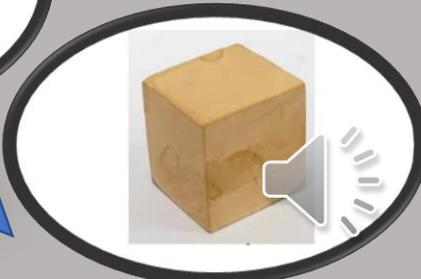
- Eletricidade
- Gases inertes
- Carepas

Tratamento Térmico



- Eletricidade
- Água
- Ácidos
- Ni, Cr, polímeros
- Rejeitos

Revestimento



Produção de 1 kg de ferro eletrolítico

Alimentação	Quantidade por kg
Ferro	1.1 kg
Eletricidade	2 kWh

Rejeitos sólidos	Quantidade por kg
Lama de FeCl ₃	0.25 kg

Produção de 1 kg de ímã Nd(Dy)FeB com revestimento de níquel

Alimentação	Quantidade por kg
Ferro eletrolítico	830 g
Boro	15 g
Nd	310 g
Ni	11 g
Dy ₂ O ₃	91 g
Eletricidade (sinterização)	8.4 kWh
Eletricidade (outros)	5.6 kWh
H ₂	0.6 kg
NaOH	1 g
H ₂ SO ₄	1.4 g
H ₂ O	6 kg

Emissões gasosas	Quantidade por kg
Ni	4.2 mg

Emissões aquosas	Quantidade por kg
Ni(NH ₂ SO ₃)	5.1 mg

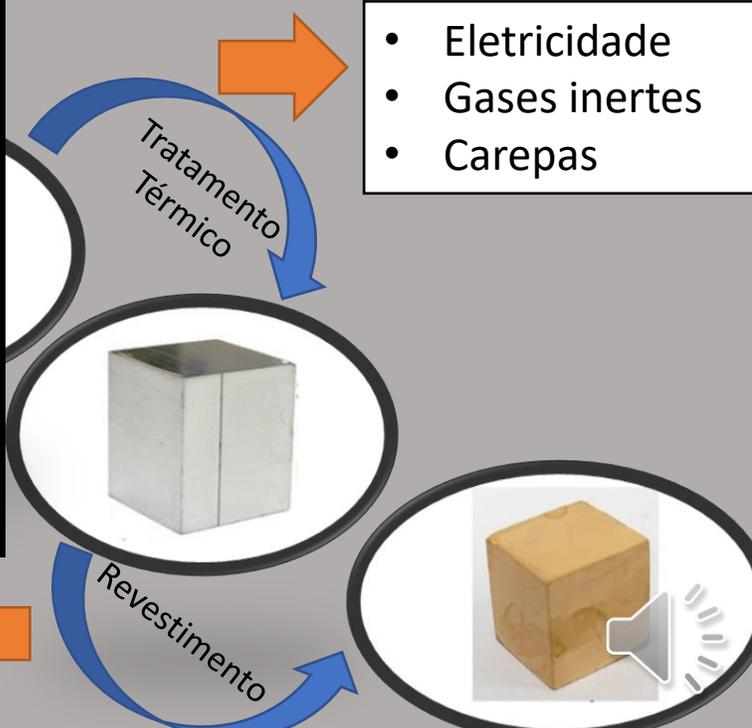
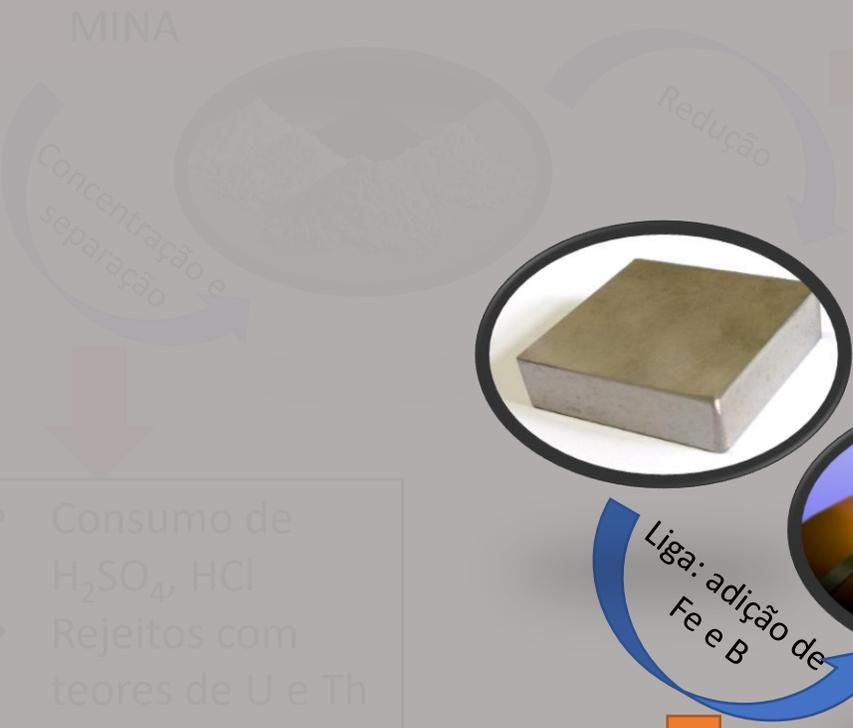
Rejeitos sólidos	Quantidade por kg
Carepa de de Nd(Dy)FeB	200 g
NiCl ₂ , Ni(NH ₂ SO ₃)	2.2 g

- Consumo de gás argônio e gases inertes
- Eletricidade
- Gases inertes
- Carepas

- Consumo de argônio
- Eletricidade
- Água

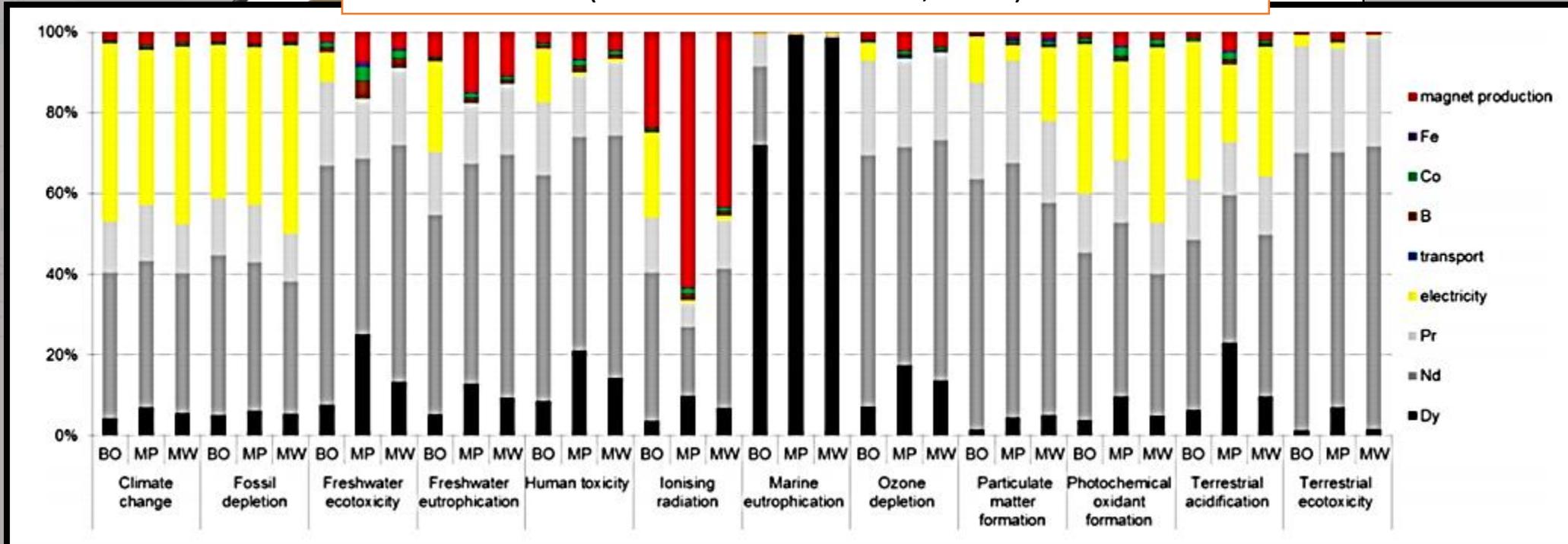
- Ácidos
- Ni, Cr, polímeros
- Rejeitos

Dados de Nordelöf e Tillman (2018)



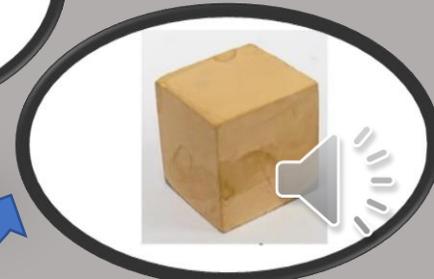
BO – Bayan Obo (China)
 MW – Mount Weld (Australia)
 MP – Mountain Pass (EUA)

Contribuição do impacto para a produção de 1 kg de ímã
 (Extraído de Marx et al, 2018)



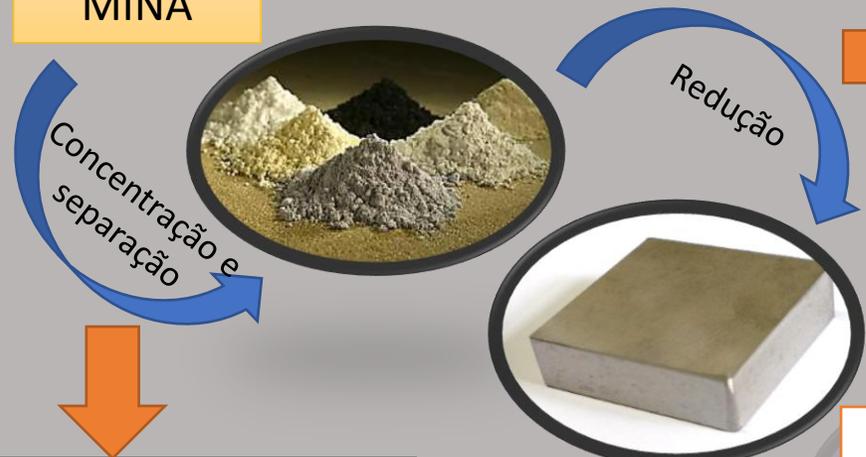
• Água

• Eletricidade
 • Água
 • Ácidos
 • Ni, Cr, polímeros
 • Rejeitos



Revestimento

MINA

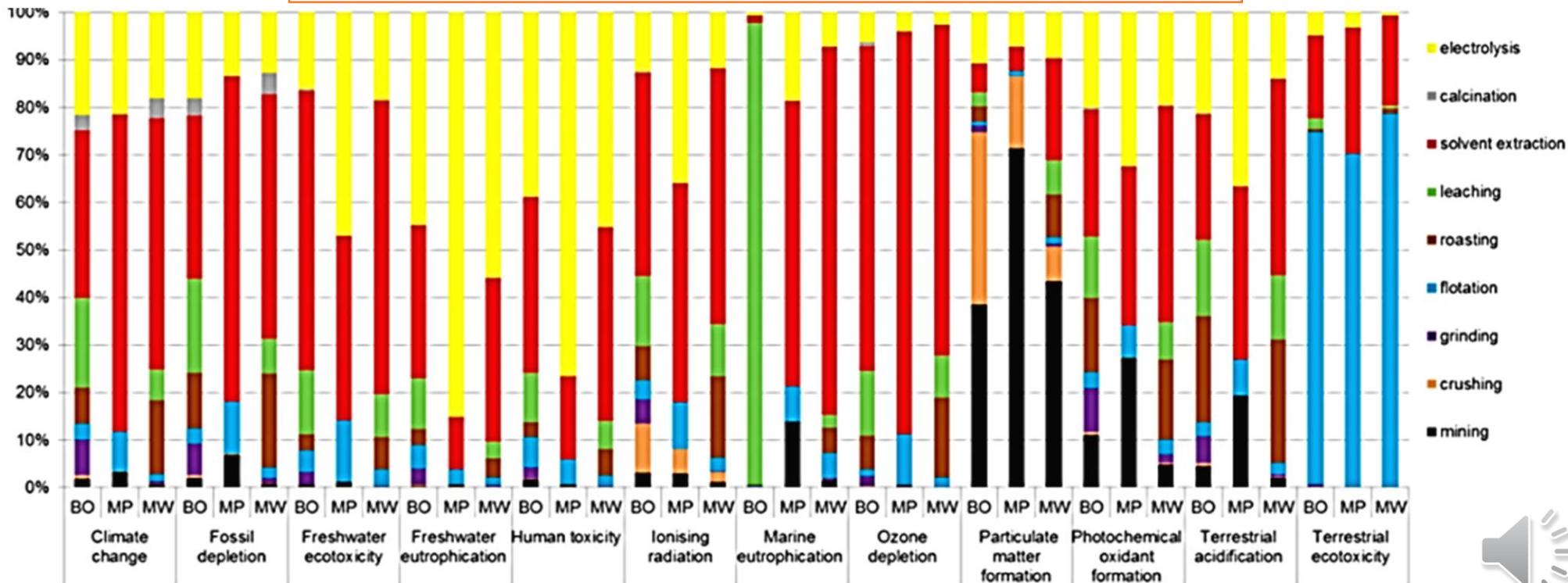


- Emissões gasosas (PFCs)
- Consumo de energia elétrica
- Consumo de fluoretos → rejeitos

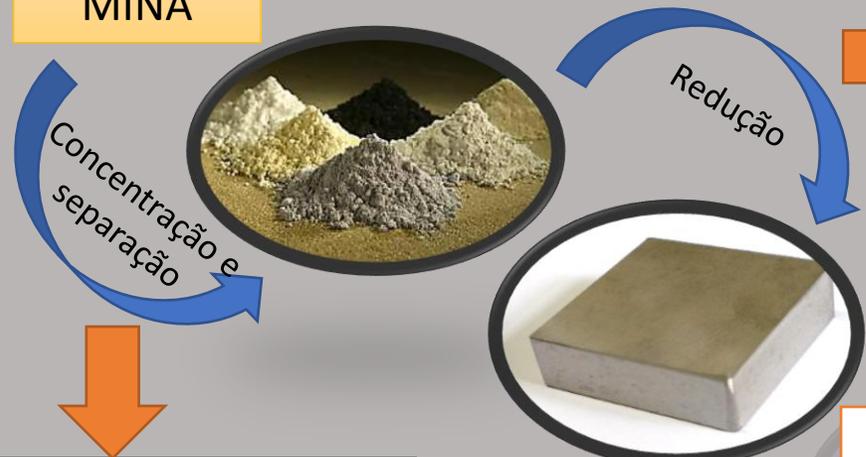
BO – Bayan Obo (China)
 MW – Mount Weld (Australia)
 MP – Mountain Pass (EUA)

- Consumo de H₂SO₄, HCl
- Rejeitos com teores de U e Th

Contribuição do impacto para a produção de 1 kg de Nd
 (Extraído de Marx et al, 2018)



MINA

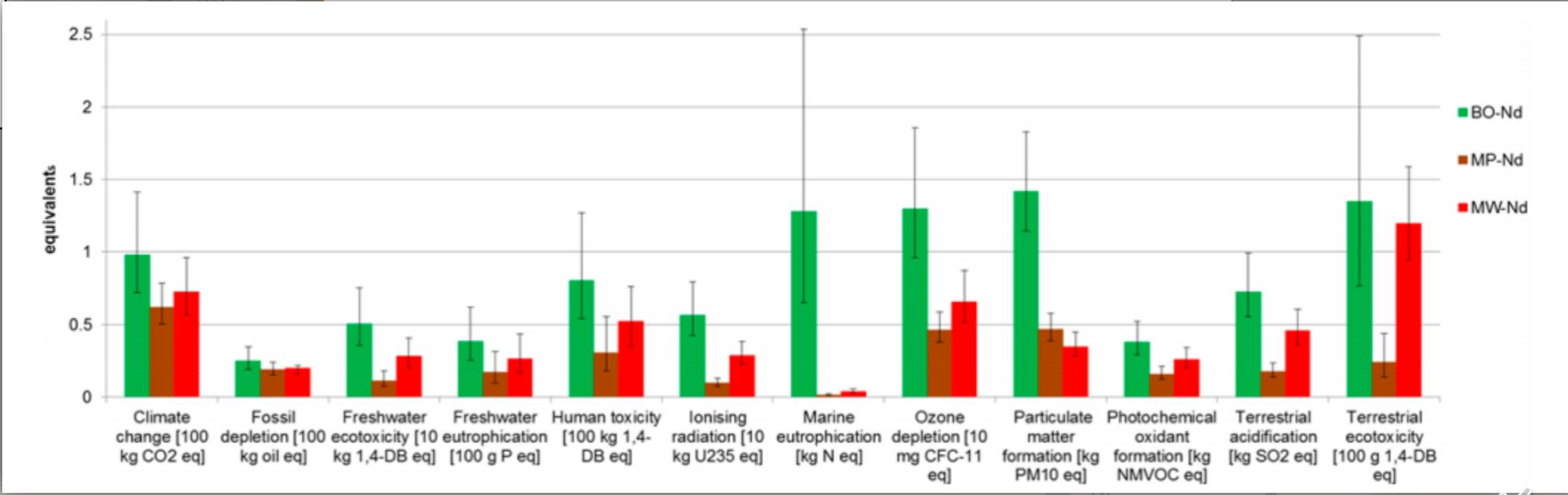


- Emissões gasosas (PFCs)
- Consumo de energia elétrica
- Consumo de fluoretos → rejeitos

BO – Bayan Obo (China)
 MW – Mount Weld (Australia)
 MP – Mountain Pass (EUA)

- Consumo de H₂SO₄, HCl
- Rejeitos com teores de U e Th

Impacto ambiental para a produção de 1 kg de Nd (Extraído de Marx et al, 2018)



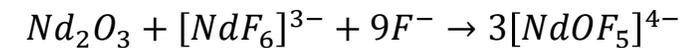
Eletrólise em sais fundidos



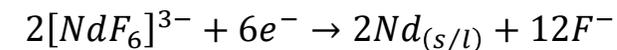
Exemplo: Nd_2O_3

➤ Alimentação de Nd_2O_3

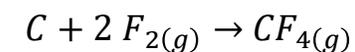
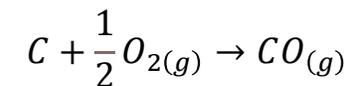
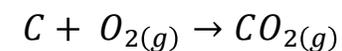
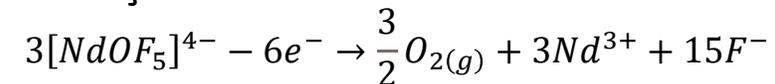
➤ Dissolução



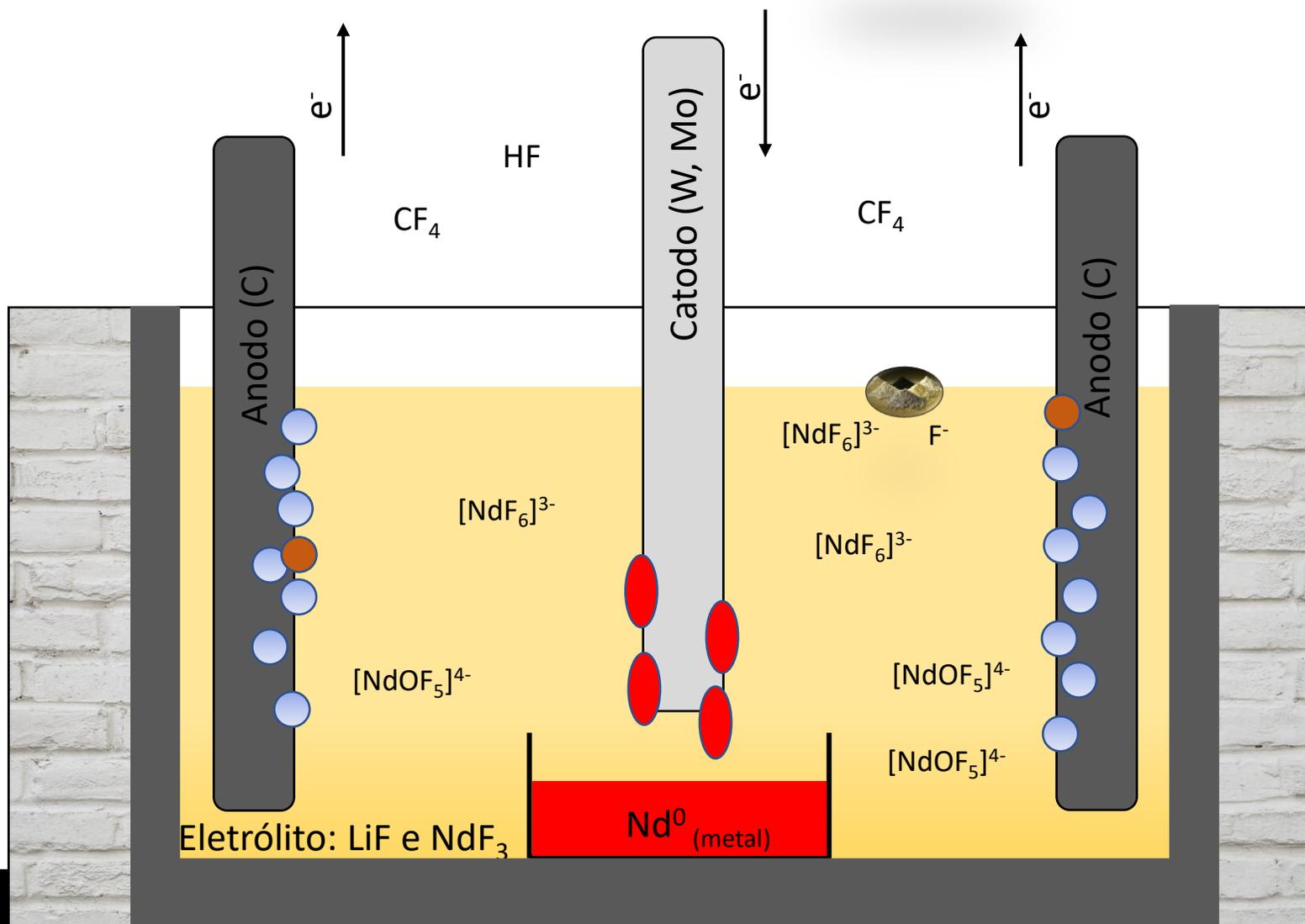
➤ Redução no catodo



➤ Oxidação no anodo

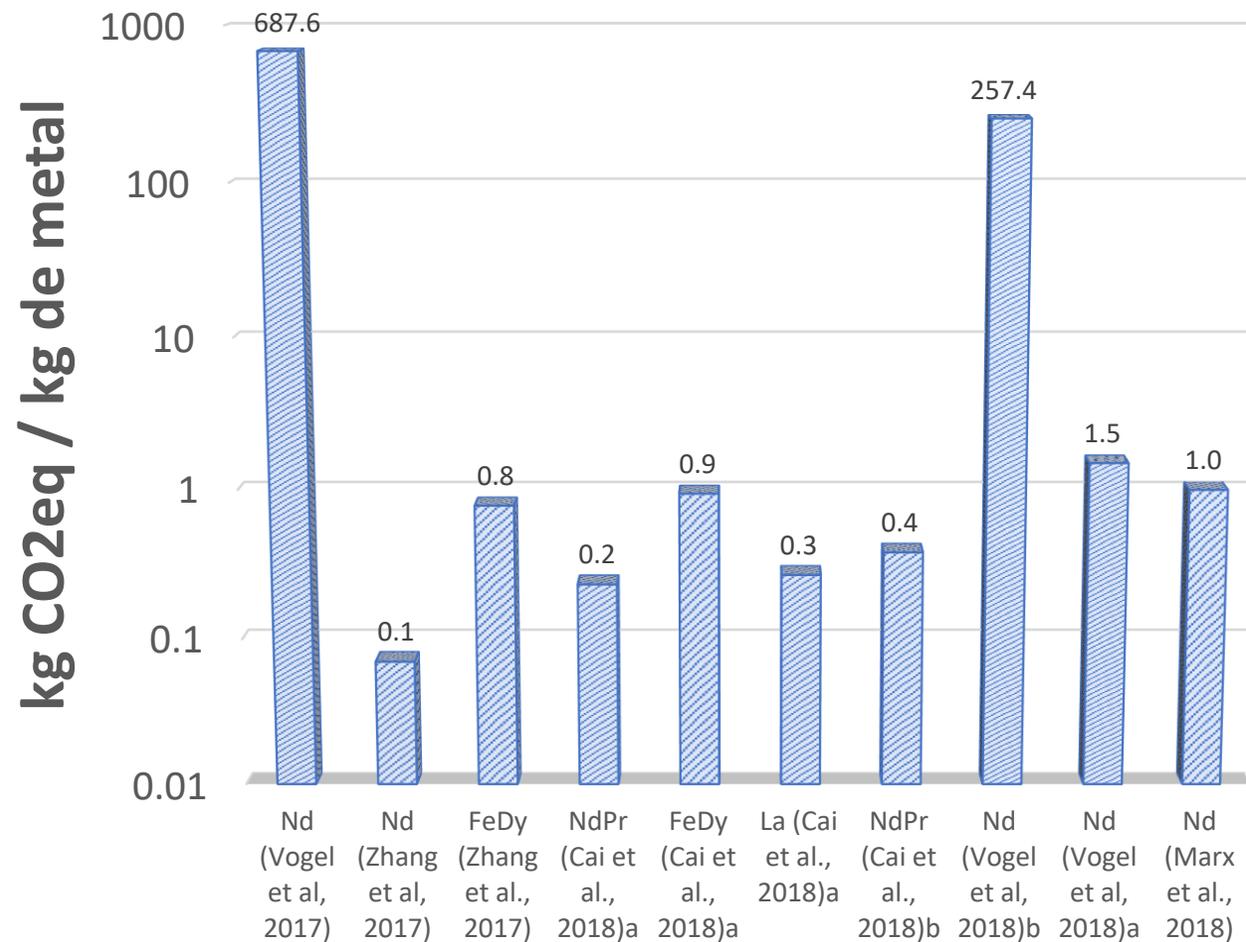


Emissão de PFCs



Comparação entre publicações

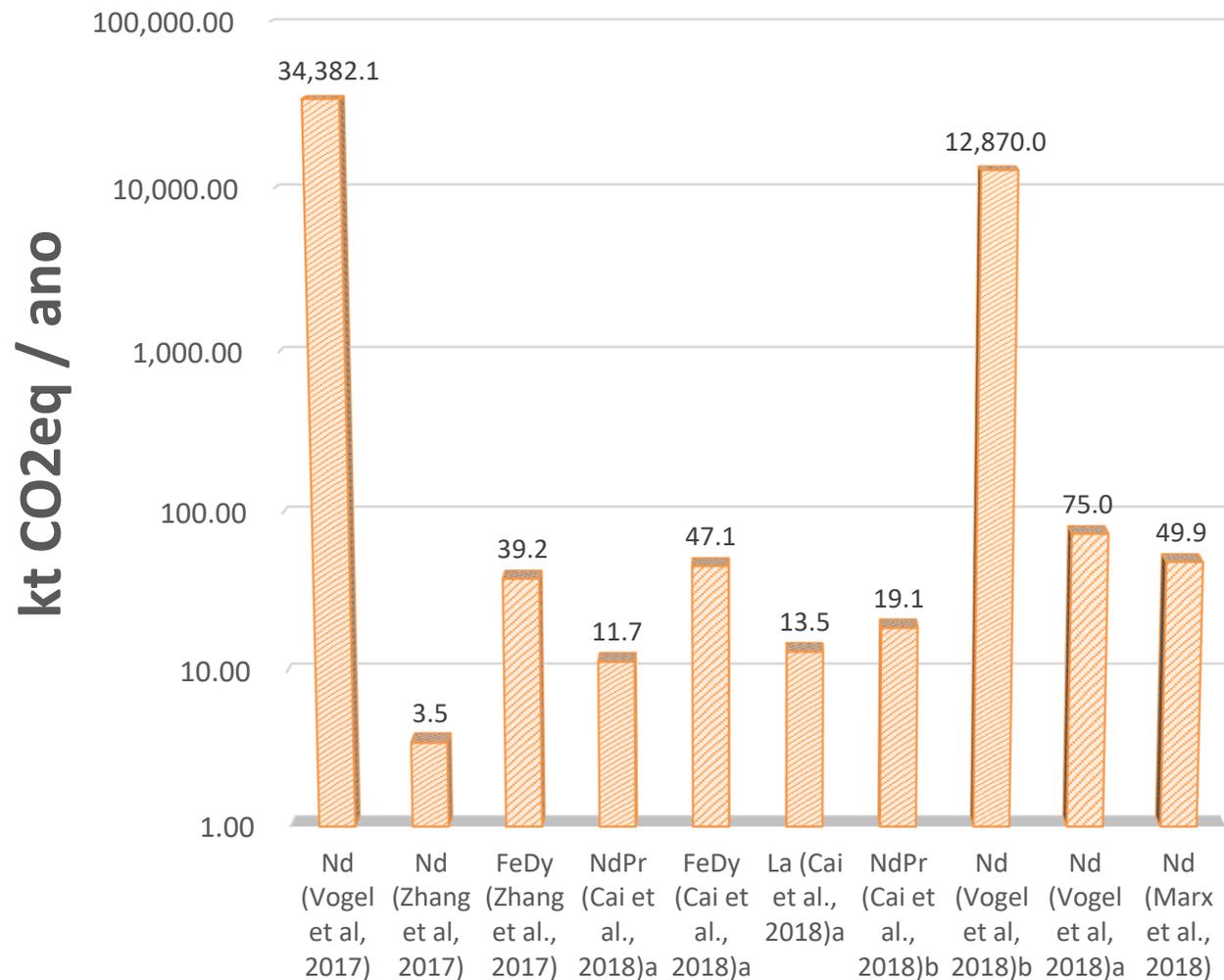
- (1) Fatores de emissão de PFCs mensurados com base na operação de uma célula eletrolítica em escala laboratorial e emissões equivalentes a operação contínua em condição de efeito anódico (Vogel and Friedrich, 2017);
- (2) Estudo conduzido na unidade produtiva da Qiandong RE Group (Zhang et al, 2017);
- (3) (a) Novo estudo conduzido na unidade produtiva da Qiandong RE Group após automação da alimentação (b) Estudo conduzido na unidade produtiva de National Ionic RE Center. (Cai et. al., 2018);
- (4) Estimativas de produção de PFCs para um cenário de (a) média emissão e para um cenário de (b) baixa emissão, valor total para emissão de PFCs (Vogel and Friedrich, 2018).
- (5) Estimativas realizadas em LCA (Marx et al, 2018).



Comparação entre publicações

- (1) Fatores de emissão de PFCs mensurados com base na operação de uma célula eletrolítica em escala laboratorial e emissões equivalentes a operação contínua em condição de efeito anódico (Vogel and Friedrich, 2017);
- (2) Estudo conduzido na unidade produtiva da Qiandong RE Group (Zhang et al, 2017);
- (3) (a) Novo estudo conduzido na unidade produtiva da Qiandong RE Group após automação da alimentação (b) Estudo conduzido na unidade produtiva de National Ionic RE Center. (Cai et. al., 2018);
- (4) Estimativas de produção de PFCs para um cenário de (a) média emissão e para um cenário de (b) baixa emissão, valor total para emissão de PFCs (Vogel and Friedrich, 2018).
- (5) Estimativas realizadas em LCA (Marx et al, 2018).

Para produção de 50.000 t/ano



Indústria de alumínio em 2018 – 35 milhões de toneladas de CO₂eq

Como Reduzir as emissões na etapa de redução?

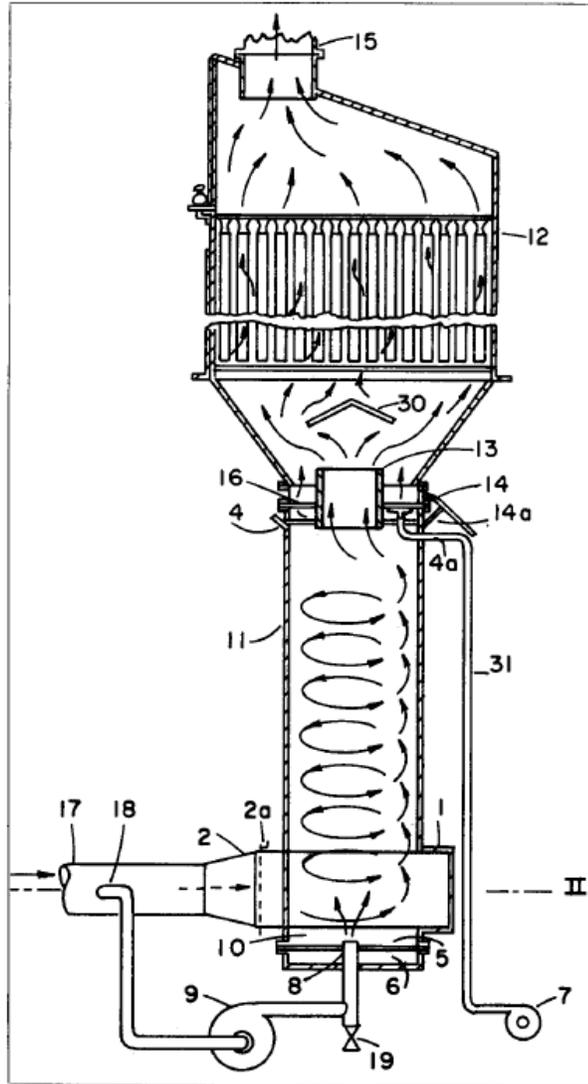


Abatimento



Minimizar a
produção de PFCs

Abatimento



Emissões na produção primária de Al

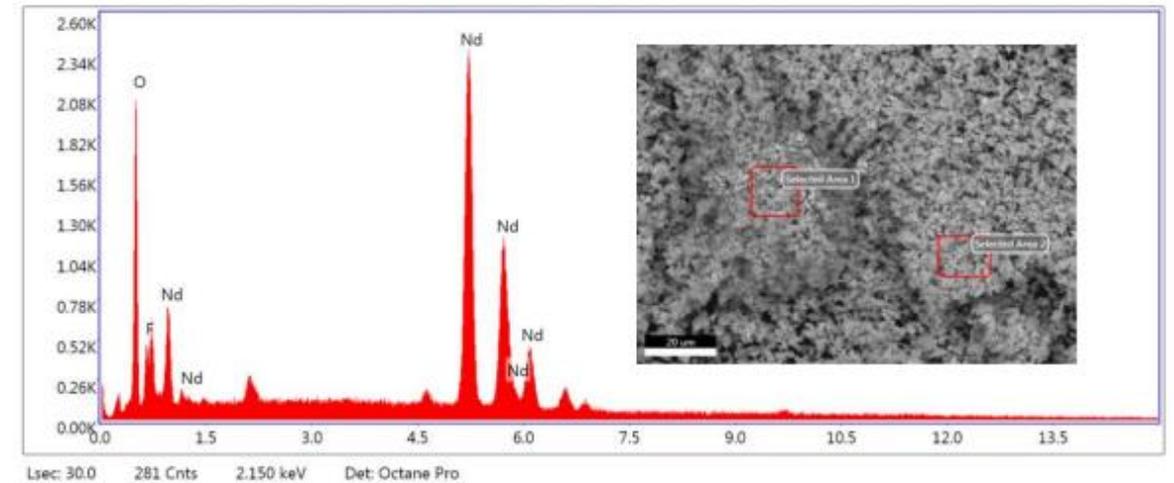
- Para abatimento dos fluoretos, a indústria do alumínio adota o sistema de *Dry Scrubbing* para adsorção em alumina.
- A alumina retorna para a célula eletroquímica
- Eficiência reportada de 99 % (gases que passam pelo equipamento)

Figura de
Lamb et al, 1982

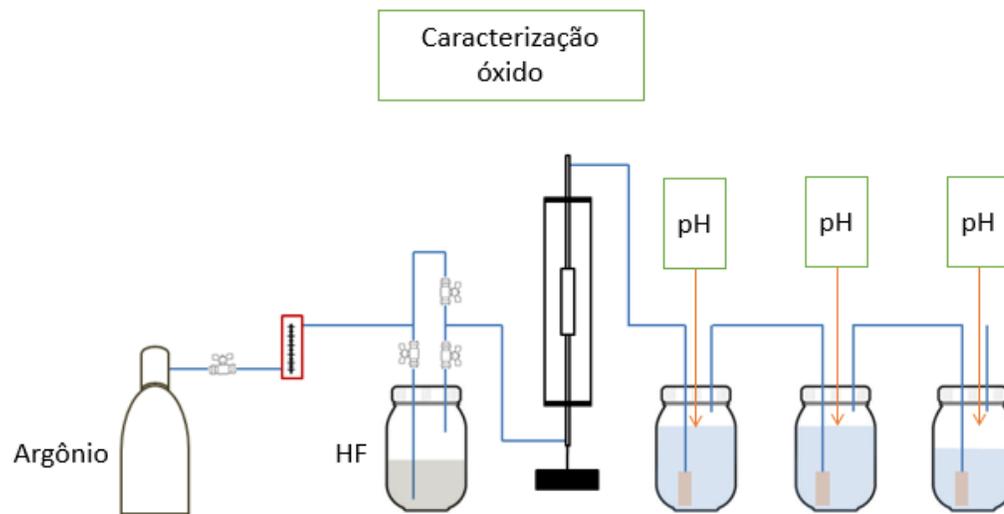
INCT - ADSORÇÃO DO HF

Mônica Yamazaki (2019)

- Realizar um comparativo entre Al_2O_3 e Nd_2O_3



Fonte: Própria



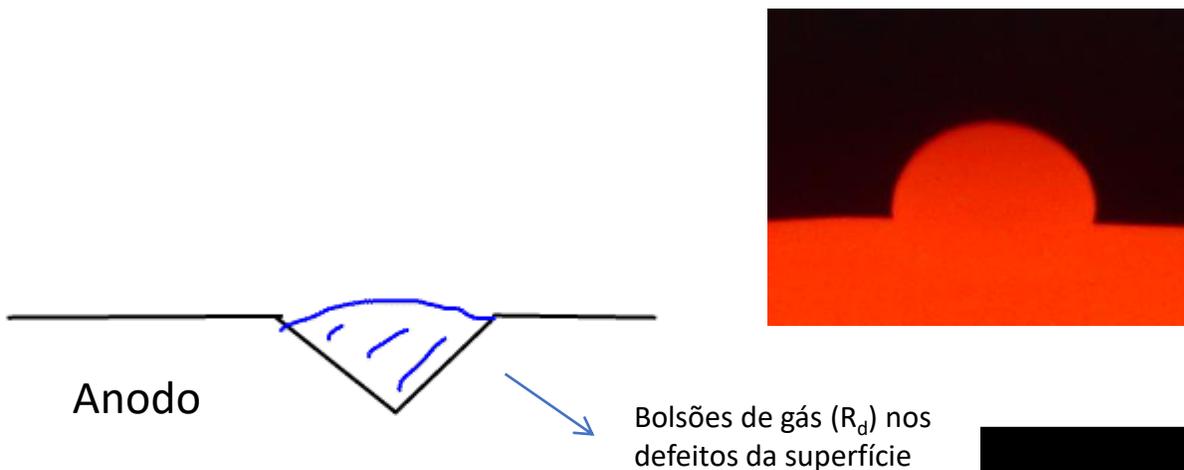
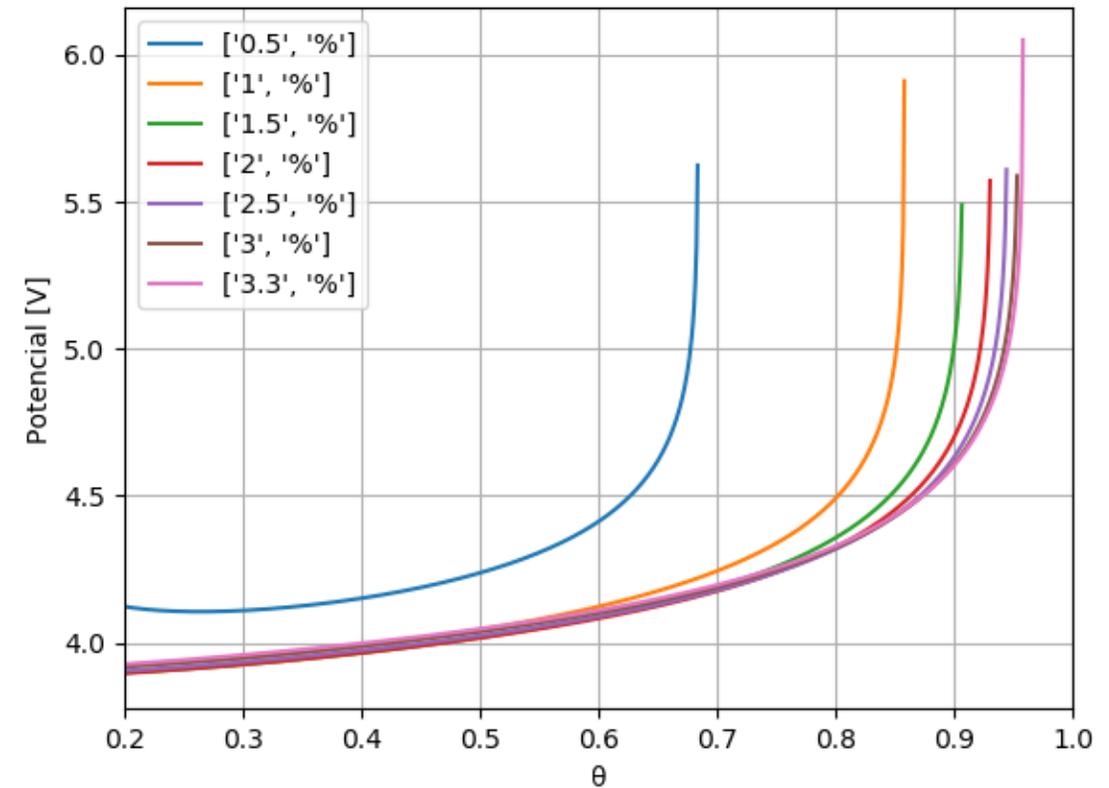
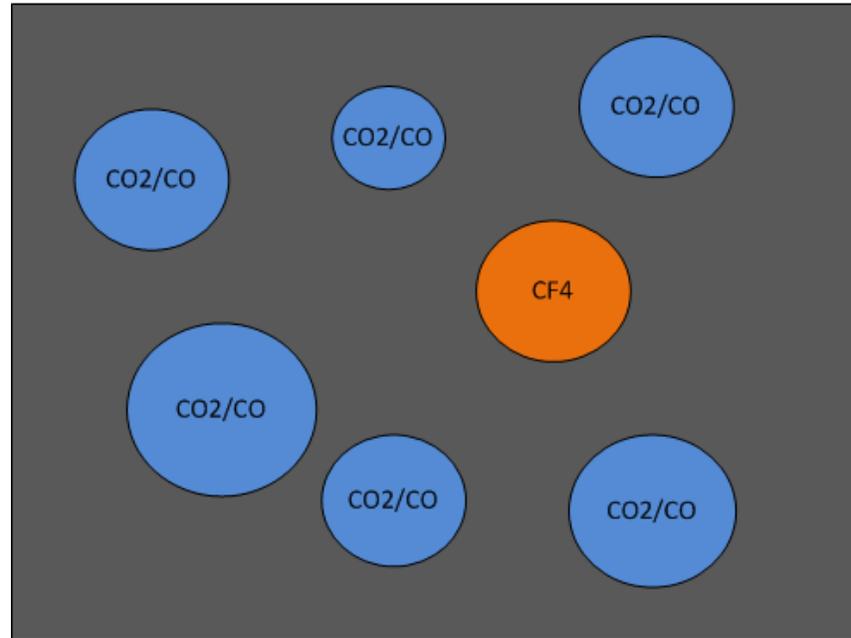
CF_4 – Não adsorve

Minimizar a produção de PFCs

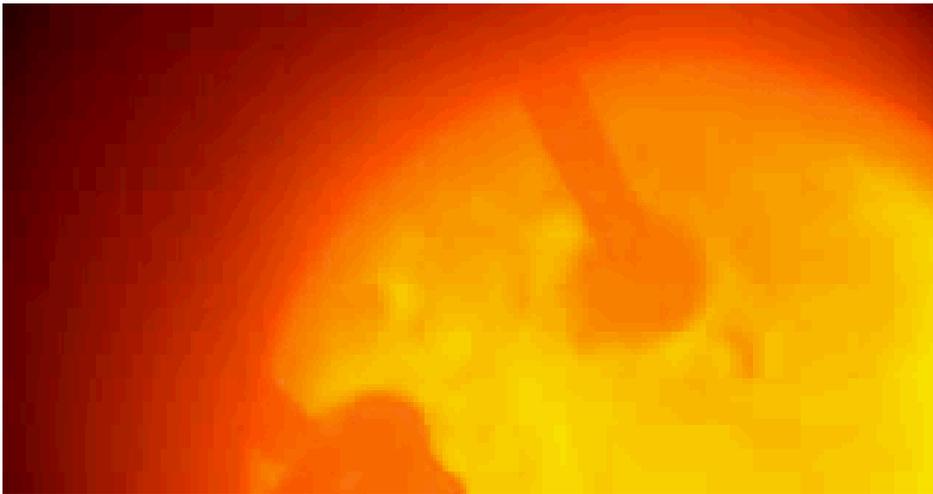
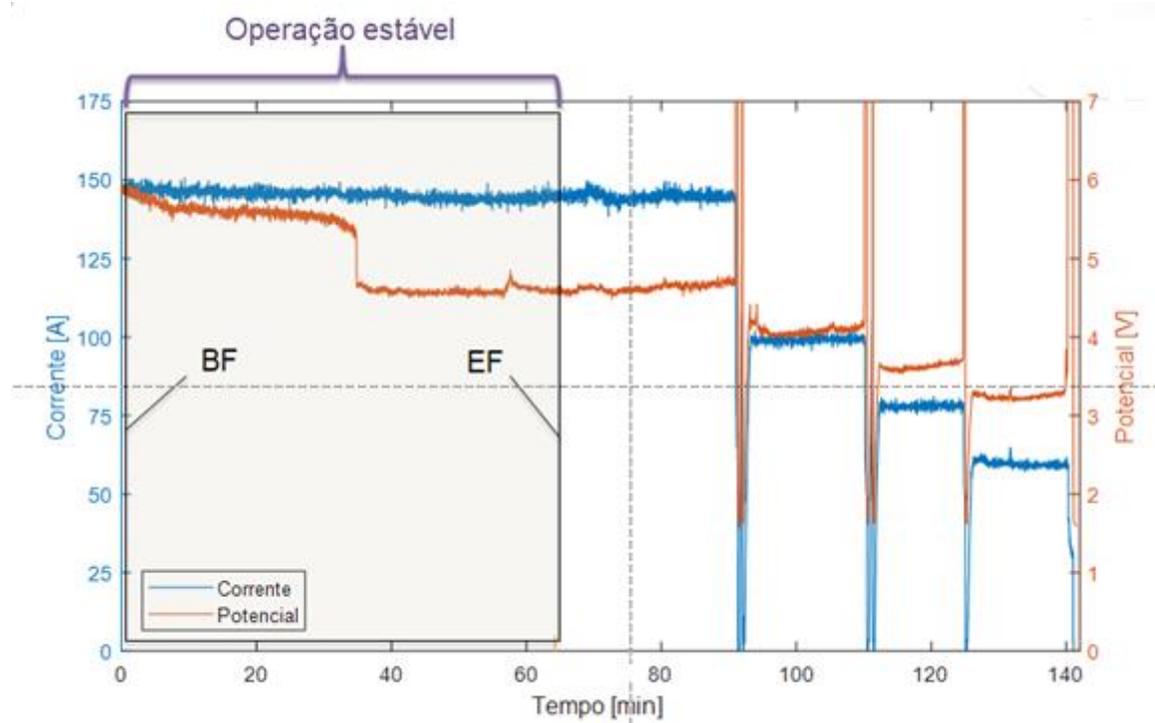
Compreensão dos fenômenos anódicos

$$E_{cel} = E + \eta_{s,anodo} + \eta_{diff,anodo} + \Delta\Phi - \eta_{s,catodo} + \Delta\Phi_{anodo} + \Delta\Phi_{catodo}$$

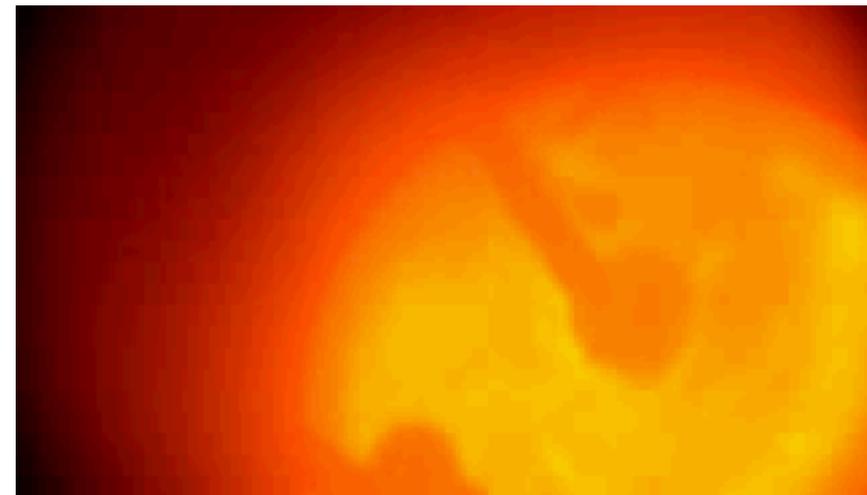
$$\eta_{diff,anodo} = \frac{RT}{\alpha F} \left[\ln \left(\frac{I}{A(1-\Theta)j_0} \right) - \ln \left(1 - \frac{v_A}{v_e} \frac{I}{Fk_A C_{\infty}} \right) \right]$$



Nucleação tipo 4 de acordo com Jones et al. (1999)



Alta concentração de óxido



Baixa concentração de óxido
Perto do efeito anódico

Conclusões

- Trabalhos sobre impacto da produção de ímas de TR na última década;
- Dados escassos e incompletos da produção prejudicam a avaliação do real cenário;
- Devem ser adotadas medidas confiáveis para medições de emissões;
- Foco deve ser dado em parâmetros da produção para minimizar o impacto das diferentes etapas da produção de ímãs.

+

+

seu desafio
é nosso

O IPT é o seu melhor
parceiro para inovar.

André Nunis
alnunis@ipt.br

Agradecimentos pelo apoio financeiro:

CAPES: 23038000776/2017-54

CNPq: 465719-2014-7 / 153438/2016-9

FAPESP: 2014/50887-4

www.ipt.br

