Resumo estendido dos resultados do projeto

INCT PATRIA

Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia

Projeto 465719/2014-7

No período 2018-2025

Os pesquisadores do INCT Ímãs de Terras Raras têm sido assediados por jornalistas interessados em entender o que está acontecendo no mundo e quais as oportunidades brasileiras, neste início de 2025. Nunca os ímãs de terras raras chamaram tanta atenção da mídia mundial. O presidente americano citava os riscos estratégicos associados com a falta de produção de terras raras e de ímãs nos EUA para ameaçar o mundo: tomar a Groenlândia, anexar o Canadá, avançar na Ucrânia. Ao mesmo tempo intensificou ações dos governos anteriores quanto a ofertas de recursos financeiros para empresas trazerem de volta para o domínio americano a mineração, a produção de concentrado, a separação dos elementos e a produção de ímãs. Por outro lado, a guerra de tarifas com a China incluiu tais restrições à exportação de ímãs chineses que não só as montadoras de automóveis americanas e europeias estão tendo problemas, mas tem atingido a própria WEG, maior fabricante brasileiro de motores elétricos com crescente uso desses ímãs. Ao mesmo tempo o US Geological Survey aumentou o tamanho das reservas brasileiras de terras raras, colocando-as em segundo lugar, logo atrás das reservas chinesas. A esse destaque se juntaram anúncios de várias *Junior Mining Companies* sobre seus avanços nas operações brasileiras, reforçando a ideia de que o país tem uma oportunidade real nesse mercado. A pergunta sempre colocada pelos jornalistas é sobre as chances de superar nosso tradicional papel de fornecedor de matéria prima.

As origens deste INCT podem ser traçadas a reuniões ocorridas em 2010, organizadas por Carlos A. Schneider, da CERTI, em Santa Catarina, logo depois de um pico mundial de preço das terras raras, associado a consequências de conflito de fronteiras entre Japão e China. O domínio chinês da cadeia produtiva e do mercado mundial dos ímãs já estava então estabelecido, mas o Japão, inventor do ímã sinterizado de NdFeB e que continuava sendo um importante produtor de ímãs, sentiu-se claramente ameaçado. Recursos financeiros japoneses passaram a apoiar uma mineradora australiana, Lynas, a avançar na implantação de instalação

da separação dos elementos de terras raras na Malásia, hoje o maior produtor do elemento químico neodímio fora da China.

Naquele momento em que vários projetos de mineração de terras raras foram anunciados no Brasil e que a empresa catarinense WEG, maior fabricante de motores elétricos do Brasil, inclusive motores a ímãs permanentes, demonstrava interesse no tema, Carlos Schneider imaginou uma oportunidade para os pesquisadores de Santa Catarina que há décadas investigavam a fabricação desses ímãs, liderados pelo professor Paulo Wendhausen. Os pesquisadores brasileiros que se reuniram nos eventos então promovidos já identificavam a necessidade de desenvolver as etapas entre a concentração e a fabricação de ímãs, e incluindo a abordagem da questão ambiental, completando a visão da cadeia produtiva. O INCT Terras Raras foi proposto em 2014, juntando pesquisadores da CERTI, CETEM, IPT, UFSC, USP e IPEN.

Naquele momento a empresa CBMM decidiu investir no aproveitamento das reservas de terras raras existentes na sua mina de nióbio em Araxá. Seu sucesso técnico no desenvolvimento interno das técnicas de concentração do minério e na planta piloto de separação de terras raras a levou a apoiar um projeto Embrapii com o IPT para investigar etapas seguintes da cadeia, a transformação do óxido de neodímio em neodímio metálico e a otimização microestrutural da liga NdFeB adequada para posterior fabricação dos ímãs. Entretanto, a CBMM constatou a inviabilidade comercial da etapa de concentração, associada a inevitável associação física de óxido de ferro à monazita portadora de terras raras e não deu continuidade ao projeto.

O INCT recebeu recursos do governo federal e da FAPESP em 2017, complementados em 2020 quando já haviam se agregados pesquisadores do CDTN e da UFCAT. Cada uma das instituições agrupadas no INCT teve, além desse apoio, projetos particulares de desenvolvimento de diferentes etapas da cadeia produtiva, vários bancados por empresas. Um dos importantes papeis do INCT Terras Raras foi criar situações de discussão conjunta da situação da pesquisa nas várias etapas da cadeia. Essas discussões ocorreram em vários eventos:

17 e 18 de outubro de 2017, o **4º Seminário Brasileiro de Terras Raras** realizado na USP, em que, além das apresentações da comunidade de pesquisadores, estiveram presentes quatro mineradoras apresentando suas atividades: Serra Verde (Minaçu GO), Minsur Pitinga (AM), China Molybdenum CMOC (Catalão GO) e CBMM (Araxá – MG).

14 de dezembro de 2017, a Embaixada do Brasil na Alemanha organizou evento intitulado **Strategic Minerals and Innovation in Brazil: A closer look on REE, Graphite, Tantalum, Lithium and other strategic minerals in Brazil and related technology Options** em que vários pesquisadores do INCT participaram.

11 e 12 de dezembro de 2018 aconteceu o **3º Encontro INCT-PATRIA & Workshop REGINA**, na USP, em São Paulo, reunindo os pesquisadores do INCT e também representantes de 6 instituições de pesquisa alemãs: Fraunhofer-Projektgruppe IWKS, TU Darmstadt, TH Bochum, TU Clausthal, Helmholz Institut Freiberg e IME Aachen

24 de abril de 2019, o MCTI promoveu um **ENCONTRO COOPERAÇÃO BRASIL – ALEMANHA EM TERRAS-RARAS,** com apresentações de seis pesquisadores do INCT Terras Raras.

22 de Outubro de 2019, o MCTI promoveu o **Workshop sobre Terras Raras**, Brasília.

12 a 14 de Abril de 2021, o **5° Seminário Brasileiro de Terras Raras**, no CDTN

6 e 7 de dezembro de 2022, **Evento Granioter**, no CDTN, MG.

3 a 7 de setembro de 2023 vários pesquisadores do grupo participaram levaram trabalhos ao **23° Rare Earth Permanent Magnets Workshop** em Birmingham, Inglaterra.

1 a 5 de outubro de 2023, pesquisadores participaram do **23° Congresso SBPMat B-MRS**, em Maceió.

6 e 7 de Novembro de 2023, ocorreu o **Sexto Seminário Brasileiro sobre Terras Raras**, no CETEM, RJ.

3 a 5 de maio de 2024, Participação de vários pesquisadores do INCT na Conferência internacional **Intermag** , que realizou-se no RJ.

9 de julho de 2024 fomos convocados a participar de evento da **COMISSÃO ESPECIAL SOBRE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE,** na Câmara dos Deputados, uma sessão dedicada aos Minerais críticos e estratégicos: desafios e fomento à produção. Nossa intervenção ocorre entre os instantes 1:25:34 e 1:37:03 da gravação https://www.camara.leg.br/evento-legislativo/73193.

22 de agosto de 2024, o BNDES promoveu uma mesa redonda sobre **Separação de óxidos, metalurgia e fabricação de ímãs de terras raras**, reunindo 30 pessoas dentre elas seis participantes do INCT Terras Raras, para discutir viabilidade de futuro edital de financiamento para as empresas.

10 e 11 de março de 2025, BNDES promoveu a **Conferência Internacional Cadeias de Valor de Minerais Estratégicos para Transição Energética e Descarbonização**, com participação de vários pesquisadores ligados ao INCT.

A comunidade de pesquisadores reunidas neste projeto incluiu cinco institutos de pesquisa (CERTI, CETEM, IPT, IPEN, CDTN) que não se destacam por sua produção

científica, mas sim pela sua contribuição tecnológica. Essa característica repercutiu na baixa produção científica associada a este projeto, que teve foco no desenvolvimento das tecnologias que estão sendo disponibilizadas para as instituições envolvidas na cadeia produtiva dos ímãs.

Um marco importante disso é a implantação do Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras em Lagoa Santa, Minas Gerais, cujas origens podem ser traçadas às iniciativas da CERTI, no início dos anos 2010. A Codemge, empresa ligada ao governo do estado de Minas Gerais que operava recursos de impostos da mineração naquele estado, por volta de 2015 encampou uma proposta para a construção de um LabFab, um modelo de operação que a CERTI opera em Santa Catarina. Infelizmente a CERTI não deu continuidade à participação no projeto, a princípio planejada a atuar na construção do LabFab, uma vez que a própria Codemg assumiu as atividades planejadas.

Baseando-se na experiência do professor Paulo Wendhausen (UFSC) na fabricação de ímãs, a Codemge adquiriu equipamentos de moagem, orientação cristalina, sinterização e usinagem na China. Sua instalação está sendo muito demorada, afetada sucessivamente pela pandemia, por mudanças de prioridades governamentais do estado e por restrições do governo chinês. A Codemge contratou vários pesquisadores formados no laboratório MAGMA, da UFSC.

Uma mudança importante ocorreu no final de 2023, quando a FIEMG adquiriu a instalação e entregou sua operação ao CIT Senai MG. Essa operação deverá ser fortemente alavancada pela aprovação do projeto MagBras no bojo do Programa MOVER, do governo federal, no início de 2025, com recursos estimados em R$73 milhões para a estruturação da cadeia nacional de ímãs permanentes de terras raras.

O projeto MagBras nasceu a partir de frequentes reuniões de um grupo de trabalho formado no âmbito da Rede Colaborativa para Aumento da Produtividade e da Competitividade do Setor Automotivo Brasileiro, denominada Made in Brasil Integrado (MiBI) instaurada em 2021. O Grupo de Trabalho GT3 reuniu representantes de empresas e da academia (inicialmente pesquisadores do INCT Terras Raras, por fim com a liderança de Luiz Gonzaga Trabasso, do ISI Laser).

Entre a indústrias que compõem a Aliança MagBras estão:

Empresas âncoras do projeto, que impulsionam a demanda e aplicação dos ímãs: WEG, Stellantis, Schulz, Iveco, Vale e Mosaic.

Empresas mineradoras, responsáveis pela extração e processamento de terras raras, garantindo o fornecimento de neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb):
Aclara, Appia, BBX, Bemisa, Borborema, Meteoric, St. George, Resouro, Taboca, Tiros e Viridion.

Empresas da cadeia automotiva, que darão suporte à definição das propriedades dos ímãs, determinando parâmetros como força magnética, resistência térmica e eficiência energética: Arcelor Mittal, Eion, Greylogix, Nanum, Strokmatic, Tupy, Steinert e Walbert Ferramentaria.

Startups tecnológicas, que agregam inovação e eficiência aos processos produtivos:
Integra Laser (inovação), Moderna 3D (flexibilidade) e Lean 4.0 (eficiência operacional).

É razoável supor que a posta em marcha do LabFabITR visando sua futura produção de 10 toneladas anuais de ímãs deverá contar com o apoio dos pesquisadores da UFSC, CDTN, e IPT, para enfrentar os muitos detalhes de cada etapa do processo de fabricação a partir da fabricação da liga a partir dos elementos de terras raras que inicialmente deverão ser importados. A equipe técnica do LabFabITR contou e conta com pessoal formado nos grupos de pesquisa da UFSC e do IPT.

Professor Paulo Wendhausen quantificou bem o desafio à frente: em escala laboratorial, seu grupo de pesquisa na UFSC já conseguiu produzir ímãs com Produto Energético de 42 Mega Gauss Oersteds (MGOe). Esse é o mais importante parâmetro de qualidade de um ímã. Pesquisadores chineses colocam a meta de atingir 60MGOe. Muitas variáveis de processo terão que ser controladas para atingir o nível de desempenho de 42MGOe.

Outra linha de pesquisa investigada por coordenação da UFSC com contribuições da USP, é o aumento do campo coercivo do ímã (uma medida da resistência a desmagnetização do ímã) por meio da difusão do elemento disprósio através dos contornos de grão do material.

Mateus Botani Dias foi pesquisador pós doutor do projeto na USP, dedicando-se à caracterização da profundidade de penetração do disprósio em diferentes condições de processo, utilizando-se da caracterização composicional por microscopia eletrônica, com o apoio do **Dr. Daniel Luis Rodrigues Jr** na operação do microscópio.

Dentre os vários outros temas investigados no laboratório MAGMA destaca-se a busca de reciclagem direta de ímãs descartados. Nesta metodologia, o ímã é reintroduzido na cadeia de processamento partindo da etapa de decrepitação por hidrogênio. **Wagner Costa Macedo Junior** foi o pesquisador de pós-doutorado na UFSC que esteve à frente das atividades envolvendo esta temática, dedicando-se ao desenvolvimento de processos de descomissionamento de ímãs em fim de vida, sua caracterização, e reprocessamento. Complementarmente, outros bolsistas atrelados à UFSC atuaram em temáticas de fronteira no que se refere a pesquisa em ímãs de terras raras. **Luis Alberto Torres Quispe**, por exemplo, desenvolveu seu

pós-doutorado focando nos aspectos associados à determinação da textura de ímãs permanentes.

A linha de pesquisa concentrada na adição de disprósio por difusão em contornos de grão permitiu juntar as competências da UFSC, liderada por Paulo Wendhausen, com pesquisas realizadas no CDTN sob a liderança de **Jose Domingos Ardisson** e aquelas realizadas na USP.

O IPT teve o apoio da CBMM em dois projetos de pesquisa, voltados a etapas intermediárias da cadeia produtiva: a transformação do óxido de terra rara em metal, a fundição a vácuo da liga, o controle da microestrutura de solidificação em strip-caster e a moagem usando hidretação, moagem autógena e desidretação.

André Nunis, pesquisador do IPT, coordenou o desenvolvimento da etapa de redução eletroquímica do óxido de neodímio. Teve sucesso experimental, mas continua investigando a possibilidade de reduzir o impacto ambiental causado pela possível evolução de compostos voláteis fluorados.

João Ricardo Filipini da Silveira, também pesquisador do IPT, foi responsável pela investigação do controle da solidificação da liga no equipamento conhecido como srtipcaster, visando aumentar a velocidade de resfriamento da liga para evitar a sobrevivência de cristais de ferro cúbico, cuja presença prejudica muito a resistência do ímã à desmagnetização. Trabalhou também na montagem e operação do sistema que faz a moagem usando hidretação, moagem autógena e desidretação.

Maciel Santos Luz, pesquisador do IPT, desenvolveu técnicas para análises precisas de terras raras por ICP-MS. Encontrou limites que foram atribuídos ao controle de temperatura e umidade do laboratório, o que exigiu reforma da área.

Célia Aparecida Lino dos Santos, pesquisadora da área de corrosão do IPT, mostrou que ímãs magnetizados tem maior taxa de corrosão que os desmagnetizados, e que a corrosão se concentra nas faces dos polos magnéticos. Ao investigar formas de proteção contra corrosão, notou que as decapagens com ácido oxálico revelaram a formação de cristais aderentes, longos e de caráter protetivo, evidenciado pelo deslocamento positivo de 0,2 V/ECS nos valores de potencial de circuito aberto. Esta observação sugere a possibilidade de desenvolver um pré-tratamento superficial para ligas magnéticas, semelhante ao processo de fosfatização utilizado em produtos de aço-carbono.

Pesquisadores do IPEN também se envolveram em aspectos da fabricação dos ímãs, liderados inicialmente por **Hidetoshi Takiishi** e depois por **Rubens Faria**, tendo o apoio do pós-doutoramento de Suzilene Janase, .

Outra iniciativa que foi lançada em 2025 e que contou com a participação dos pesquisadores do INCT na sua concepção (vide citado evento de 22/08/2024) foi a Chamada Pública para apoiar investimentos em transformação de minerais estratégicos. No dia 12 de junho de 2025 o BNDES e a Finep concluíram a avaliação

de propostas. Foram selecionados 56 planos de negócios que seguem agora para a fase de elaboração do Plano de Suporte Conjunto (PSC), com valor total estimado em R$ 45,8 bilhões. Entre os aprovados estão 10 projetos voltados a terras raras; 8, ao lítio; 6, ao grafite; 4, ao cobre; e 4, ao silício. Ali estão citados projetos de empresas que participaram de eventos organizados pelo CETEM com o apoio do INCT, especialmente a Viridis, Meteoric, Serra Verde, Aclara, WEG, Taboca, que devem estar entre os 10 interessados em mineração de terras raras.

A grande novidade da mineração de terras raras no Brasil, nos anos 2020, é o destaque dado a exploração das terras raras contidas nas argilas iônicas identificadas ao redor de Poços de Caldas (MG) e em Goiás. Apesar de seu baixo teor (menor que 0,1% de terras raras), tende a ser de fácil concentração por lixiviação e tende a ter teores de terras raras pesadas (disprósio, por exemplo) bem mais altos do que os minérios de monazita. A extração das terras raras das argilas iônicas parece ser tão fácil que sua disseminação na China, no século 20, resultou em atividades de garimpo associadas com contrabando para Vietnam e outros países.

A concentração é uma etapa crítica e muito sensível à geologia do minério, que afeta na forma como o mineral que contém as terras raras se combina e comporta no minério. A equipe de **André Carlos Silva**, professor da UFCAT, dedicou-se a investigar a concentração física de vários minérios da região de Goiás. A concentração química das argilas iônicas oriundas de algumas minerações foi investigada pela equipe do pesquisador Ysrael M. Vera, no CETEM.

Um aspecto que ficou claro nos sucessivos encontros do grupo de pesquisadores do INCT Terras Raras é que a separação dos elementos é um ponto crítico para o futuro da cadeia produtiva das terras raras no Brasil. Caso alguns desses projetos de mineração prosperem, atingindo os níveis de custo adequados, o Brasil pode tornar-se um exportador de concentrado de terras raras. Para avançar na cadeia, portanto, é necessário investir na separação. O CETEM e o CDTN tem tradição de pesquisa nessa área, investiram e avançaram nisso com o apoio do INCT, cada um numa vertente de processo: O CETEM investiga a separação por extração por solventes, enquanto o CDTN investiga a obtenção por troca iônica. Foi muito explícito o interesse do BNDES em incentivos importantes nessa direção. **Ysrael M. Vera** liderou a pesquisa de separação de terras raras pelo método de extração por solvente, no CETEM, enquanto **Ana Claudia Queiroz Ladeira** liderou a investigação da separação por troca iônica presentes em baixas concentrações em efluentes ácidos.

Os contatos que pudemos promover entre Constantine Karayannopoulos, ex-presidente da Neo Materials e Pedro Paulo Dias Mesquita, do BNDES, resultaram em avanços nessa direção. A Neo Materials é uma empresa canadense que é proprietária da Silmet, empresa que faz separação dos elementos de terras raras na Estônia, com matéria prima da Rússia e onde está sendo construída uma fábrica de ímãs. No evento promovido pelo BNDES em março de 2025 Constantine foi um

dos destacados palestrantes. A mineradora Aclara, de capital peruano, tem explicitado seu interesse em avançar na direção da separação de terras raras, montando instalação piloto em Goiás.

Em setembro de 2024 publicamos um artigo, no jornal Valor Econômico, em que definimos alguns desafios adicionais, para além dos aspectos técnicos que nossa comunidade investiga. Hoje a produção de ímãs fora da China é muito pequena. Para um mercado global que se supõe ser de 150.000t anuais, o Japão talvez produza 10.000t, usando terras raras da Malásia. O resto do mundo talvez chegue a 3.000t. O grande projeto a ser implantado nos EUA, da empresa alemã VAC, anunciado dois anos atrás é para 1.000t anuais. A Neo Materials pretende alcançar também 1.000t anuais na Estônia. É isso o que está sendo anunciado. Os ímãs têm pouco mais de 30% de terras raras na sua composição. A menos que o panorama da demanda mude significativamente, as oportunidades brasileiras de participar desse mercado são restritas.

Quem não arrisca não petisca. A situação da demanda poderá mudar, com alguma lentidão, o que pode favorecer a maturação de projetos brasileiros nessa direção. Tudo indica que o BNDES aposta nisso.

São Paulo, 28 de junho de 2025

Fernando Jose Gomes Landgraf

Coordenador do INCT PATRIA