COMUNICAÇÃO TÉCNICA

Nº 179856

Redução e produção de ligas

André Luiz Nunis da Silva

Palestra apresentada no evento promovido pelo MIDE, SENAI, apoio da FIEG: TERRAS RARAS: DESDE A MINERAÇÃO, BENEFIAMENTO ATÉ A FABRICAÇÃO DE PRODUTOS TECNOLÓGICOS DE ALTO VALOR AGREGADO, 2025, Goiania. 33 slides.

"Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária ou
Caixa Postal 0141 | CEP 01064-970
São Paulo | SP | Brasil | CEP 05508-901
Tel 11 3767 4374/4000 | Fax 11 3767-4099

www.ipt.br

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

REDUÇÃO E PRODUÇÃO DE LIGAS

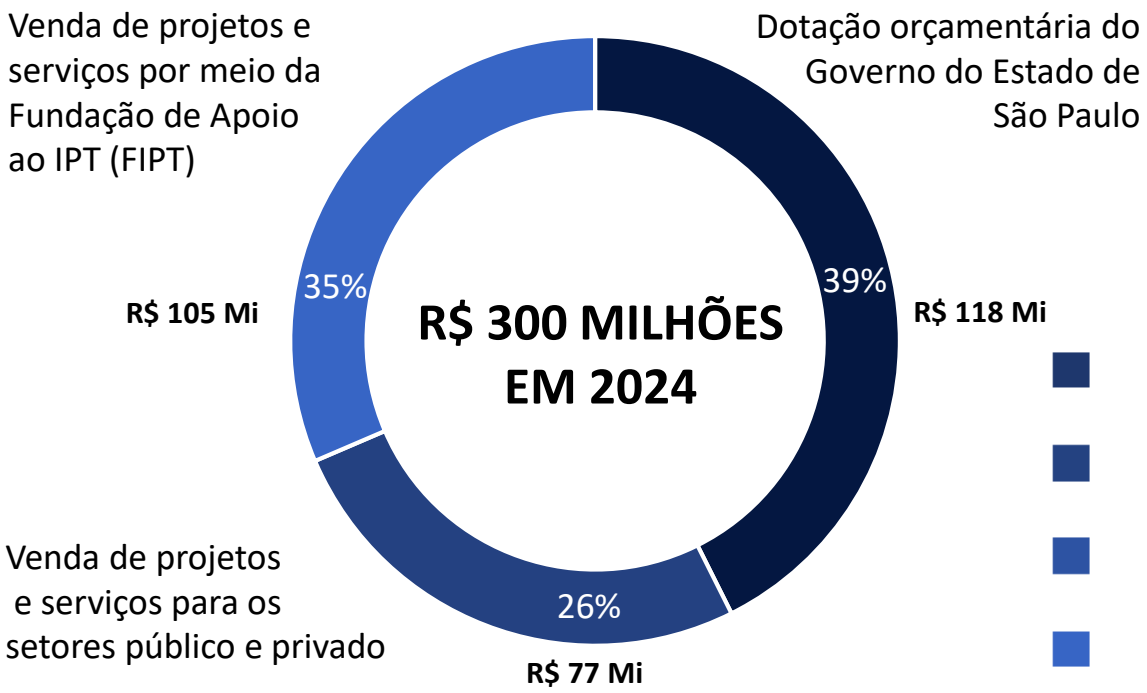
TERRAS RARAS: Desde a Mineração, Beneficiamento até a Fabricação de Produtos Tecnológicos de Alto Valor Agregado.

SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

O QUE É O IPT?

EXISTIMOS PARA PROVER SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A INDÚSTRIA, OS GOVERNOS E A SOCIEDADE, HABILITANDO-OS A SUPERAR SEUS DESAFIOS E PROMOVENDO QUALIDADE DE VIDA

RECEITAS



IPT EM NÚMEROS*

- **126 ANOS DE CONTRIBUIÇÕES PARA A SOCIEDADE**
- **> 1000 FUNCIONÁRIOS E COLABORADORES**
- **50% DE RECEITA COM INOVAÇÃO**
- **> 3.170 CLIENTES ATENDIDOS**
- **> 16.200 DOCUMENTOS TÉCNICOS EMITIDOS**
- **> 2000 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E ANÁLISES NO PORTFÓLIO**
- **35% DOS PROJETOS IPT COM IMPACTO DIRETO EM ESG**

*** 2024**

Unidades do IPT no Brasil

1. **São Paulo, SP**
   Sede do IPT e Parque Laboratorial
2. **Bertioga, SP**
   Planta de Biodigestão de Resíduos Sólidos
3. **Franca, SP**
   Lab. de Tecnologia Têxtil e Produtos de Proteção
4. **São José dos Campos, SP**
   Laboratório de Estruturas Leves
5. **São Sebastião, SP**
   Laboratório Flutuante
6. **Piracicaba, SP**
   Laboratório de Infraestrutura em Energia
7. **Manaus, AM**
   Núcleo IPT Amazônia

O QUE FAZEMOS?

PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

- PRODUTOS E PROCESSOS
- SOFTWARES
- DA BANCADA AO PILOTO
- APOIO DE FOMENTO
- EMBRAPII

TESTES, ENSAIOS E ANÁLISES

- PARECERES TÉCNICOS
- AVALIAÇÃO DE PRODUTOS
- CERTIFICAÇÃO DE PRODUTOS

INSPEÇÕES E MONITORAMENTOS

- OBRAS E ESTRUTURAS
- MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS
- ORGANISMO DE INSPEÇÃO ACREDITADO

DESENVOLVIMENTO METROLÓGICO, MEDIÇÕES E CALIBRAÇÕES

- PROGRAMAS DE PROFICIÊNCIA
- DESENVOLVIMENTO DE PADRÕES
- METROLOGIA AVANÇADA

MATERIAIS DE REFERÊNCIA CERTIFICADOS

- METAIS
- CERÂMICAS
- MINERAIS
- VISCOSIDADE
- AREIA NORMAL

TREINAMENTO E CAPACITAÇÃO

- MESTRADO PROFISSIONAL
- CURTA DURAÇÃO
- EDUCAÇÃO CORPORATIVA

UNIDADES DE NEGÓCIOS

BIONANOMANUFATURA
Biotecnologia, Nanotecnologia, Microfabricação, Química e EPIs

CIDADES, INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE
Planejamento Territorial, Obras Civis, Riscos, Recursos Hídricos, Florestas

ENERGIA
Geração, Infraestrutura, Eficiência, Energias limpas

ENSINO TECNOLÓGICO
Mestrado, MBA Internacional, Especialização

HABITAÇÃO E EDIFICAÇÕES
Conforto, Desempenho, Segurança, Materiais, Sustentabilidade

MATERIAIS AVANÇADOS
Metal, Polímero, Compósito, Celulose, Corrosão

TECNOLOGIAS DIGITAIS
IoT, Sistemas Embarcados, Sistemas de Transportes, IA, Analytics

TECNOLOGIAS REGULATÓRIAS E METROLÓGICAS
Mecânica, Elétrica, Vazão, Aerodinâmica, Química

DIFERENCIAIS

+ 120 mil m² de laboratórios
+ 1000 profissionais qualificados
Inúmeros caminhos para inovar

+ 2 mil ensaios e calibrações
+ 20 mil documentos técnicos por ano
Referência em qualidade dos serviços

Nível de excelência no NPS
NPS 84
(Net Promoter Score)

PROJETOS DE INOVAÇÃO

NUSCARBON

O Núcleo de Sustentabilidade e Baixo Carbono do IPT foi criado com o objetivo de desenvolver novas competências relacionadas à sustentabilidade, economia circular, mercado de baixo carbono e orientação de responsabilidade socioambiental. Atua em conjunto com as demais unidades de negócios, com o olhar para novos bionegócios cujas oportunidades envolvem a transformação de recursos naturais em ativos, sem abrir mão do respeito integral à cadeia ambiental.

NUTABES

para Bem-Estar e Saúde Aplicados às Ciências da Vida foca o desenvolvimento de projetos para melhoria da qualidade de vida e bem estar da sociedade, a partir de tecnologias inovadoras e com base na interconexão do tripé saúde humana, animal e ambiental. Uma das primeiras pesquisas abrigadas pelo núcleo conecta-se ao projeto ‘Sistematização do método de xenotransplante no Brasil’, com diversos parceiros e foco na viabilização clínica da técnica.

IPT Amazônia

Ampliando a atuação nacional, o novo núcleo IPT Amazônia em Manaus tem por missão propor soluções tecnológicas para o desenvolvimento sustentável regional, em parceria com instituições locais. Atua em projetos de PD&I, serviços tecnológicos, ensaios, análises, capacitação e novos negócios. Os principais objetivos são fortalecer as cadeias produtivas da bioeconomia, aumentar a competitividade do Polo Industrial de Manaus e apoiar demandas de governos da região.

IPT OPEN

O IPT abre seu campus para a maior iniciativa de inovação aberta em hardtech do Brasil, conectando os diversos atores desse ecossistema.

Pedra fundamental do projeto CITI – Centro Internacional de Tecnologia e Inovação do Estado de São Paulo

Modalidade 1

Hub de inovação

Participe de um ecossistema único e transformador que congrega empresas e startups que empreendem juntas na criação de tecnologias impulsionadoras de novos negócios.

Modalidade 2

Centro de inovação

Instale o Centro Tecnológico da sua empresa dentro do campus do IPT e potencialize sua capacidade de desenvolvimento.

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

SÃO PAULO GOVERNO DO ESTADO

CENTROS DE INOVAÇÃO

V2COM WEG Group

Google

TUPY

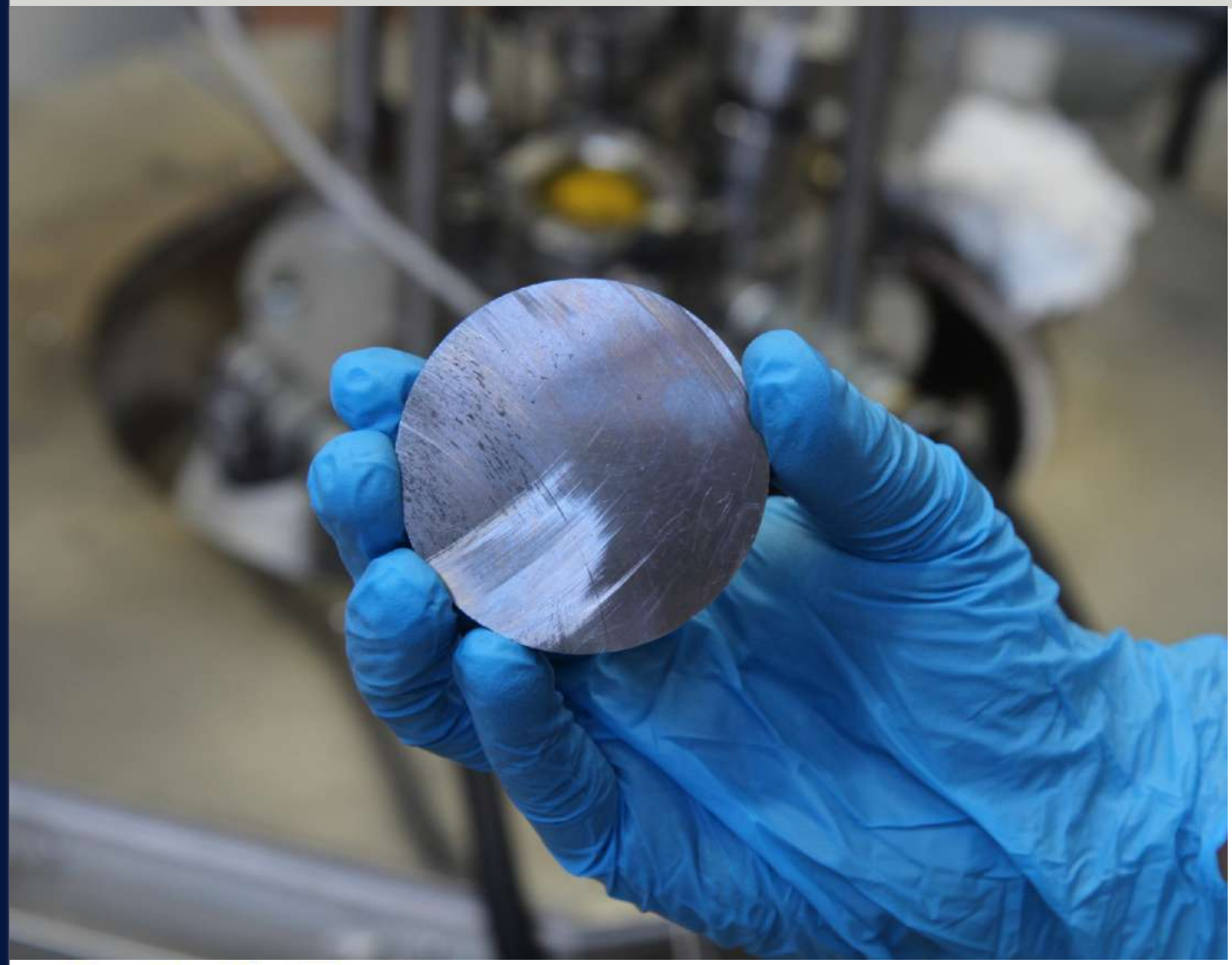
inteli

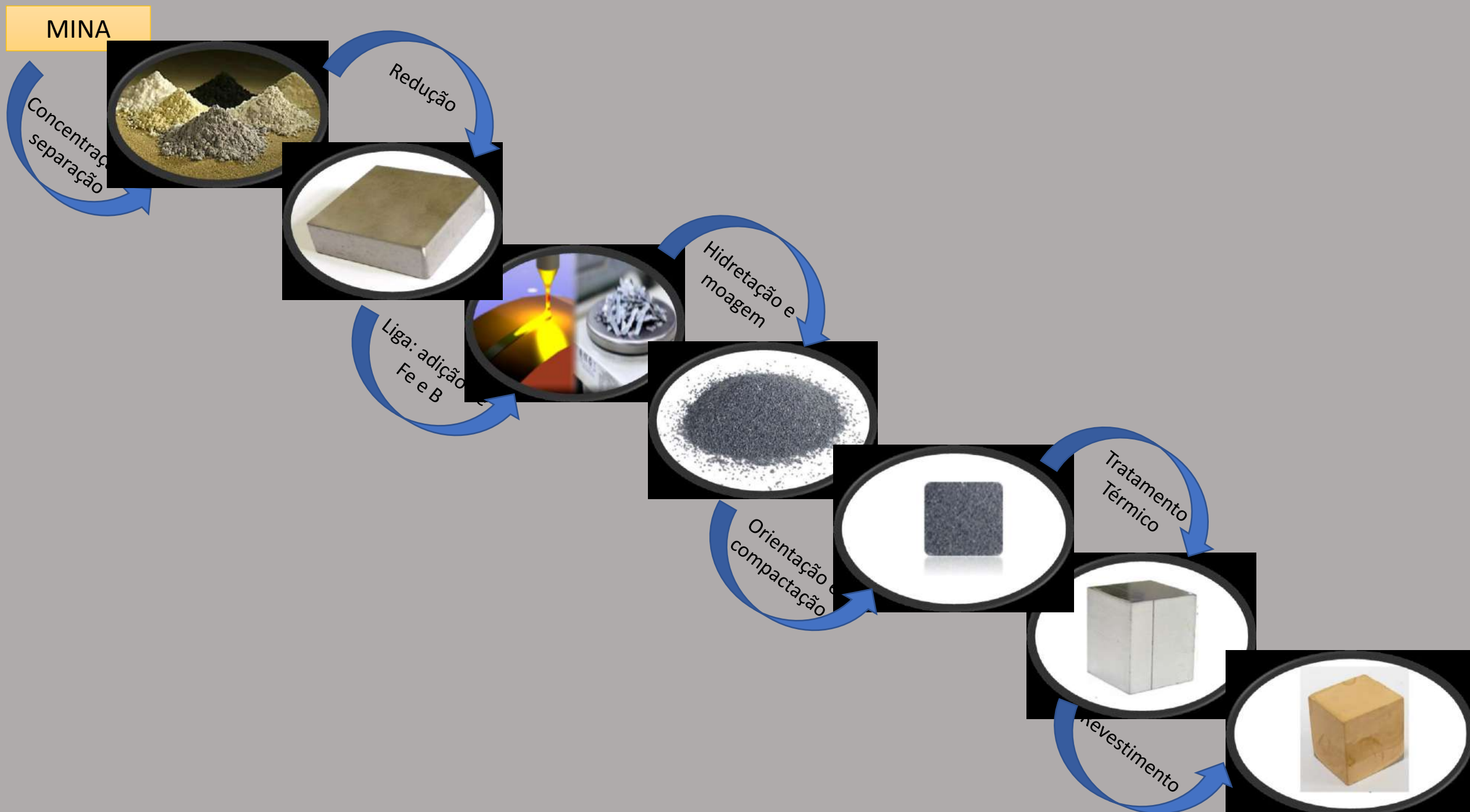
VALE

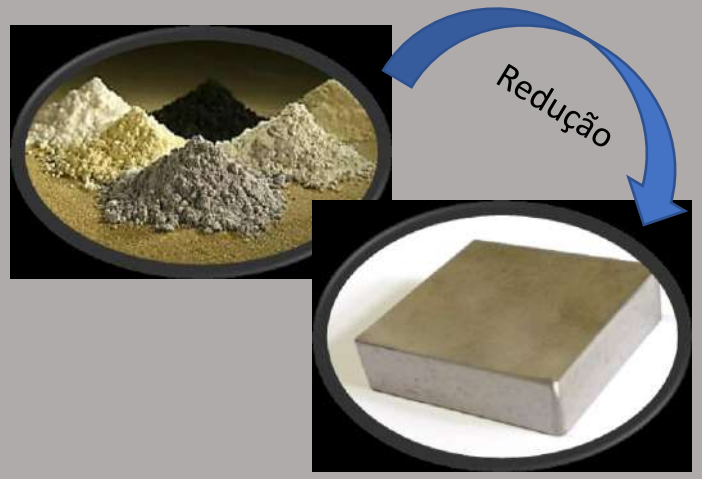
GranBio

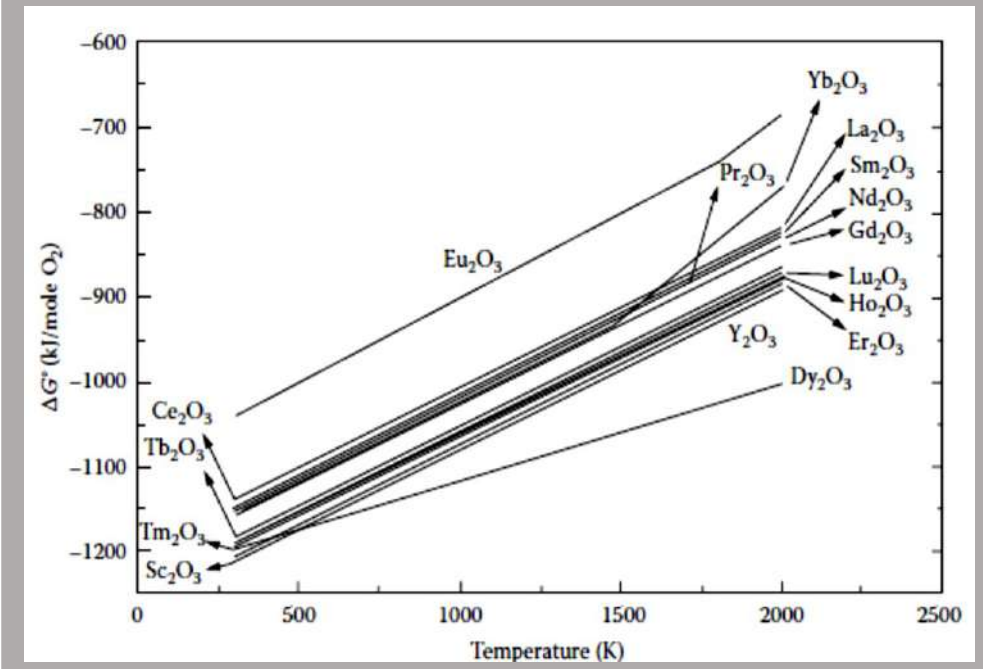
CECIL

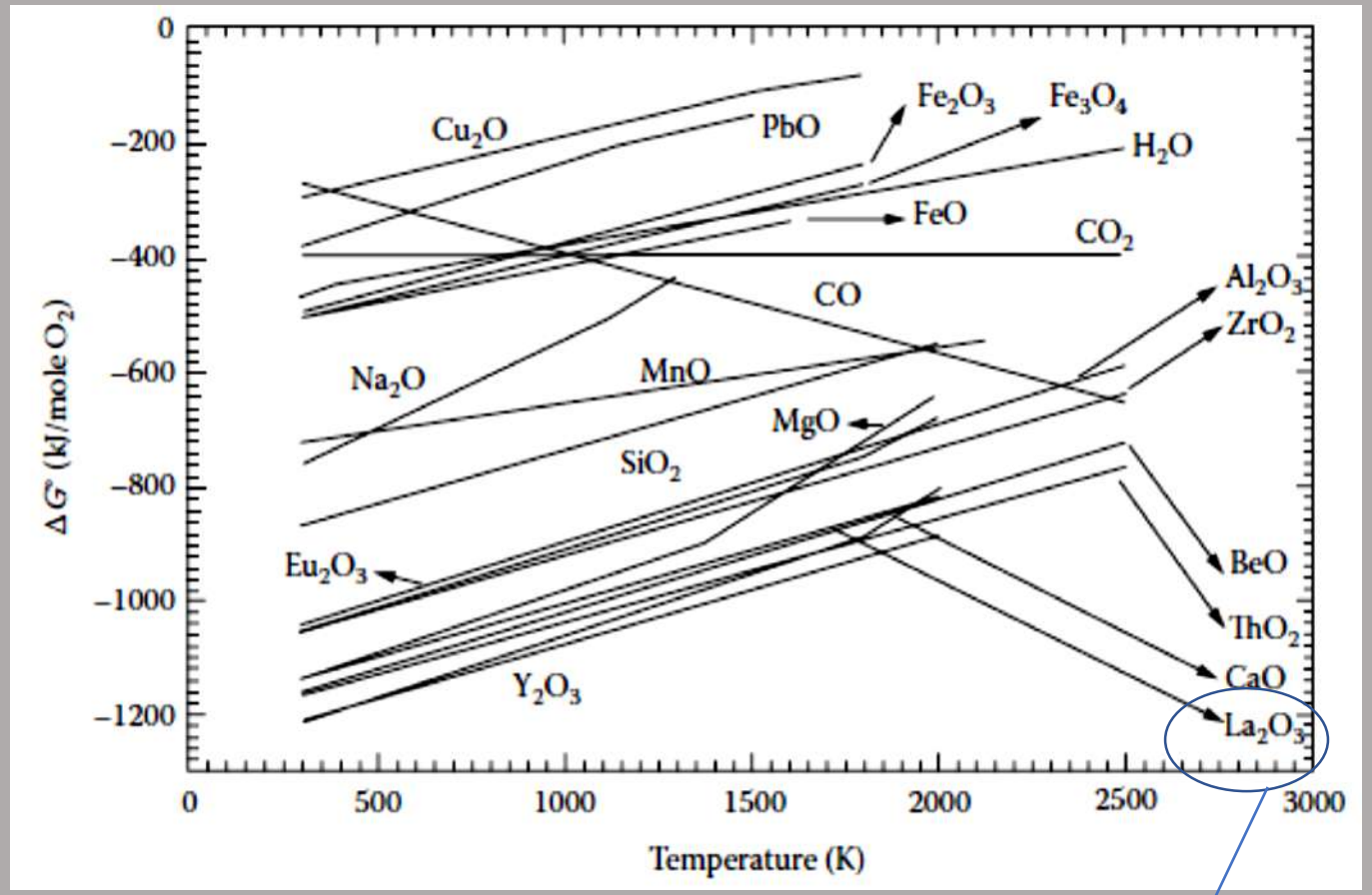
REDUÇÃO E PRODUÇÃO DE LIGAS




MINA
Concentração e separação
Redução
Liga: adição de Fe e B
Hidretação e moagem
Orientação e compactação
Tratamento Térmico
Revestimento

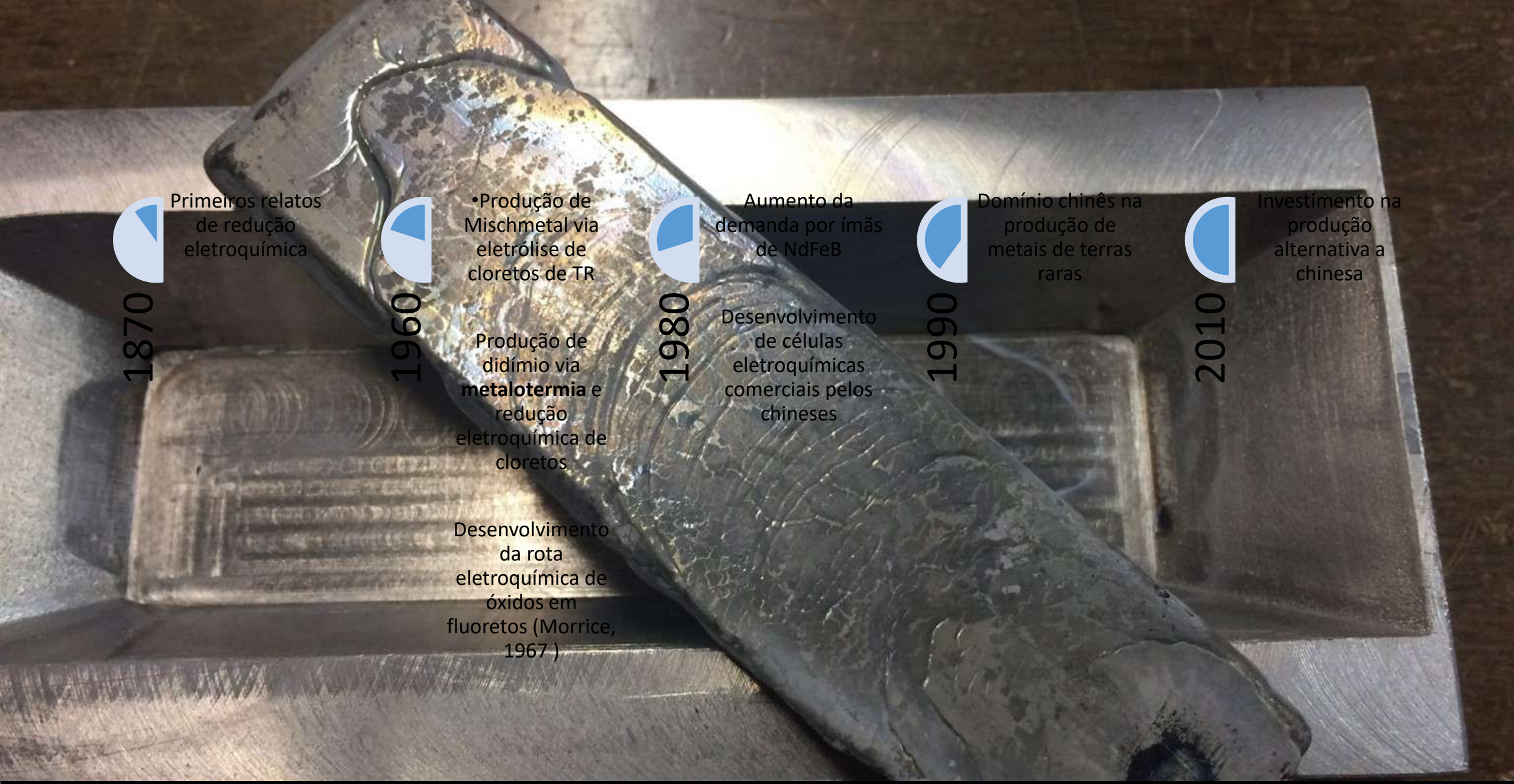






Próximo:
Nd_2O_3,
La_2O_3,
Pr_2O_3

(KRISHNAMURTHY; GUPTA, 2015).



1870

Primeiros relatos de redução eletroquímica

1960

•Produção de Mischmetal via eletrólise de cloretos de TR

Produção de didímio via **metalotermia** e redução eletroquímica de cloretos

Desenvolvimento da rota eletroquímica de óxidos em fluoretos (Morrice, 1967)

1980

Aumento da demanda por ímãs de NdFeB

Desenvolvimento de células eletroquímicas comerciais pelos chineses

1990

Domínio chinês na produção de metais de terras raras

2010

Investimento na produção alternativa a chinesa

Rotas Tecnológias para Redução do Nd_2O_3

Metalotérmica

- Produção de lingotes em **batelada**
- Consumo de **material redutor**
- Dentre os redutores possíveis é comum o uso de **cálcio** pelo seu maior potencial de redução para diferentes tipos de sais (haletos)
- Necessita de cuidados especiais (reator com **gás inerte**)

Eletrólise em sais fundidos

- Possibilidade de **produção contínua**
- Consumo de **energia elétrica**
- Anodo de carbono e catodo de tungstênio, molibdênio ou ferro (consumido para **produção de ligas)**
- Emissões **gasosas**

Metalotérmica: Redução por outros metais

Óxidos de Terras Raras

+

Metal redutor

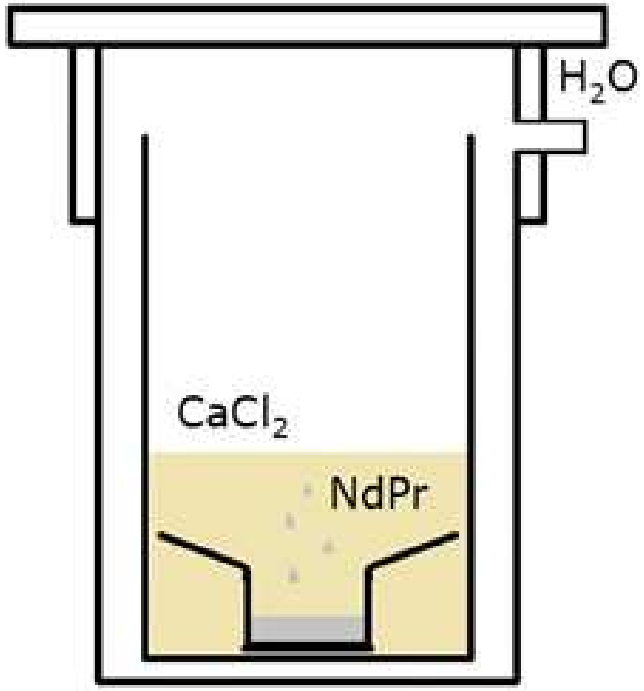
=

Metal de TR

+ subprodutos

REDUÇÃO METALOTÉRMICA

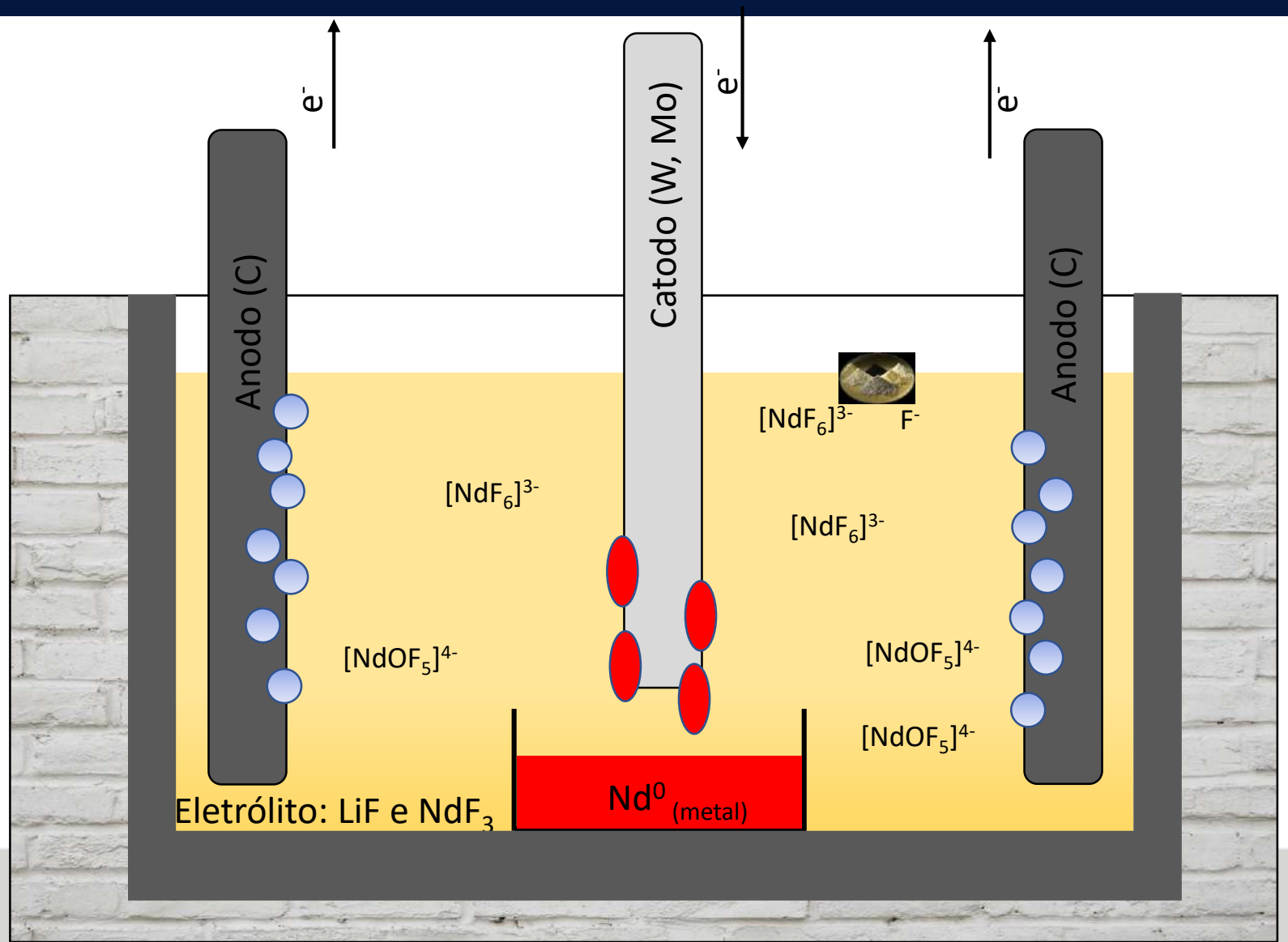
$$Nd_2O_3 + 3Ca \rightarrow 2Nd + 3CaO$$



Element	% weight
Al	0,16
Si	0,08
Mg	0,37
Ca	0,77
Pr	49,5
Nd	49,1
REE	0,02

Eletrólise em sais fundidos

Exemplo: Nd_2O_3



- Alimentação de Nd_2O_3
- Dissolução

$$Nd_2O_3 + [NdF_6]^{3-} + 9F^- \rightarrow 3[NdOF_5]^{4-}$$

- Redução no catodo

$$2[NdF_6]^{3-} + 6e^- \rightarrow 2Nd_{(s/l)} + 12F^-$$

- Oxidação no anodo

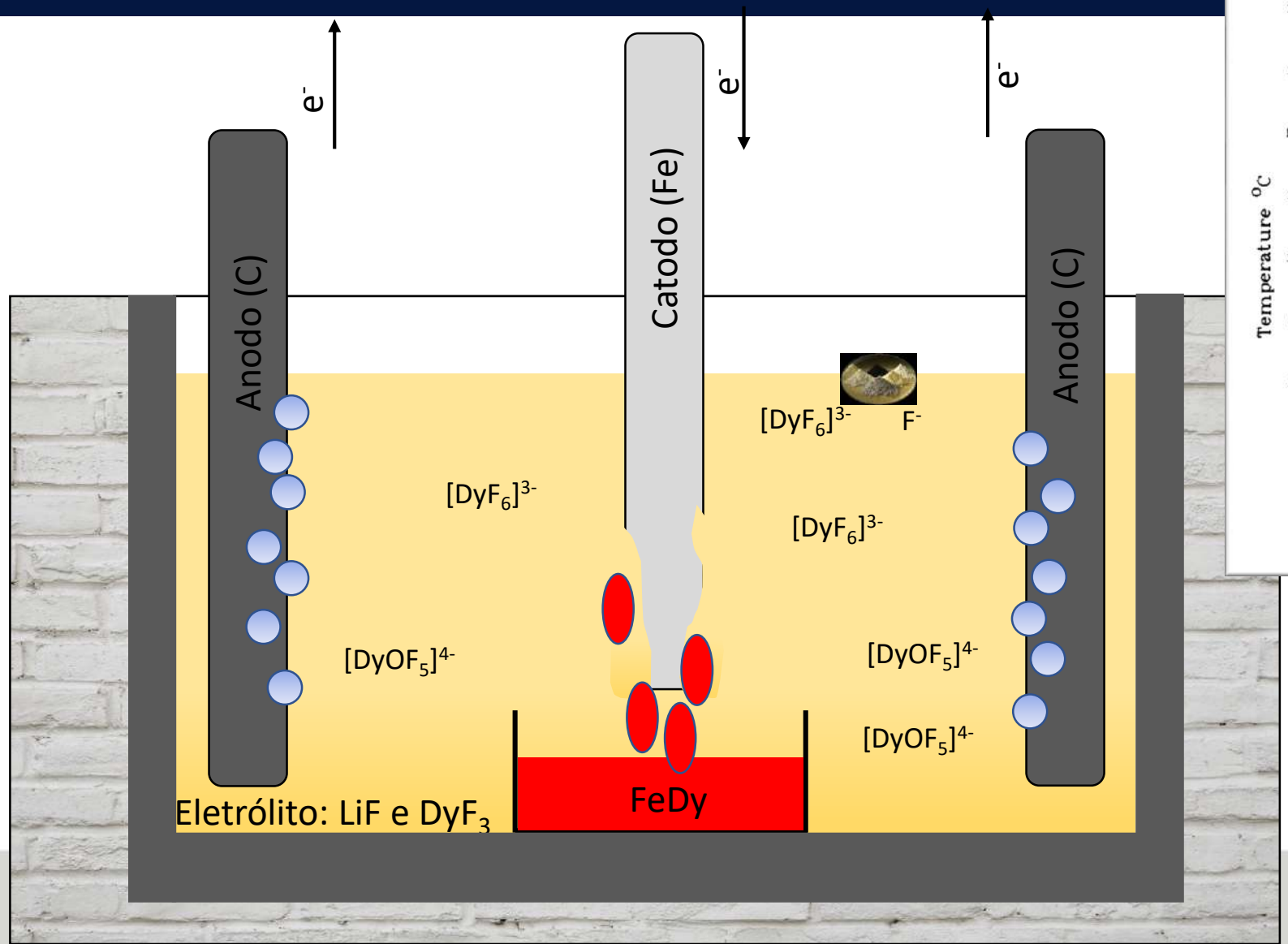
$$3[NdOF_5]^{4-} - 6e^- \rightarrow \frac{3}{2}O_{2(g)} + 3Nd^{3+} + 15F^-$$

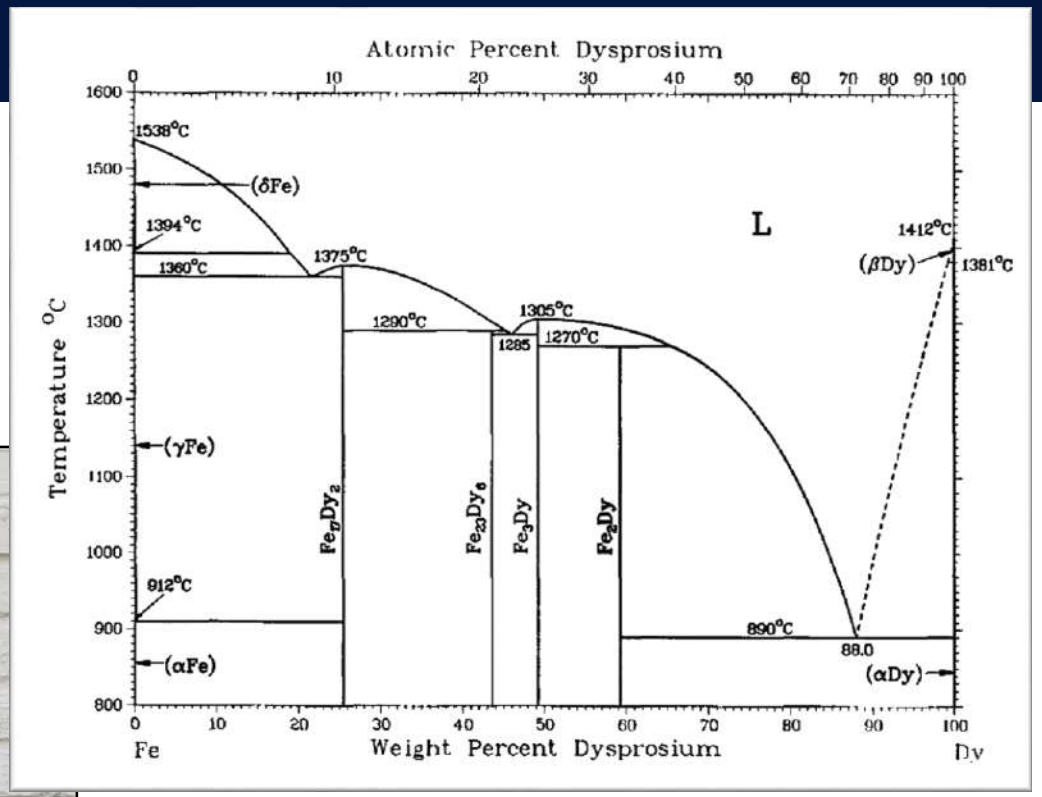
$$C + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$$

$$C + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)}$$

Eletrólise em sais fundidos

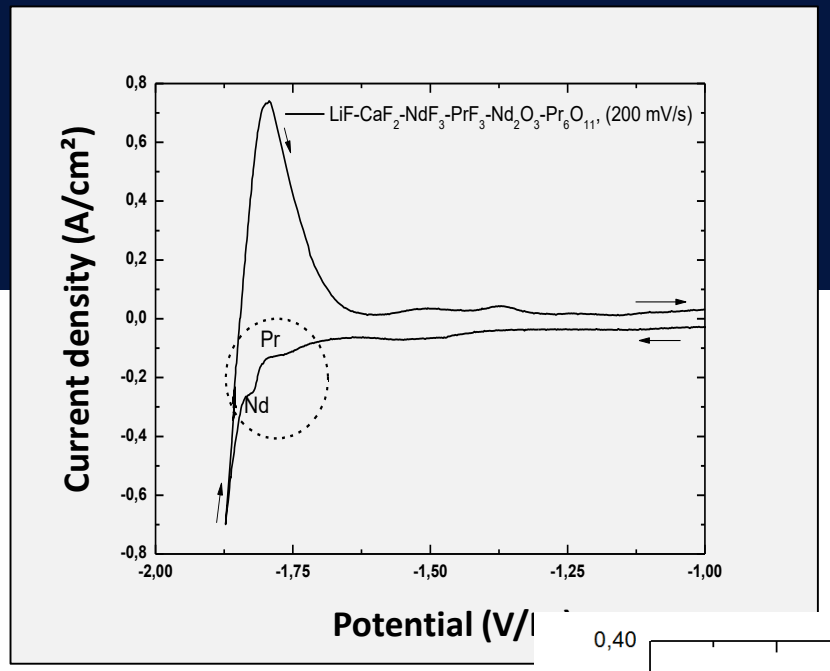
Exemplo: Dy_2O_3

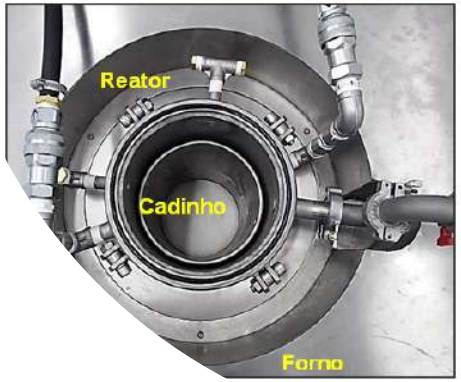


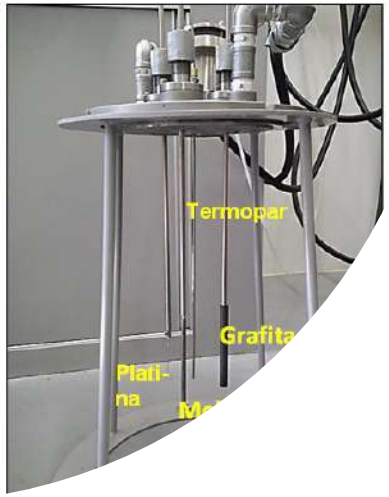


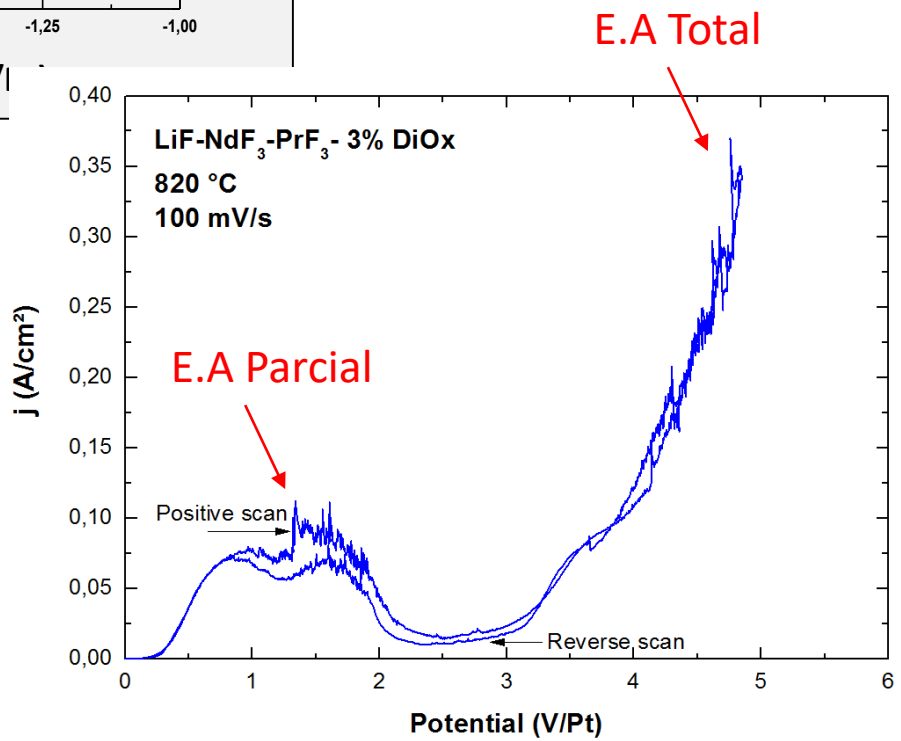
Massalski (1986)

Voltametria cíclica







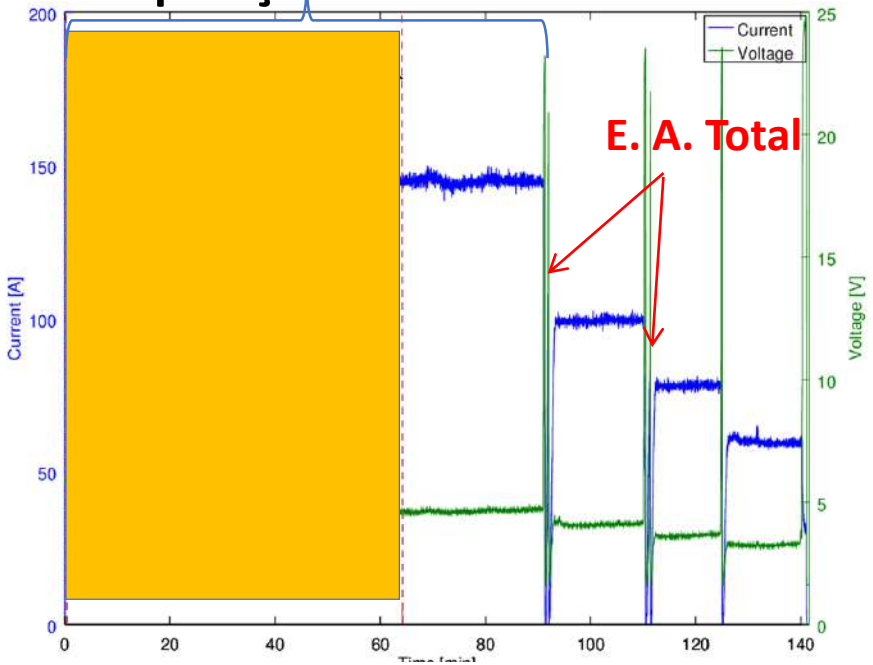


ELETRÓLISE – ESCALA LABORATORIAL

- Capacidade: 150 A
- Produção: 400 – 700 g
- T = 1030 – 1050 °C
- Sais: LiF – NdF_3 – PrF_3

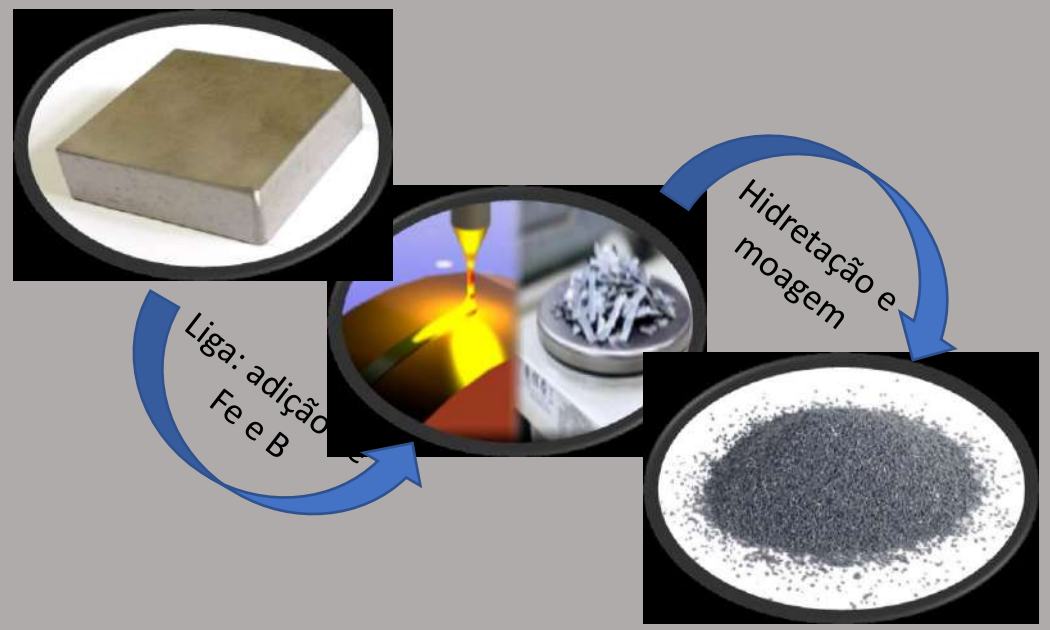
Elementos	(% w)
Al	<0.001
Mg	<0.001
Ca	<0.001
Si	<0.05
Pr	25-40
Nd	60-75
O	0.002
C	0.05
REE	<0.1

Operação estável



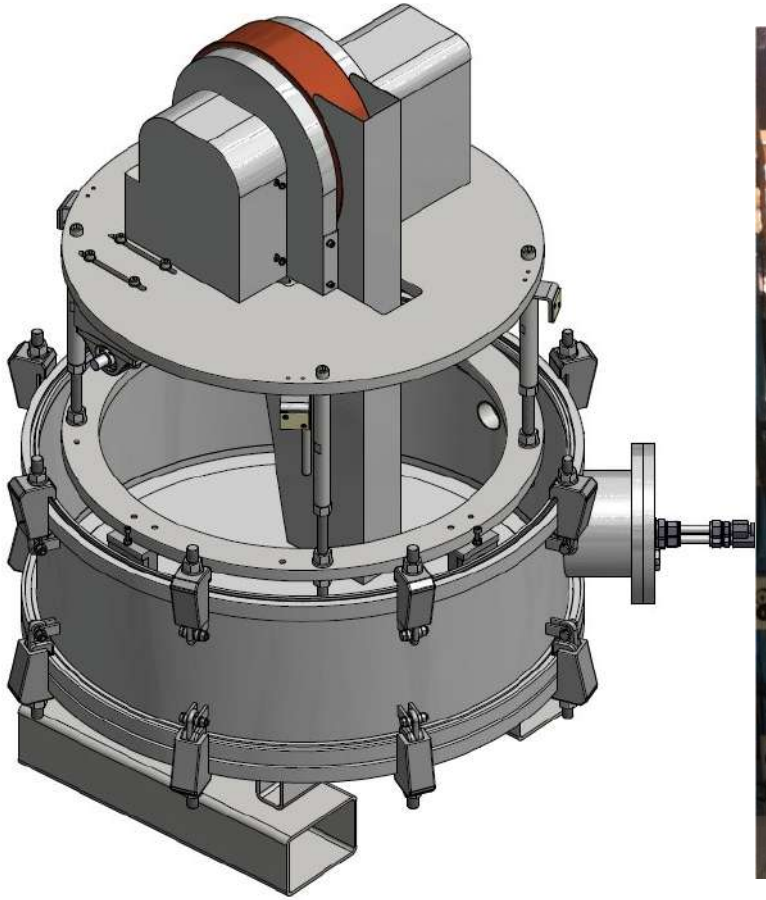
Controle da alimentação = controle do processo eletrolítico

ipt

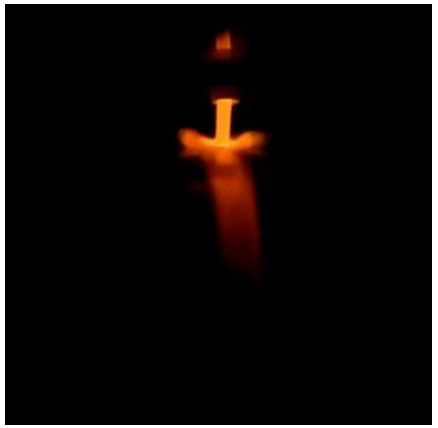

Liga: adição
Fe e B
Hidretação e
moagem

PRODUÇÃO DA LIGA (Nd,Pr)-Fe-B

- Microestrutura formada em função da taxa de resfriamento
- Evitar a formação de ferro alfa
- Garantir a fração de fase rica e largura de braço de dendrita para moagem
- Produção de ligas para testes

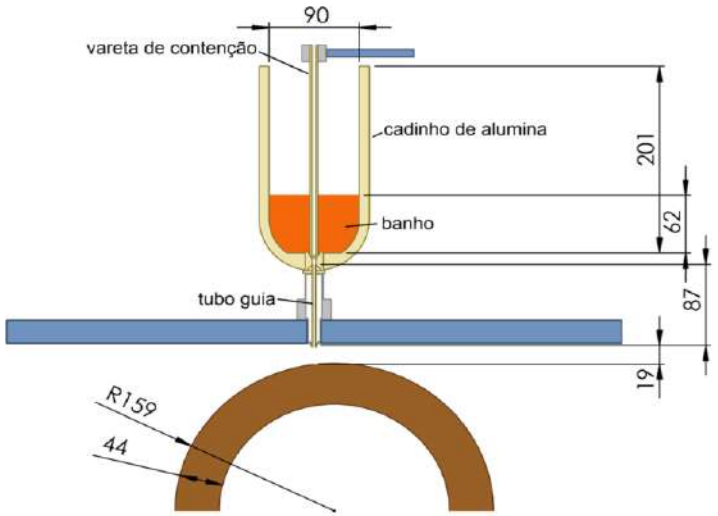


Lingotamento de tiras (Strip-casting)



- Liga (Nd, Pr)-Fe-B em estado líquido, sob atmosfera de argônio é vazada sobre um rolo refrigerado em rotação

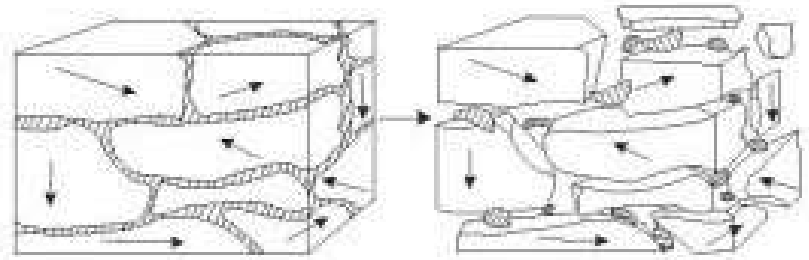
- As elevadas taxas de resfriamento levam à formação de microestrutura lamelar (com plaquetas em 3D) ideal para hidretoação e suprimem a formação de ferro-α



Hidretação

- O processo de hidretação é um processo onde se introduz intencionalmente hidrogênio na liga ao se aplicar uma pressão de gás hidrogênio (H_2) em um forno que contém as tiras de NdFeB.

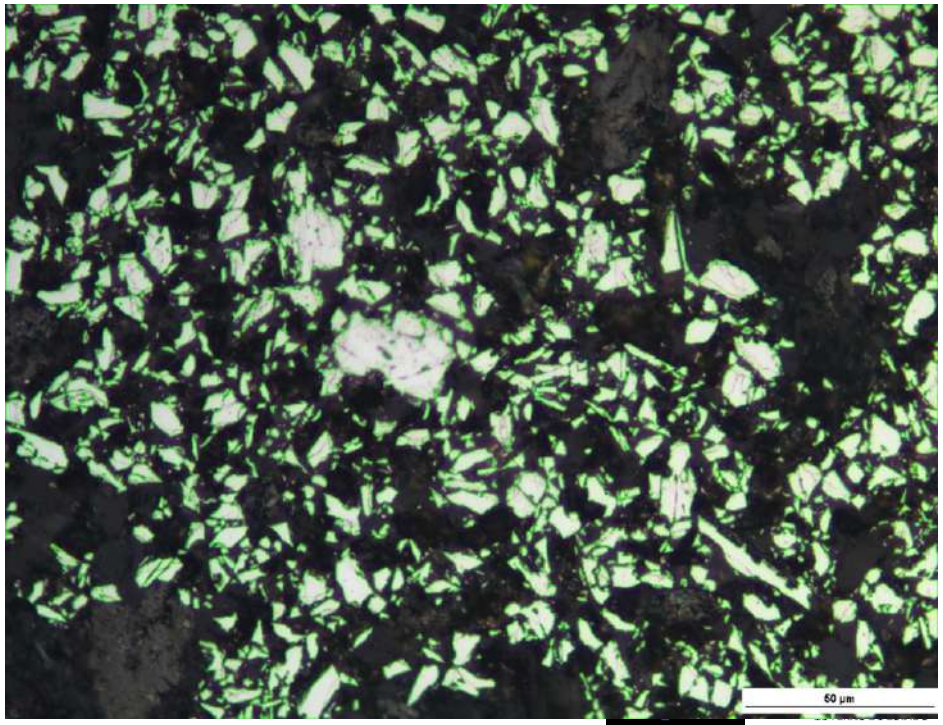
- Após os tiras serem inseridos no forno, a atmosfera é retirada, fazendo vácuo a uma pressão de 10^{-2} mBar. A seguir, o forno é preenchido com H_2 utilizando-se uma pressão controlada de 1600 mBar.

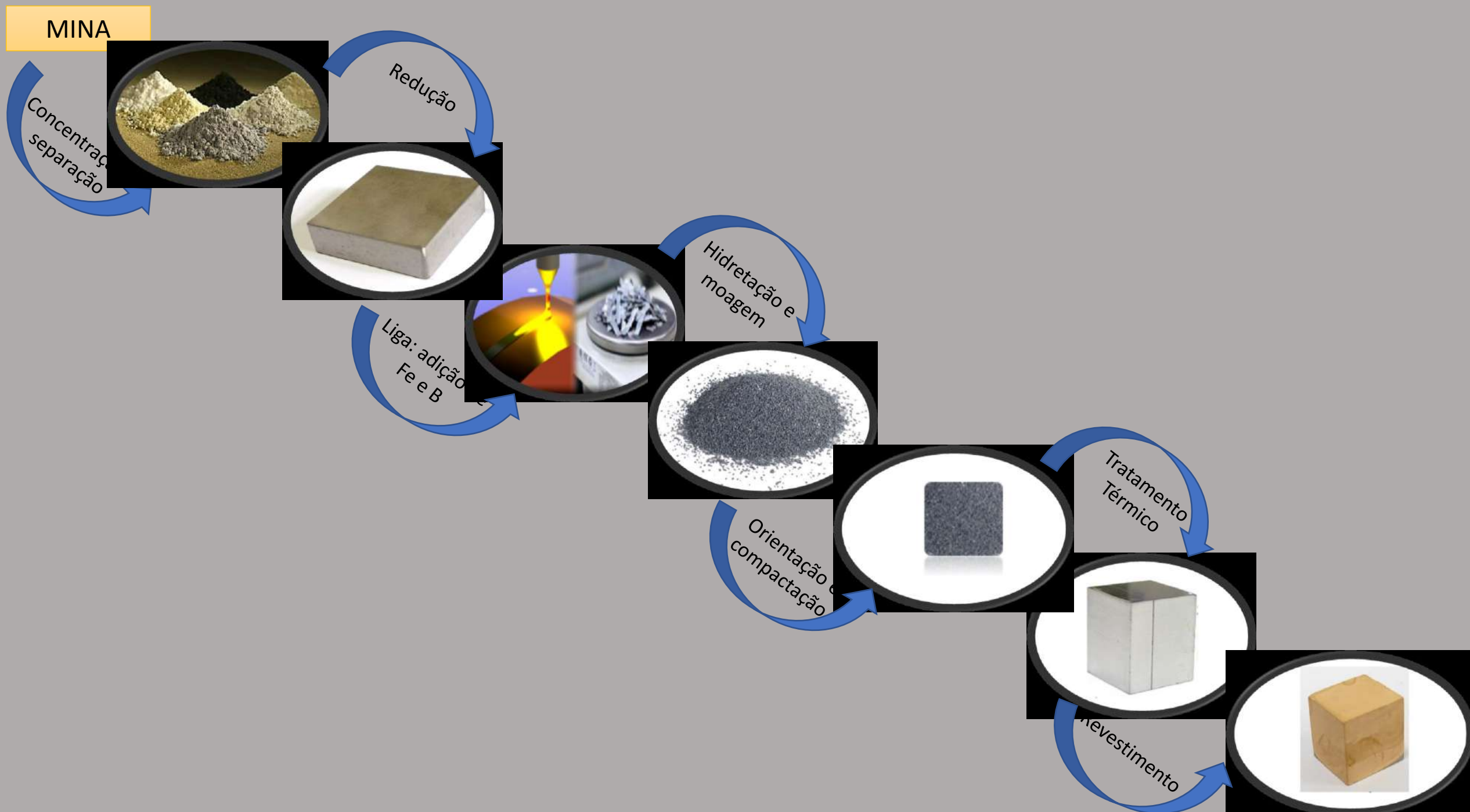


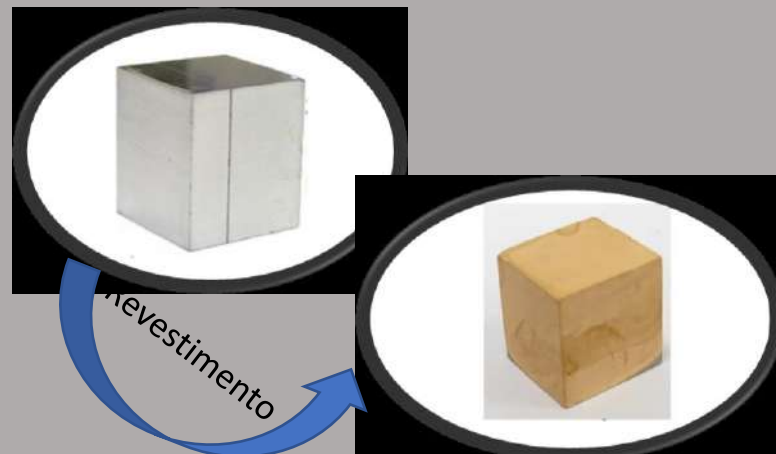
Moagem

- O princípio de funcionamento do moinho de jatos envolve três jatos de gás inerte (N_2) que criam uma suspensão de partículas dentro da câmara de moagem. Esta suspensão leva ao choque das partículas umas contra as outras de forma que o material é moído de forma autógena.

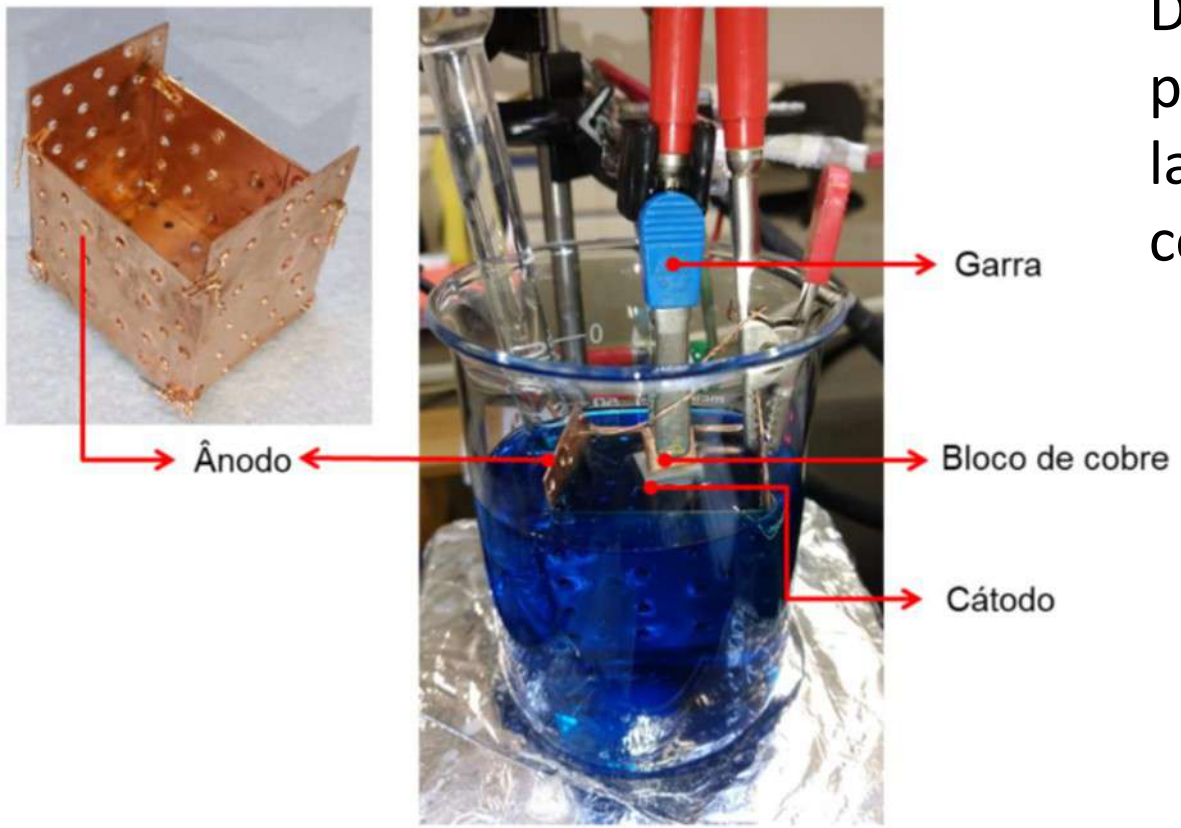
- No interior da câmara de moagem existe uma roda com fendas horizontais que gira em elevada rotação deixando passar apenas as partículas com tamanho apropriado.




MINA
Concentração e separação
Redução
Liga: adição de Fe e B
Hidretação e moagem
Orientação e compactação
Tratamento Térmico
Revestimento


revestimento

REVESTIMENTO PROTETIVO



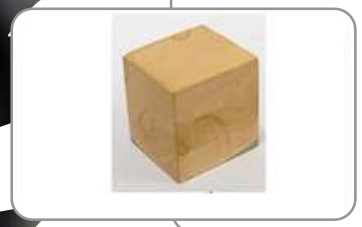
Desenvolver sistema de revestimento protetivo por eletrodeposição em laboratório focado em camadas de níquel e cobre

Com revestimento

PROJETOS

Embrapii

- Fase 1: Redução Pirometalúrgica
- Fase 2: Produção de ligas

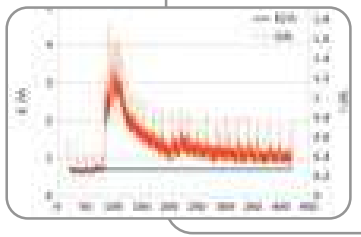


Funtec

- *Scale up* da redução eletroquímica (piloto)
- Produção de Ligas, hidretação e moagem (pó)
- Orientação, compactação e sinterização
- Revestimento contra corrosão

INCT (PATRIA e MATERIA)

- Emissões
- Fenomenologia da produção de ligas
- Metodologias para análise química
- Revestimento contra corrosão



REGINA

- Taxa de dissolução de $(Nd,Pr)_xO_y$
- Melhorias do processo de solidificação
- Nova fase: Redução de emissões: Anodo inerte
- Novas ligas metálicas

BNDES

FUNTEC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FEESC Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

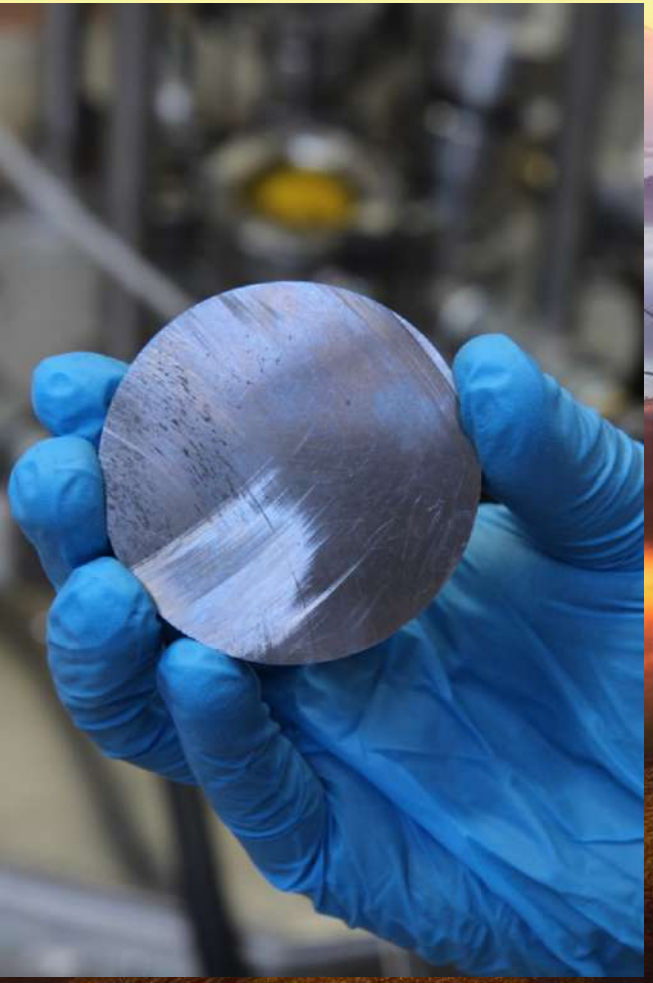
CBMM

fipt fundação de apoio ao instituto de pesquisas tecnológicas

SCALE UP DA REDUÇÃO ELETROQUÍMICA

- Projeto conceitual da célula piloto
- Executivo e construção da célula
- T: 1030 – 1100 °C
- Corrente: 1000 – 1800 A
- Tratamento e medição dos gases
- Controle do processo
- Minimizar efeitos anódicos

MAGBRAS - DEMONSTRADOR INDUSTRIAL DO CICLO COMPLETO DE PRODUÇÃO BRASILEIRA DE ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS



Investimento total: R$ 73.336.116,81
3 ICTs, 5 SENAIs, 25 empresas e 3 startups
Prazo: 36 meses

Obrigado!

- André Nunis
- alnunis@ipt.br

linkedin.com/school/iptsp/

instagram.com/ipt_oficial/

youtube.com/@IPTbr/

www.ipt.br

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

SÃO PAULO GOVERNO DO ESTADO