



PMT-Poli-USP



Dois aspectos da História da engenharia metalúrgica no Brasil no século XIX

Prof. Fernando J.G. Landgraf

PMT – Poli - USP



PMT-Poli-USP

História da metalurgia



Temos uma linha de pesquisa no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Poli, voltada à arqueometalurgia e à história da engenharia metalúrgica no Brasil. São duas as vertentes:

- análise dos documentos do século XIX relativos à Fábrica de Ferro de Ipanema (Sorocaba), em busca da engenharia metalúrgica
- Análise da microestrutura de objetos de ferro do século XIX, em busca de entender a evolução dos processos e a qualidade dos objetos de Ipanema.

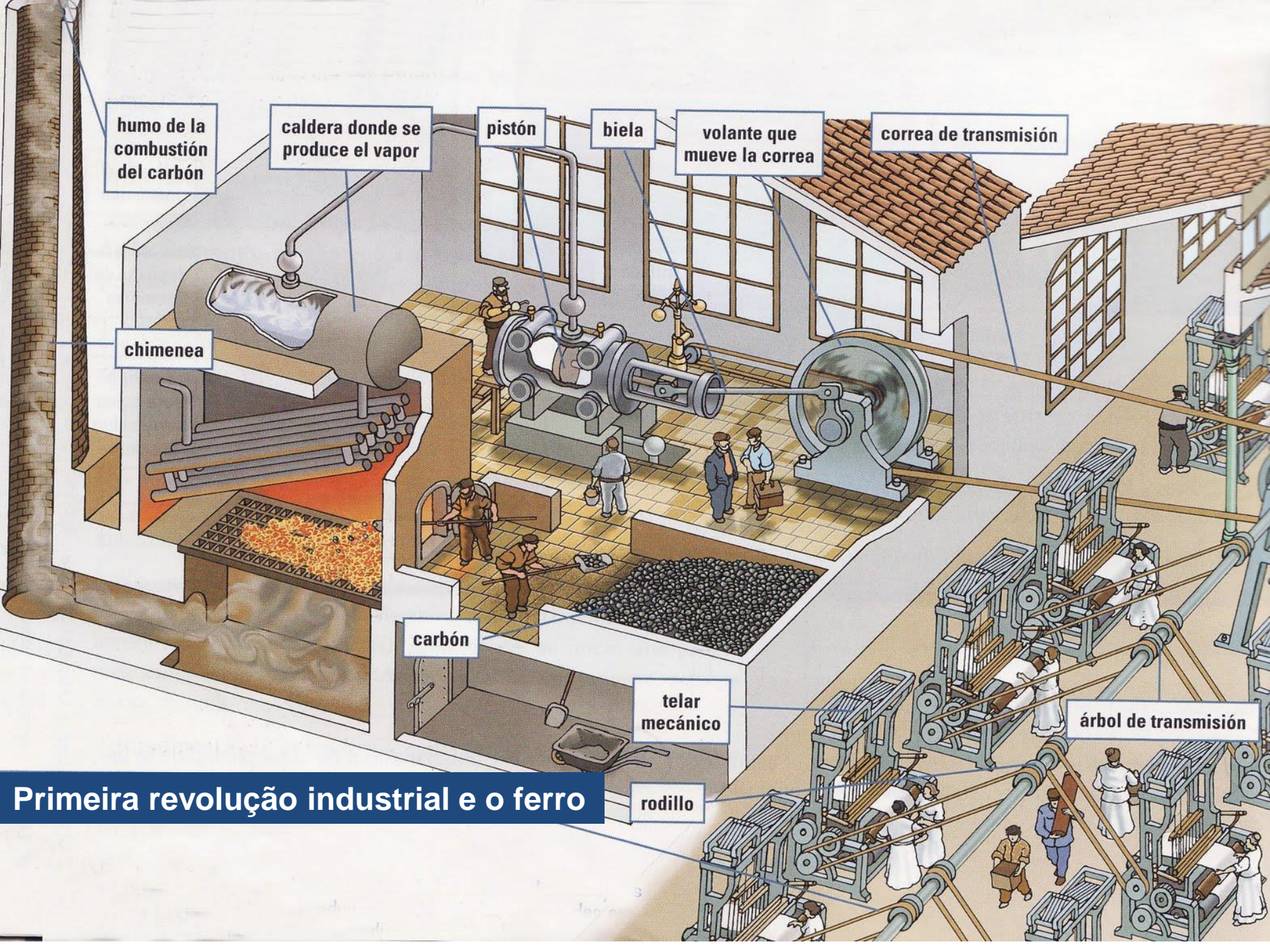


PMT-Poli-USP

História



- A história do Brasil pode ser vista por diversos ângulos: política, economia, costumes, artes...
- O viés da engenharia é raramente abordado: é nossa chance de trazer algo de diferente.
- O século XIX é uma fase de grandes transformações no mundo e no Brasil.
- Naquele século a metalurgia foi o motor de muitas transformações da indústria, da engenharia e da sociedade.



humo de la combustión del carbón

caldera donde se produce el vapor

pistón

biela

volante que mueve la correa

correa de transmisión

chimenea

carbón

telar mecánico

árbol de transmisión

rodillo

Primeira revolução industrial e o ferro



PMT-Poli-USP

Coroa portuguesa percebia a mudança



- Em 1800 Portugal estava sob o “despotismo esclarecido”,
 - já vinham investindo em mudanças na Universidade de Coimbra: cursos de química desde 1780, de metalurgia em 1802.
 - Mandaram bolsistas estudar no exterior
 - Decidiram investir na siderurgia, contratando engenheiros e técnicos alemães.



DICCCIONARIO
DOS
TERMOS ^{DOS} TECHNICOS
DE
HISTORIA NATURAL

EXTRAHIDOS

Das Obras de Linnéo, com a sua explicação,
e estampas abertas em cobre, para facilitar
a intelligencia dos mesmos.

E
A MEMORIA SOBRE A UTILIDADE
DOS JARDINS BOTANICOS
QUE OFFERECE
A RAYNHA

D. MARIA I.

NOSSA SENHORA
DOMINGOS VANDELLI

*Direc̃tor do Real Jardim Botânico, e
Lente das Cadeiras de Chymica, e de
Historia Natural na Universidade
de Coimbra, &c.*

COIMBRA:

Na Real Officina da Universidade:

M. DCC. LXXXVIII.

*Com licença da Real Mesa da Comissãõ Geral
Sobre o Exame, e Censura dos Livros,*

*Foi taixado este Livro em Papel a dous mil e duzentos reis.
Vende-se na loja de Antonio Barneoud á Sé velha:*



Domenico Vandelli (1735-1816), estudou medicina em Pádua, foi o primeiro professor de química da universidade de Coimbra (1772-1800), influenciando dezenas de alunos.



PMT-Poli-USP

Iluminismo em Portugal



- José Vieira Couto escreveu para o ministro Souza Coutinho, em 1799:
 - *A fábrica de ferro, ou as fundições e forjas deste metal, é uma das coisas mais complicadas da arte metalúrgica: o ferro, sendo um metal de vil preço, é por conseguinte preciso que ... tais fábricas e fundições, tudo deve ser em um ponto grande. Os fornos são de 20 pés em quadro e 25 de alto ... Esta labutação atura sem cessar 10 ou 12 meses contínuos.*

Citado em Landgraf, Araújo e Sporback. **200 anos da fundação da real fábrica de ferro de Ipanema**. In: 65º Congresso da ABM, 2010, Rio de Janeiro - RJ. Anais do 65º Congresso da ABM. São Paulo: ABM, 2010. v. 1. p. 3001-3014.



PMT-Poli-USP

Bonifácio, em carta de 1802, descreve o programa de curso na Universidade de Coimbra



A Metalurgia, nas suas duas subdivisões de Docimasia (hoje Análise Química) e Arte Fusória (hoje Processos de fundição), com todos os seus pertences da criação de máquinas, levadas d'água, açudes, edifícios, etc., requer um ano por inteiro, e as vezes mais, como se costuma praticar constantemente nas Academias e Ginásios Montanísticos da Europa.

Landgraf : **O engenheiro metalurgista José Bonifácio.** In: Simpósio Comemorativo Vicente Coelho de Seabra. 1ed.Belo Horizonte: UFMG, 2015, v. 1, p. 173-190.



PMT-Poli-USP

Sabem quem é Bonifácio?



Em 1822, influenciou Pedro I a proclamar a independência, ficando conhecido como “Patriarca da Independência”.

Estátua dele na Praça do Patriarca, centro de SP.



PMT-Poli-USP

1808 : Família Real decide vir para o Brasil



- O sonho de criar uma siderurgia muda-se para o Brasil.
 - Sabem que há minério de ferro em Minas e perto de Sorocaba.
 - Trazem os engenheiros alemães
 - “convencem” fazendeiros ricos a investirem em duas “Fábricas de Ferro”: Pilar e Ipanema.
 - Decidem implantar a tecnologia mais moderna: o Alto-Forno



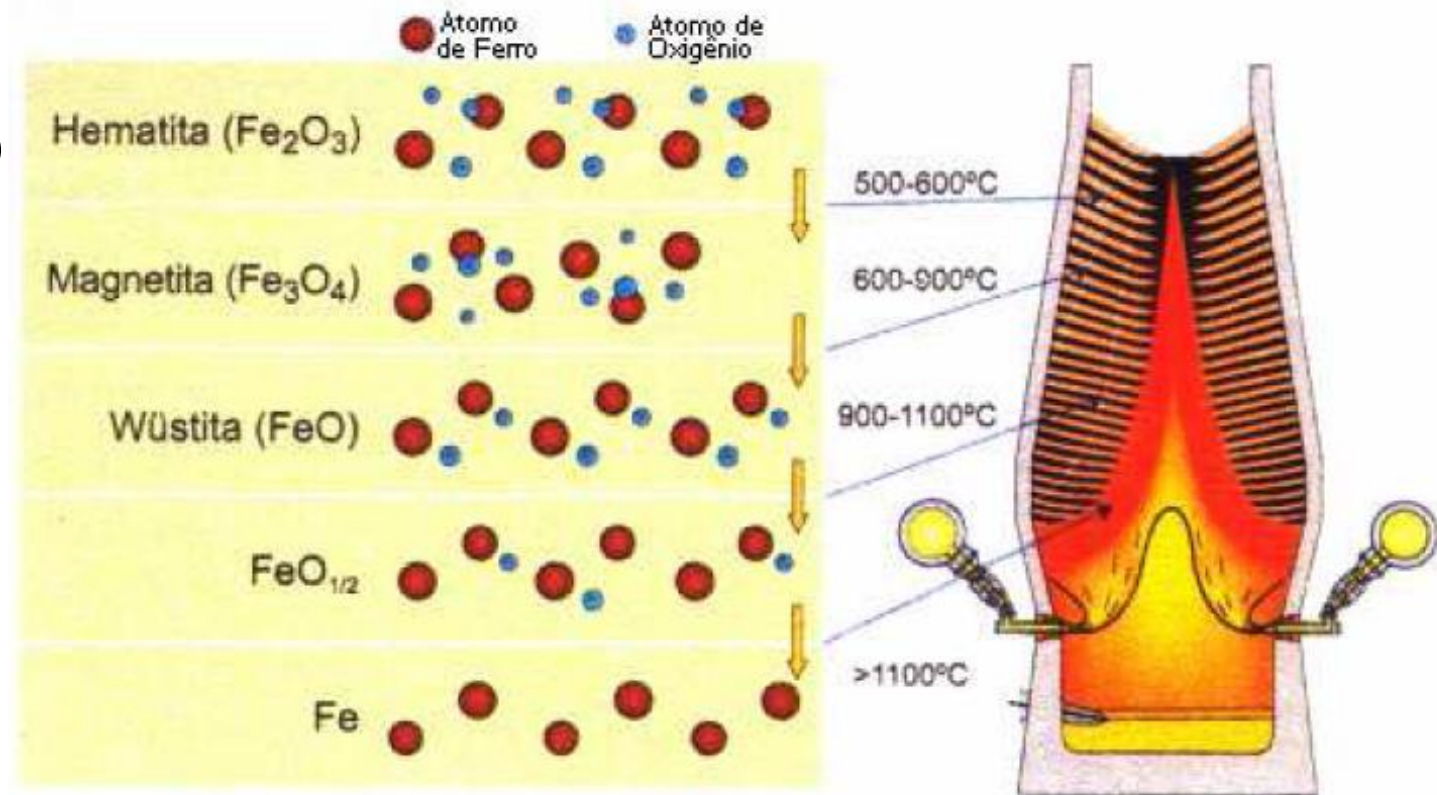
O Alto Forno



PMT-Poli-USP

Até hoje se produz ferro pelo alto-forno.

Seu perfil tem quase a mesma forma.



Minério de ferro é transformado em ferro metálico ao longo da descida da carga. Minério e carvão entram sólidos lá em cima, ferro líquido sai em baixo.



PMT-Poli-USP

A sina de Ipanema



- Foram os únicos altos fornos em operação na América Latina, até 1890.
- Vários governos investiram dinheiro na Fábrica, comprando equipamentos, trazendo técnicos estrangeiros.
- Nunca conseguiu ser auto-suficiente: problemas com a logística de distribuição da produção, o fornecimento de carvão, a inconstância do apoio governamental, etc.



PMT-Poli-USP

O século do ferro



- Produção mundial de ferro aumentou de 1 Mt/a, in 1800, para 25Mt/a, em 1900, 3,3% de crescimento médio no século XIX. População cresceu de 1 bilhão para 1,7 bilhões.

Consumo Brasileiro de ferro aumentou de/ano 3.000t em 1800, para 60.000t/ano em 1900.

Praticamente tudo importado.



PMT-Poli-USP

A presença da engenharia na Fábrica de Ferro de Ipanema



- Ipanema foi criada em 1810 e durou até 1926.
- Por ter sido ligada ao Ministério da Guerra, os diretores tinham obrigação de mandar relatórios. Esses relatórios estão nos Arquivos do Estado e Nacional.
- Vários artigos foram publicados na imprensa da época, sobre Ipanema.
- Ipanema oferece ótima oportunidade para acompanhar a evolução da engenharia.



PMT-Poli-USP

O Alto forno



- Forno obrigatoriamente de operação contínua, operava 6 meses sem parar, 24h por dia
- Trabalho era extenuante pelo calor, perigoso pelos acidentes e exigia bastante mão de obra: escravizados.
- Produzia diariamente 1 tonelada de ferro líquido
- Consumia 3 toneladas por dia de carvão
- Permitia fundição de peças
- Para ter ferro dútil, exigia posterior “refino”.
- O engenheiro alemão, Varnhagen, não tinha muita experiência prévia: foi para Portugal com 20 anos.



PMT-Poli-USP

A gestão Varnhagen



- Entre 1815 e 1818 Varnhagen construiu rapidamente dois altos fornos, seguindo o modelo da Fábrica em que ele trabalhou em Foz d'Alge, Portugal.
- Fez duas “campanhas de produção” prolongadas em 1818 e 1819, mas sua produção ficou bem abaixo das 600t /ano previstas.
- Os altos fornos gêmeos que ele construiu estão lá até hoje. Sofreram algumas reformas, foram usados por 120 anos, mas são os mesmos!



Altos-fornos gêmeos de Varnhagen



PMT



PMT-Poli-USP

Ipanema chama a atenção dos europeus



- É tão surpreendente existir um alto-forno no Brasil que se torna parada obrigatória para muitos dos visitantes estrangeiros da primeira metade do século XIX:

- Saint Hillaire
- Edmond Pink
- Spix e Martius
- Debret

Com isso, temos várias imagens de Ipanema naquele período

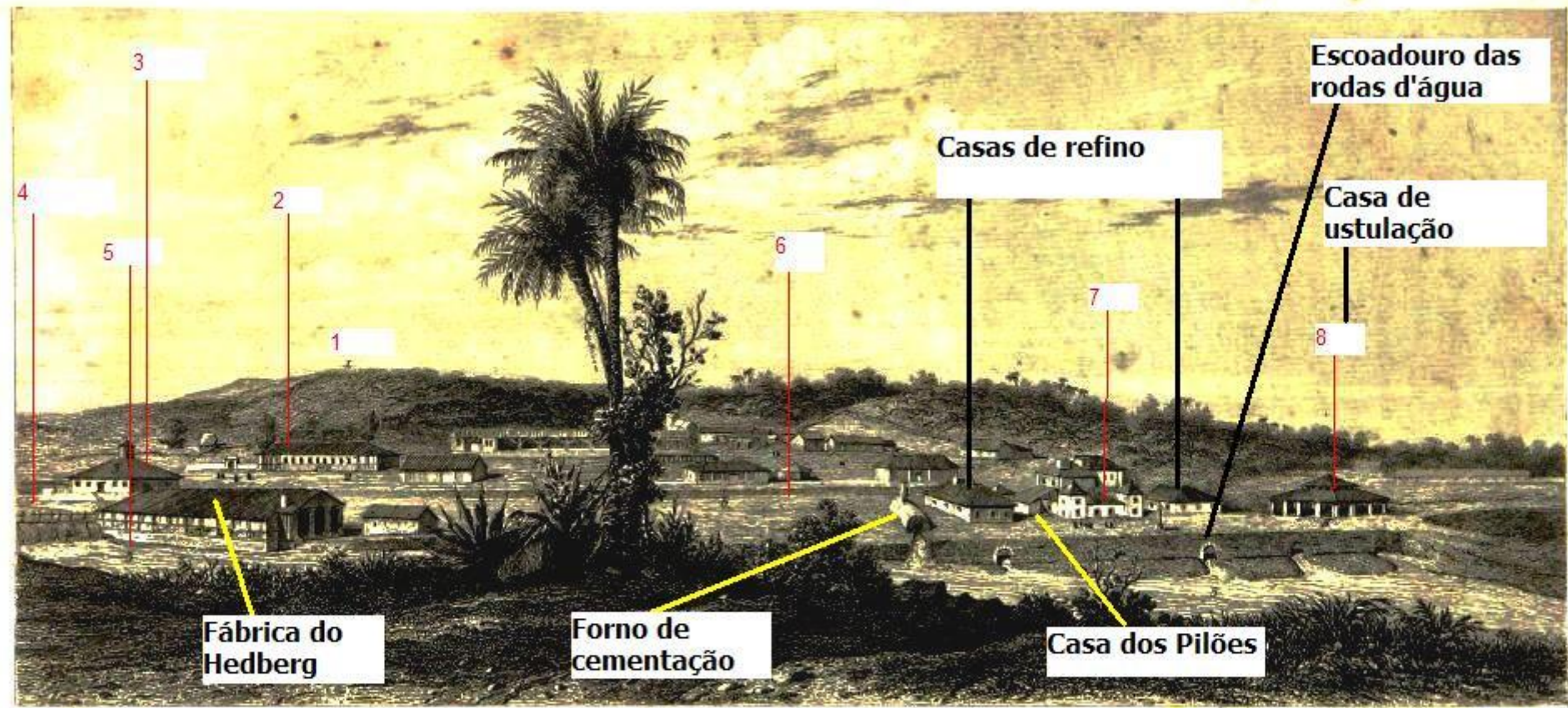


Gravura de Lemaitre



Ger. do Brasil

Tom 2



Fábrica do Hedberg

Forno de cementação

Casas de refino

Escoadouro das rodas d'água

Casa de ustulação

Casa dos Pilões

Frederico Luis Guilherme de Pombal

Lemaitre sculp.

Ipanema em 1821

0. IPANEMA EM 1821

1. Morro do ferro 2. Casa do Director 3. Armazem 4. Acude 5. Rio Ipanema 6. Canal 7. Fornos altos 8. Pilões

1. Morro do ferro 2. casa do Director 3. Armazem 4. Acude 5. Rio Ipanema 6. Canal 7. Fornos altos 8. Pilões



A Fábrica de Ipanema: detalhe do alto forno

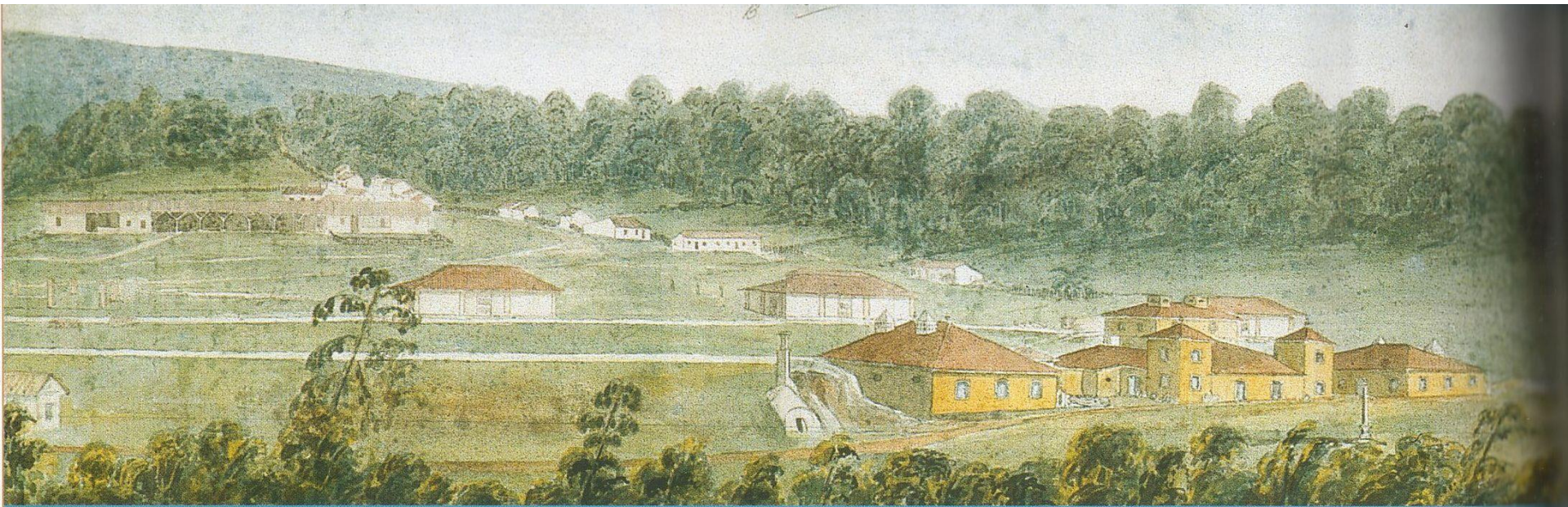




A Fábrica de Ipanema: Edmund Pink, 1823



PMT-Poli-USP



(Unnumbered). Sketch of the Fabric of St. Jeao (sic for João) de Ypanema, 21 July 1823 • Real Fábrica de Ferro São João de Ipanema

16,5 x 74 cm - ACERVO / COLLECTION BOVESPA



Debret, 1827

PMT-Poli-USP



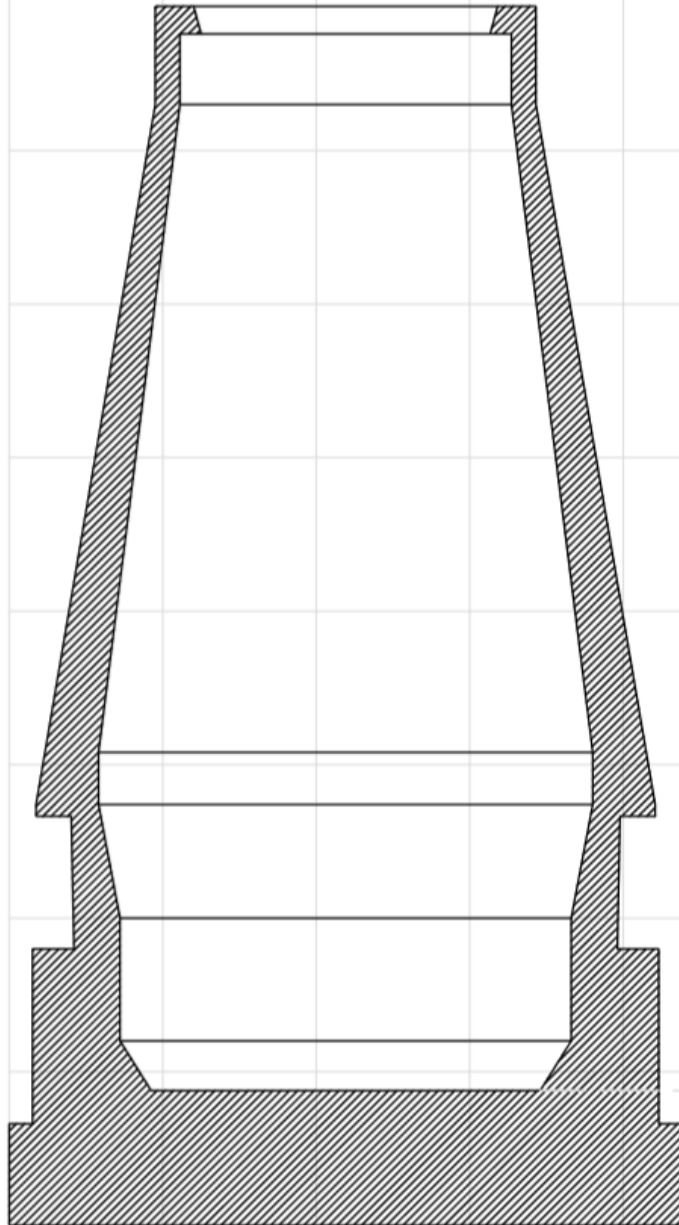


PMT-Poli-USP

Um aspecto da engenharia dos altos fornos: o perfil do vazio interior

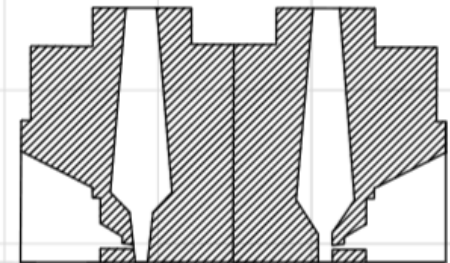


- O perfil é um assunto mencionado em todos os livros de siderurgia da época, e até hoje.
- O Alto forno continua sendo o equipamento usado para produzir as atuais 1,6 bilhões de toneladas de ferro/ano”.
- O perfil mudou, mas a forma geral é a mesma.



Alto forno construído no século 21,
Comparado, em escala, com altos
fornos gêmeos de Ipanema.

Dimensões mudaram, mas o formato
mantém algumas características
comuns: ar entra por baixo, minério
por cima, ferro líquido sai por baixo,
continuam tendo cone, rampa e
cadinho.





PMT-Poli-USP

O perfil do AF



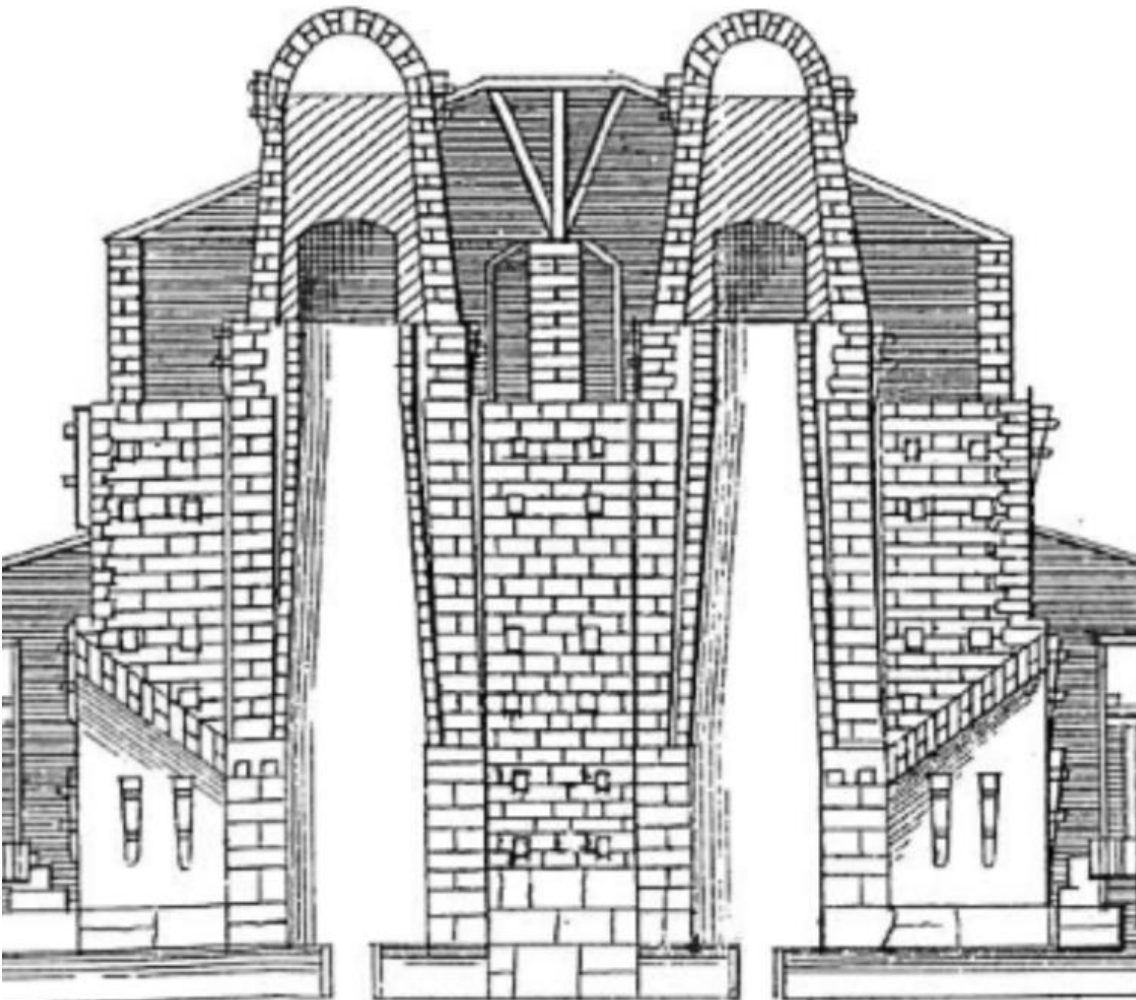
- Até hoje os detalhes do perfil são definidos de forma empírica e arbitrária.
- Por ser considerado característica muito importante do forno, temos desenhos de várias mudanças.



Desenho publicado em 1833



PROFIL DERSELBEN.



Curiosamente o primeiro desenho do perfil interno não mostra a rampa e o cadinho.

O diretor Varnhagen descreveu detalhadamente as dimensões dessas partes.

Em 1820, um visitante ilustre, José Bonifácio de Andrada e Silva, critica o que viu.

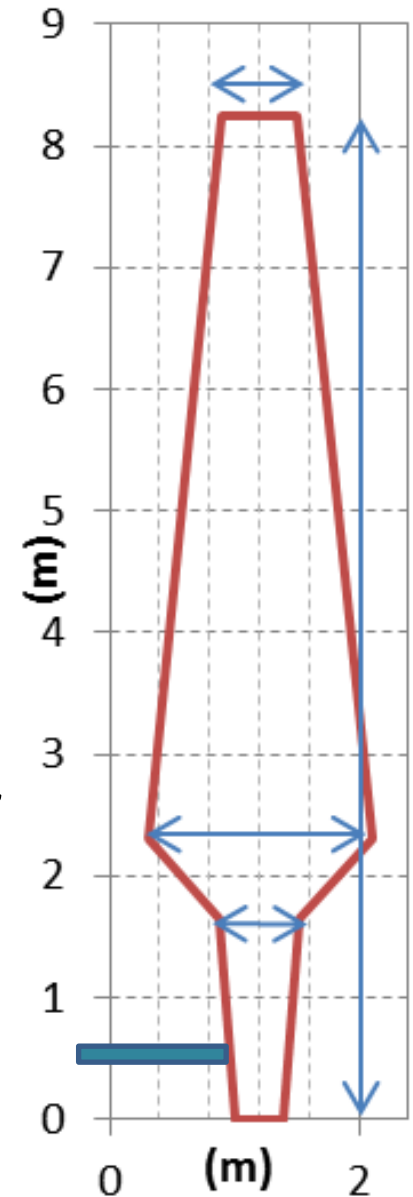


PMT-Poli-USP

A surpreendente crítica de Bonifácio, em 1820

O Rast (rampa) é muito baixo e muito pouco esguio, pois tem 45 graus, sobre o qual se acumula a carga ainda crua, se resfria na circunferência, e depois se precipita em massa no cadinho e chega ao algaraviz, onde se desregra o vento, que a não pode penetrar e fundir devida e gradualmente;

No momento em que nem a notação de reação química estava estabelecida, Bonifácio desenvolve uma explicação mecânica para a crítica ao ângulo da rampa.



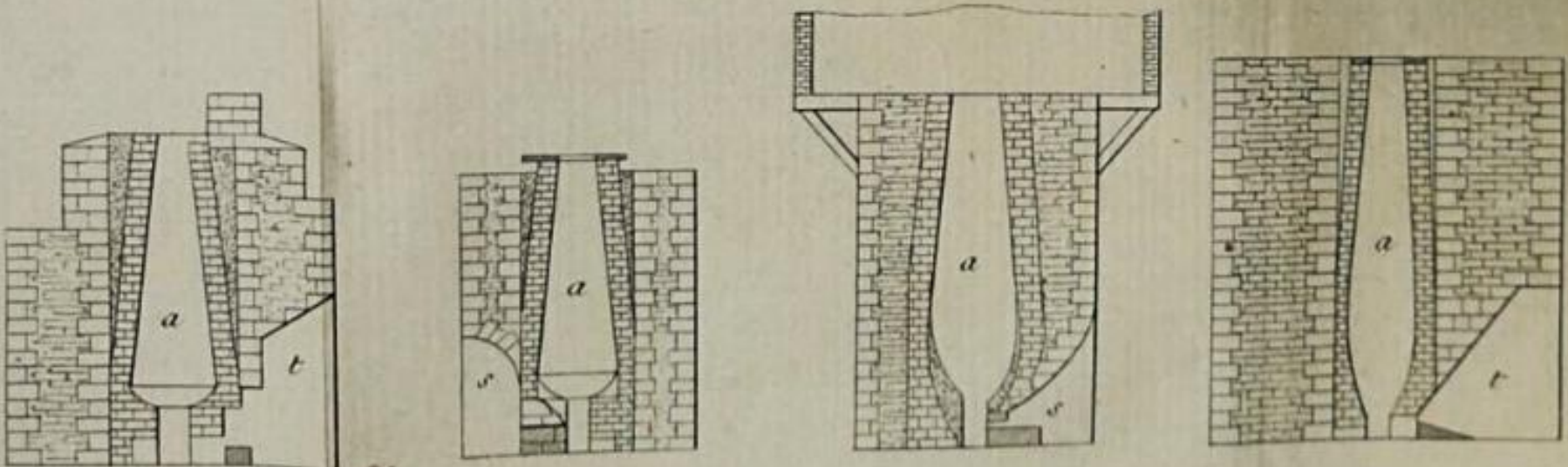


PMT-Poli-USP

Entretanto: Não havia padrão para o ângulo da rampa



Os dois autores mais importantes da época, Hassenfratz (1812) e Karsten (1816), demonstraram em texto e em figuras que não havia padrão.



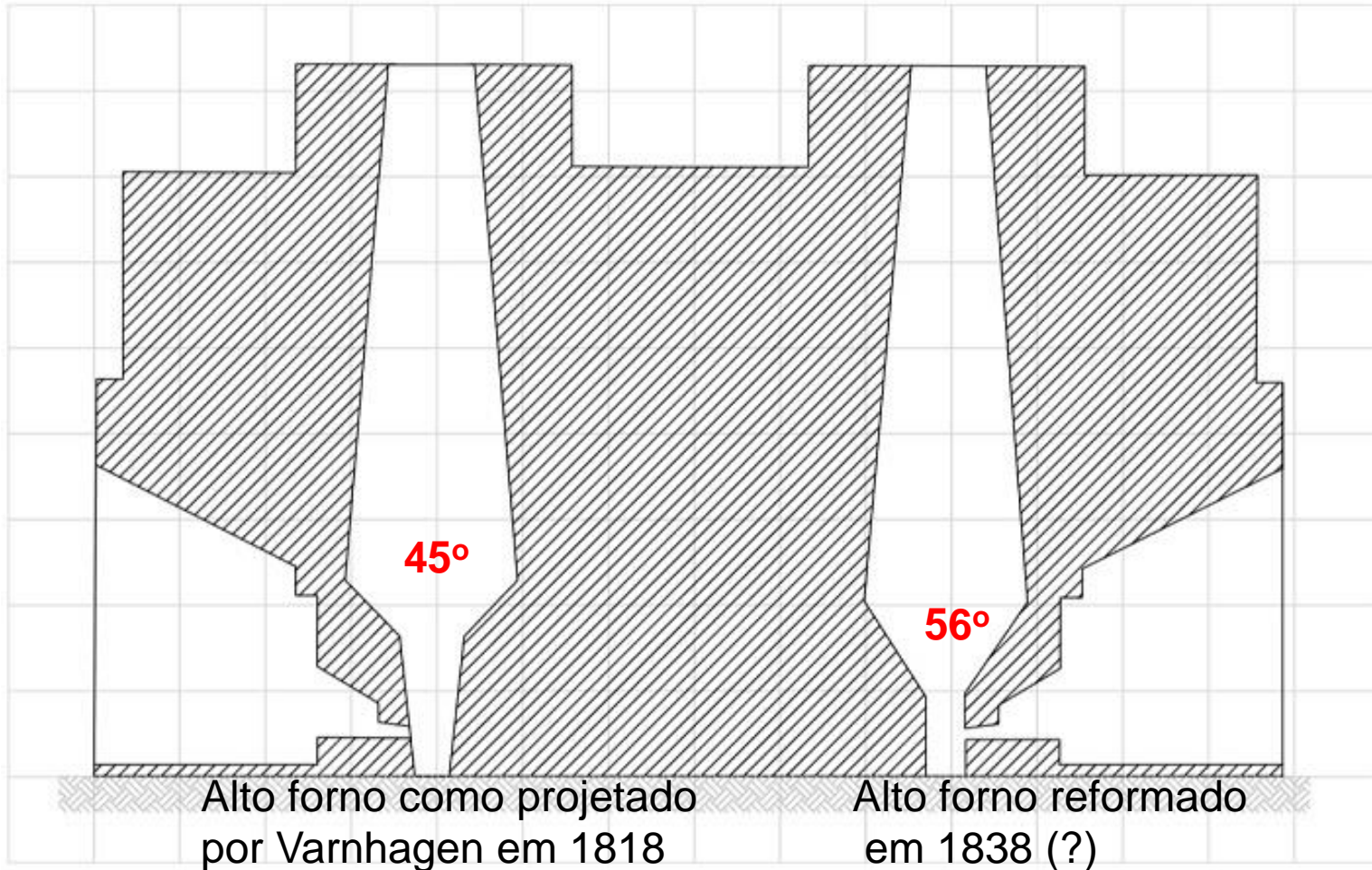
Quatro de mais de 30 perfis em Hassenfratz, **La Siderotechnie**, 1812



PMT-Poli-USP

Evolução dos perfis dos AF:

Varnhagen voltou para Portugal em 1821, seguindo D. João VI. Ipanema continuou em operação. Alguns diretores fizeram reformas.





Um pouco de mistério



PMT-Poli-USP

Nenhum dos
desenhos
disponíveis hoje
explicam a forma
do alto forno
Norte (lado
direito).





PMT-Poli-USP

Escaneamento a laser dos altos fornos



Em 2015, convidamos uma equipe de pesquisadores da universidade de Ferrara, Itália, para escanear os dois AF

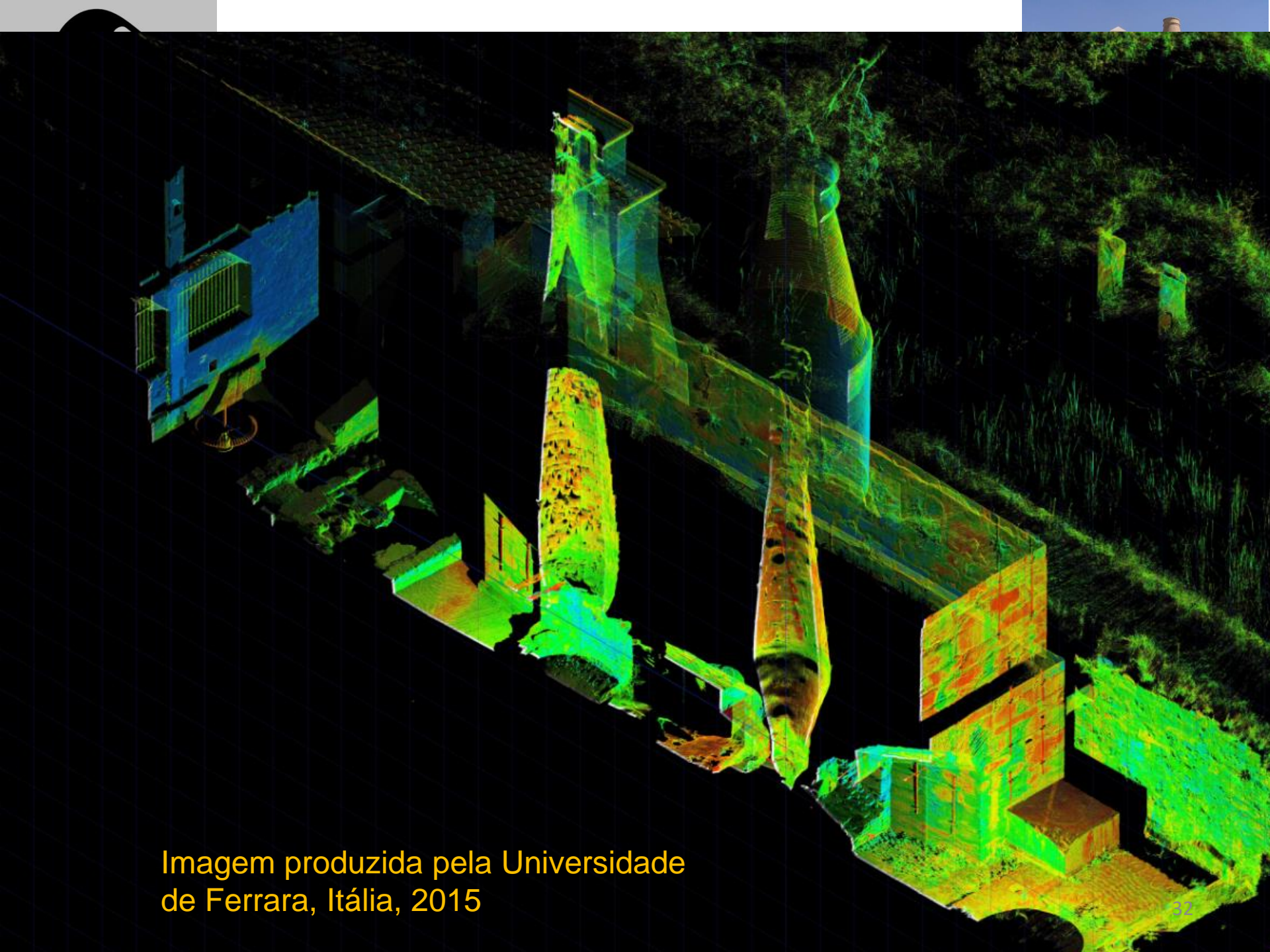
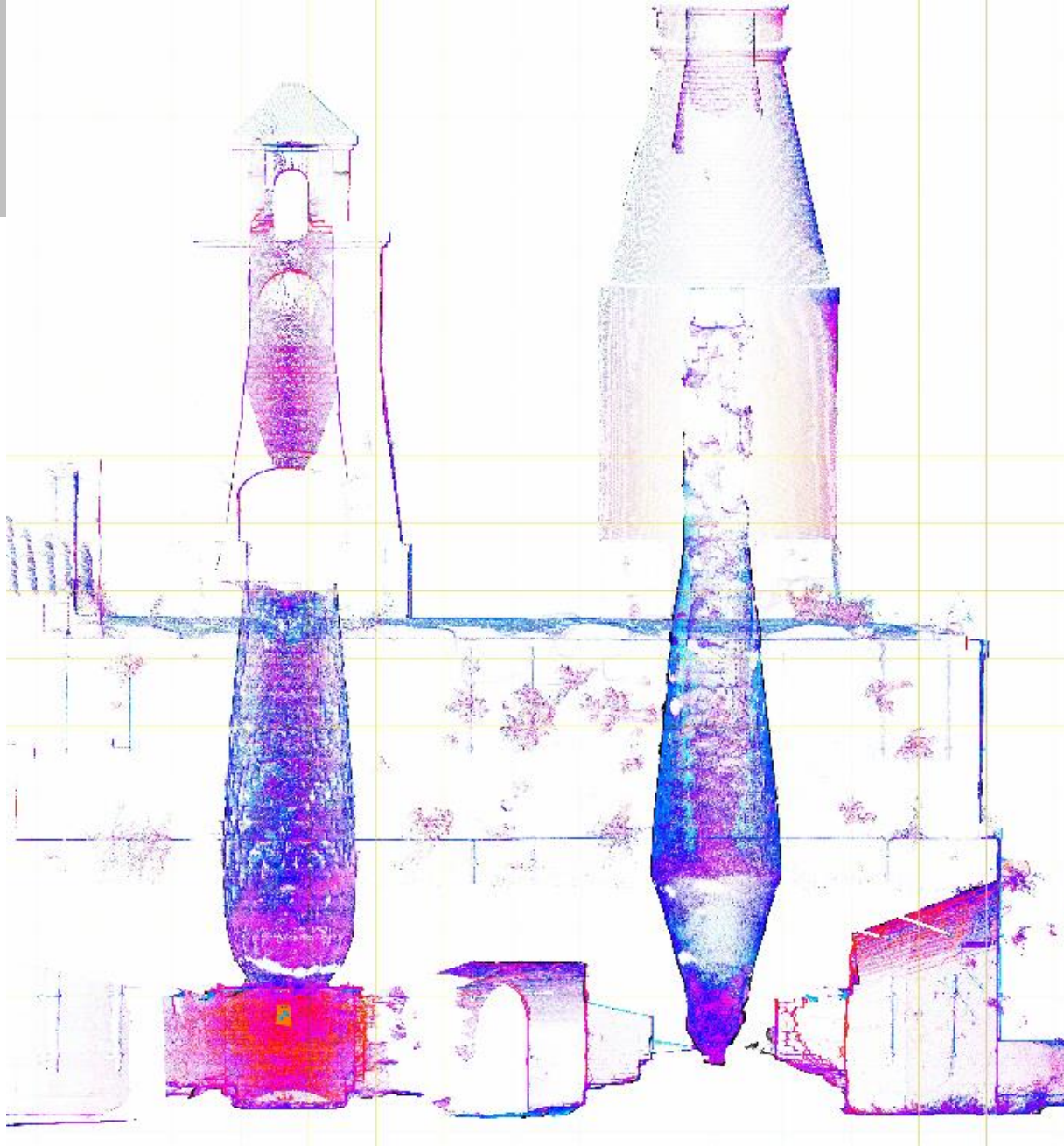


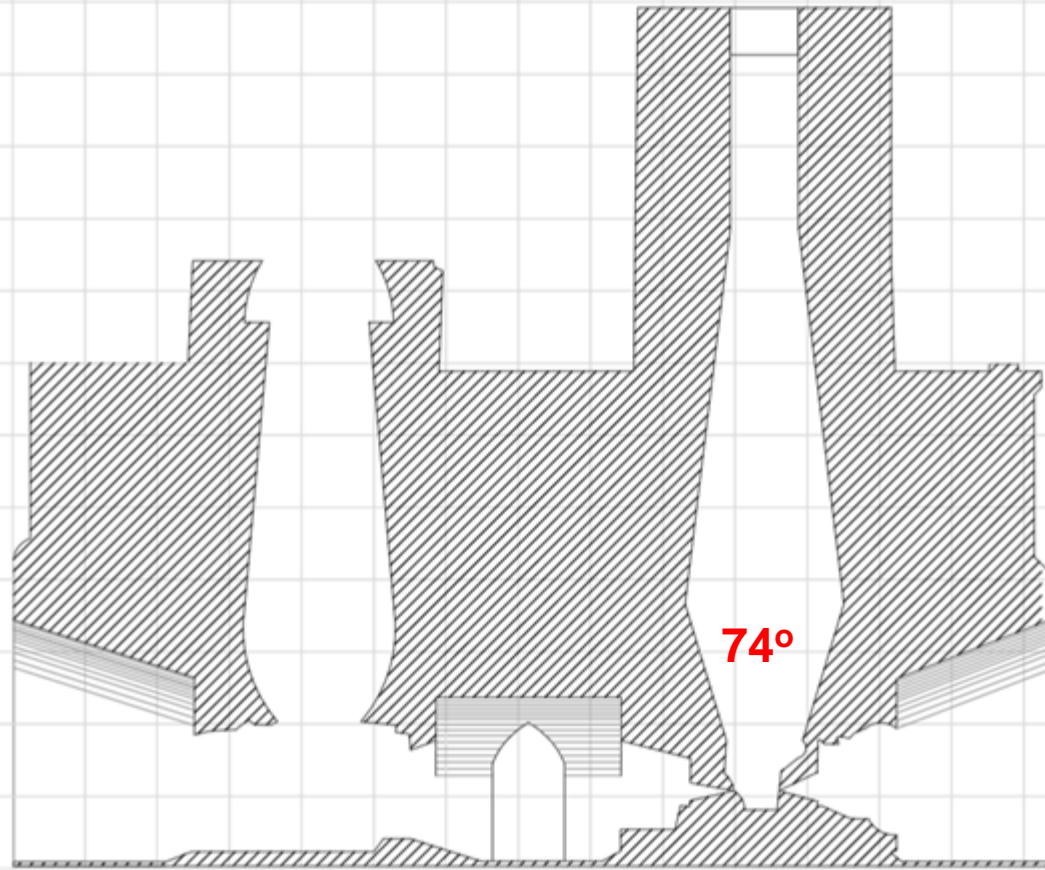
Imagem produzida pela Universidade de Ferrara, Itália, 2015



PMT-Poli-USP



Corte longitudinal dos AF gêmeos de Ipanema, produzido por M. Balzani e co-autores,,
Universidade de Ferrara, 2016



Qual a explicação para o perfil que hoje existe?

Reforma deve ter sido feita em 1920, depois de uma visita de um tenete aos EUA.

Baseado em que referências ele assim o construiu?

Esperamos encontrar relatórios no ministério do Exército.

Figura 8. Perfil atual dos altos fornos de Ipanema, como mapeado por escaneamento a laser. O Alto Forno Norte, à direita, deve ter sido reformado pelo Capitão Mendes Teixeira, em 1920.

Landgraf et al, a ser publicado, Anais Congresso ABM, 2017



PMT-Poli-USP

Análise microestrutural



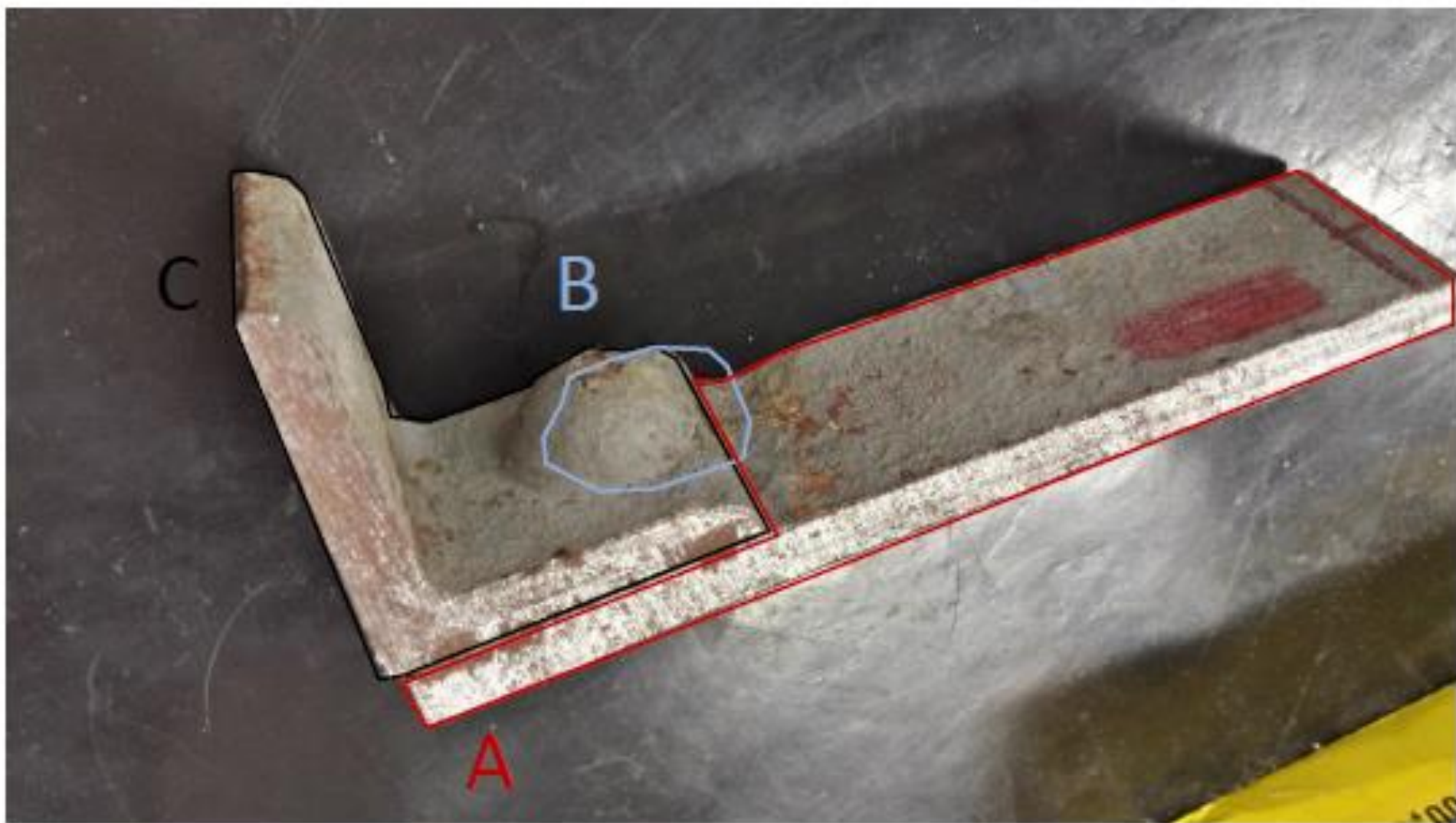
- A literatura internacional indicava a potencialidade da análise das “inclusões de escória” presentes nos ferros forjados.
- As impurezas se concentram nas inclusões

Ponte de ferro na Bahia
Construída em 1884, com ferro da Escócia

PMT-



*Figura 6: Ponte Imperial D. Pedro II, sobre o Rio Paraguaçu, que divide as cidades Cachoeira e São Félix.
Fonte: A, C., 2018*

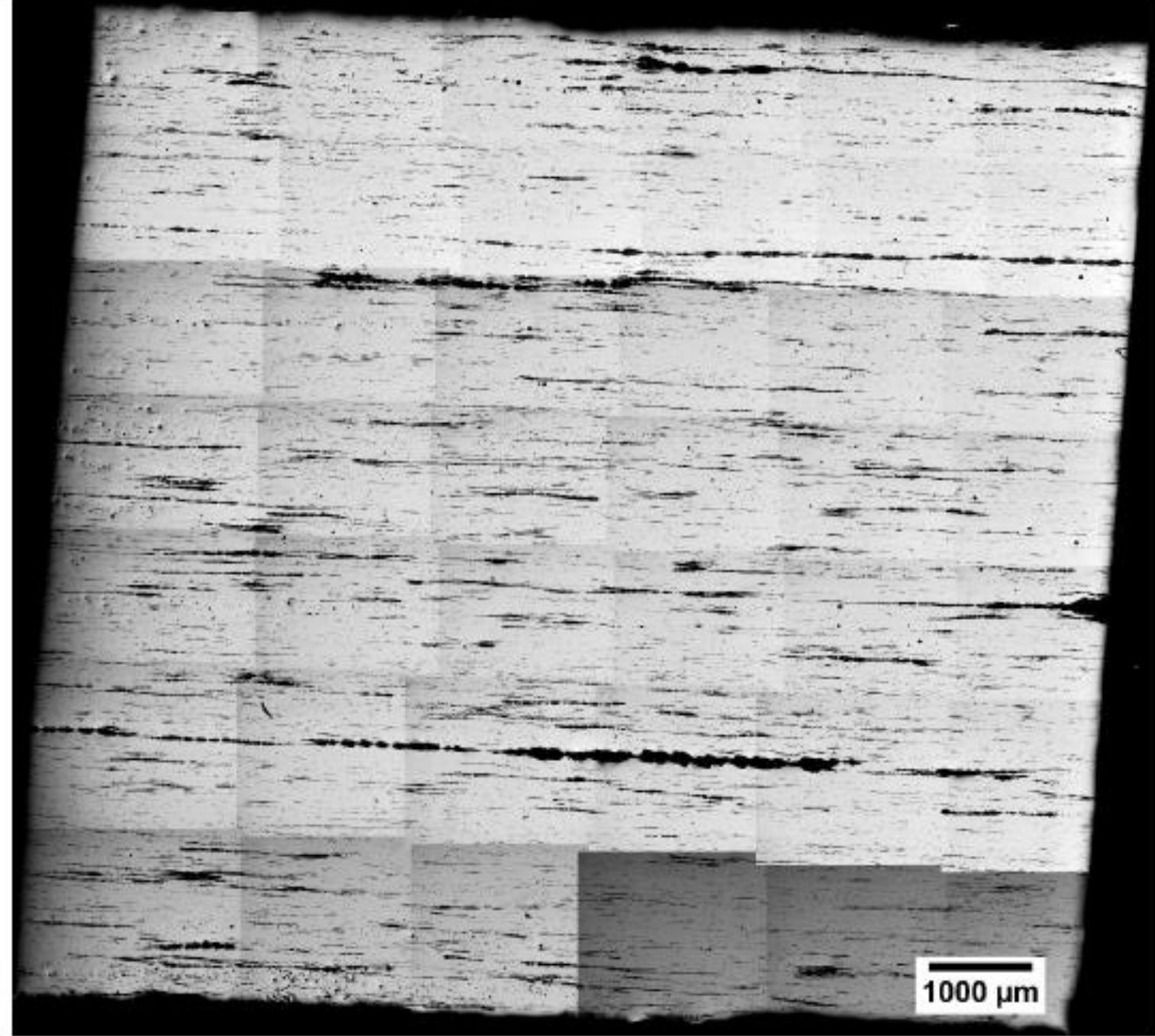


*Figura 19: Componentes da ponte. A –Alma; B – Rebite; C – Cantoneira.
Fonte: Próprio autor, 2017.*

Corte de um pedaço da estrutura da ponte, para examinar resistência



Microestrutura
Mostra óxidos
no interior do
ferro: são as
**inclusões de
escória** do
processo
antigo: 7% do
volume.



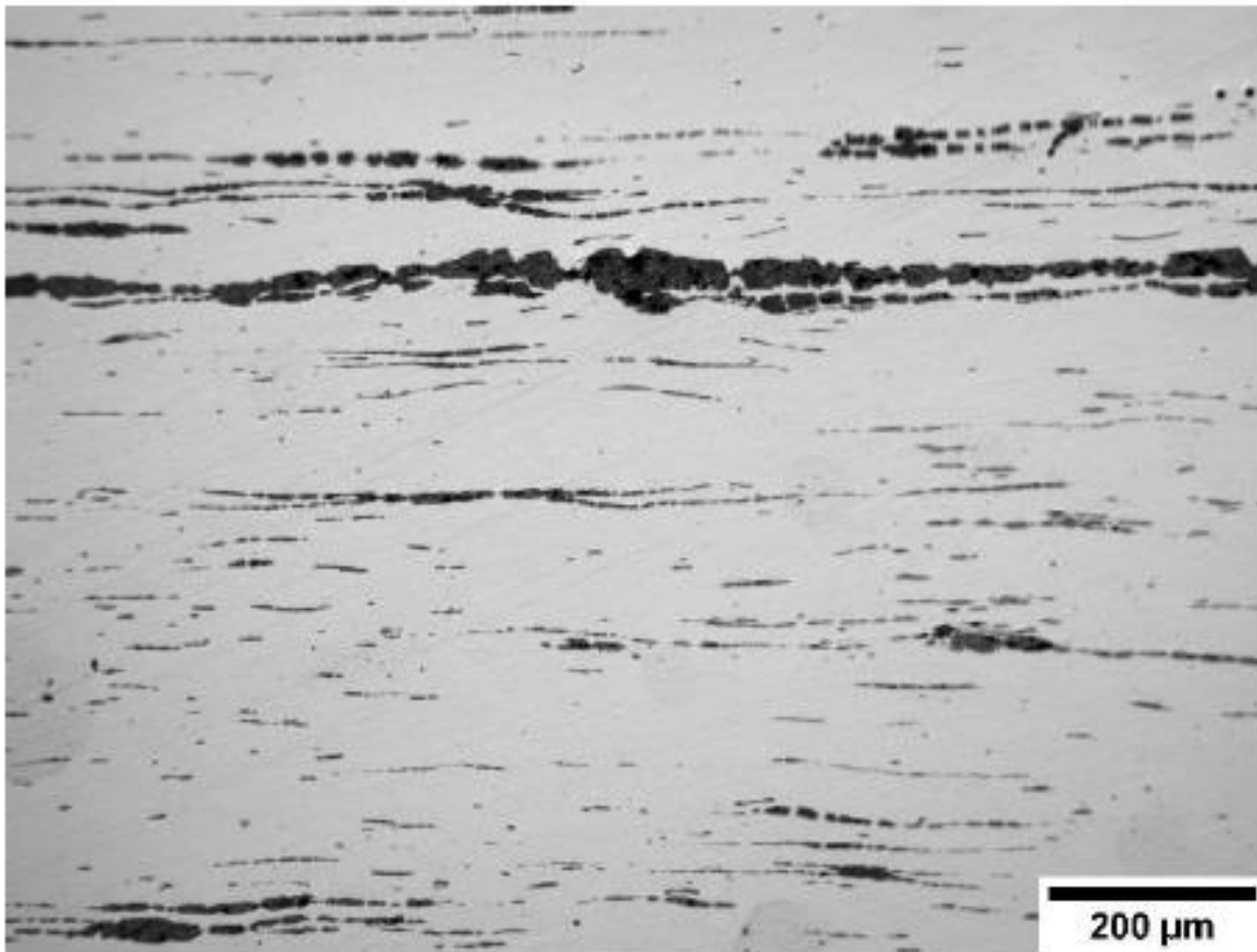
1000 μm

Figura 41: Resultado da composição de imagens da amostra 145-L.

Fonte: Próprio autor, 2019



PMT-I



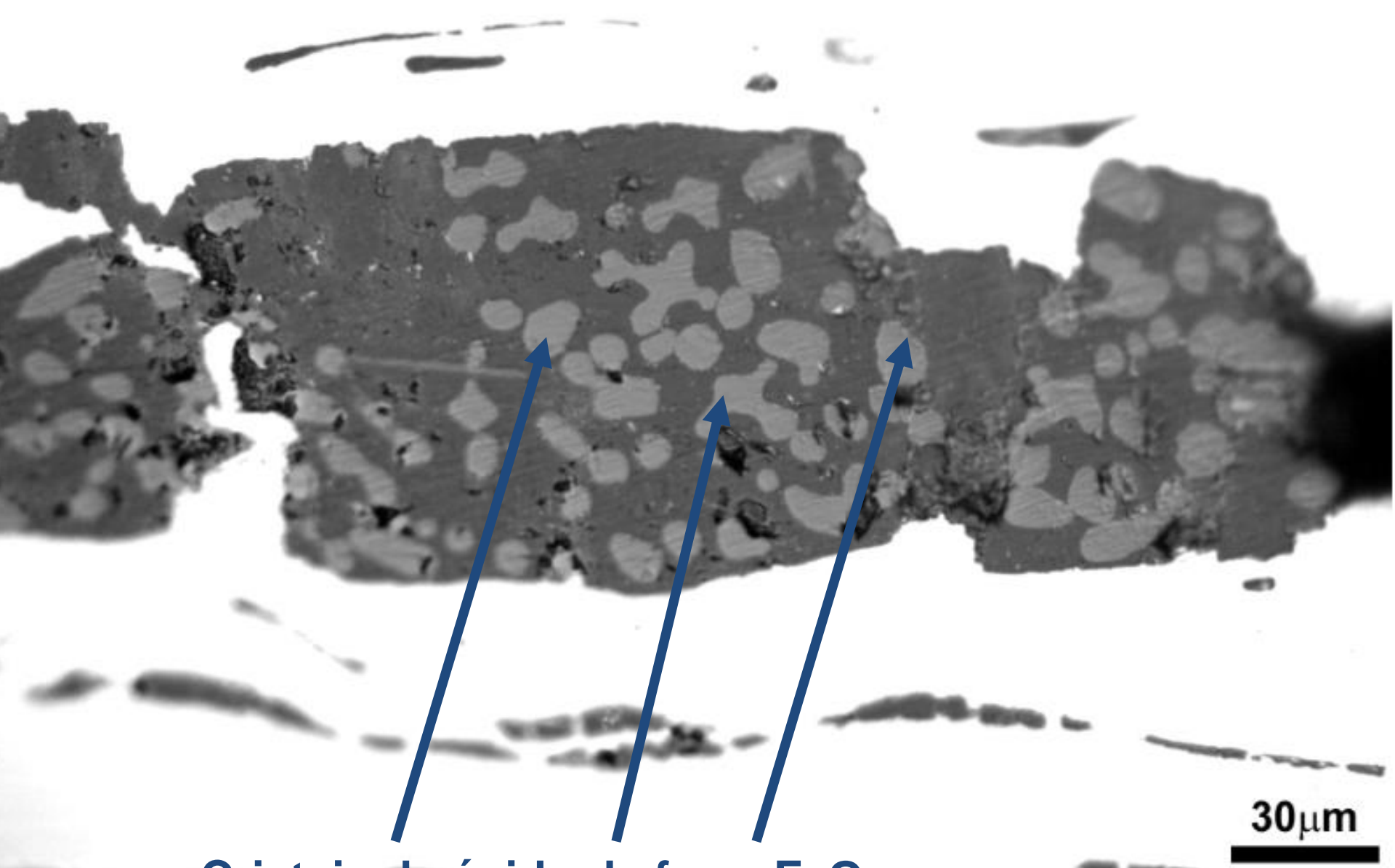
Olhando com maior aumento se vê alguns detalhes dessas “inclusões de escória”

PMT.

Dentro das “inclusões de escória” se vê várias fases!

100 μ m

Figura 38: Amostra 145-I 1, com aumento de 200x



**Cristais de óxido de ferro FeO
numa matriz de silicatos**



PMT-Poli-USP

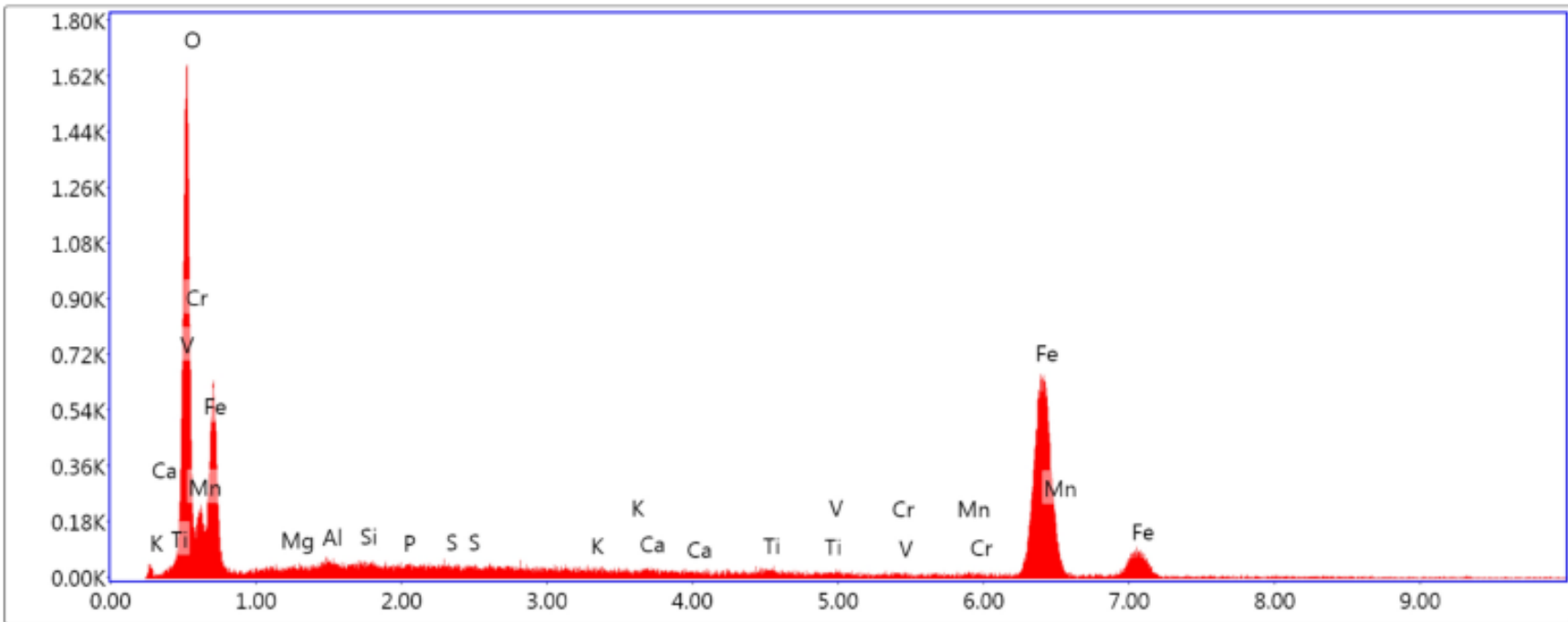
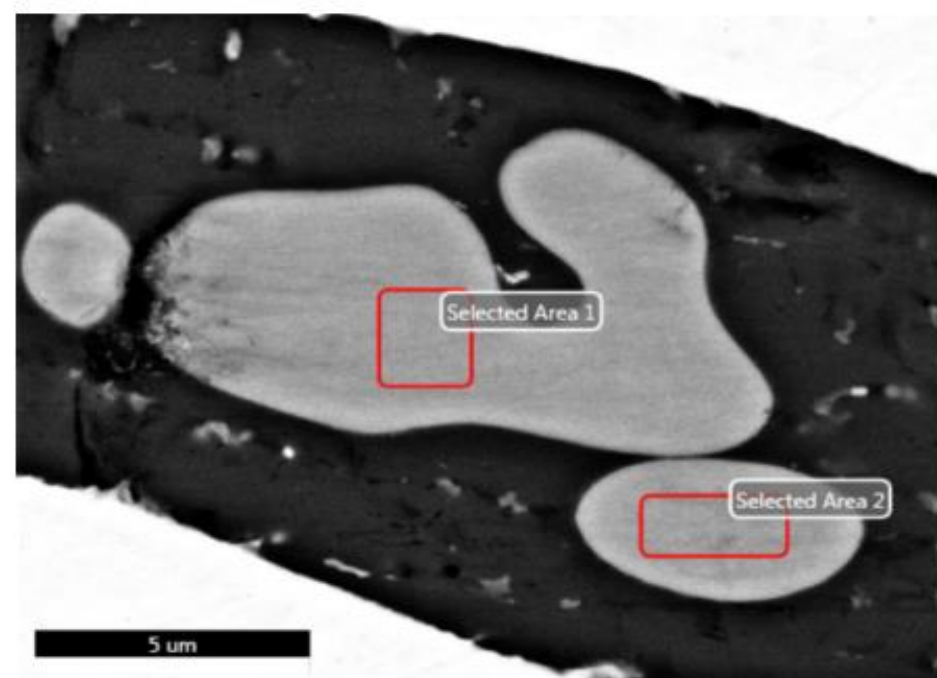
Análise por Microscopia eletrônica de varredura



- É possível fazer imagem e **análise química** de uma área específica da imagem.



Análise por fluorescência de raios X
Revela 96%FeO 1,0%TiO₂
Pequenos teores de Al, Si e Mg

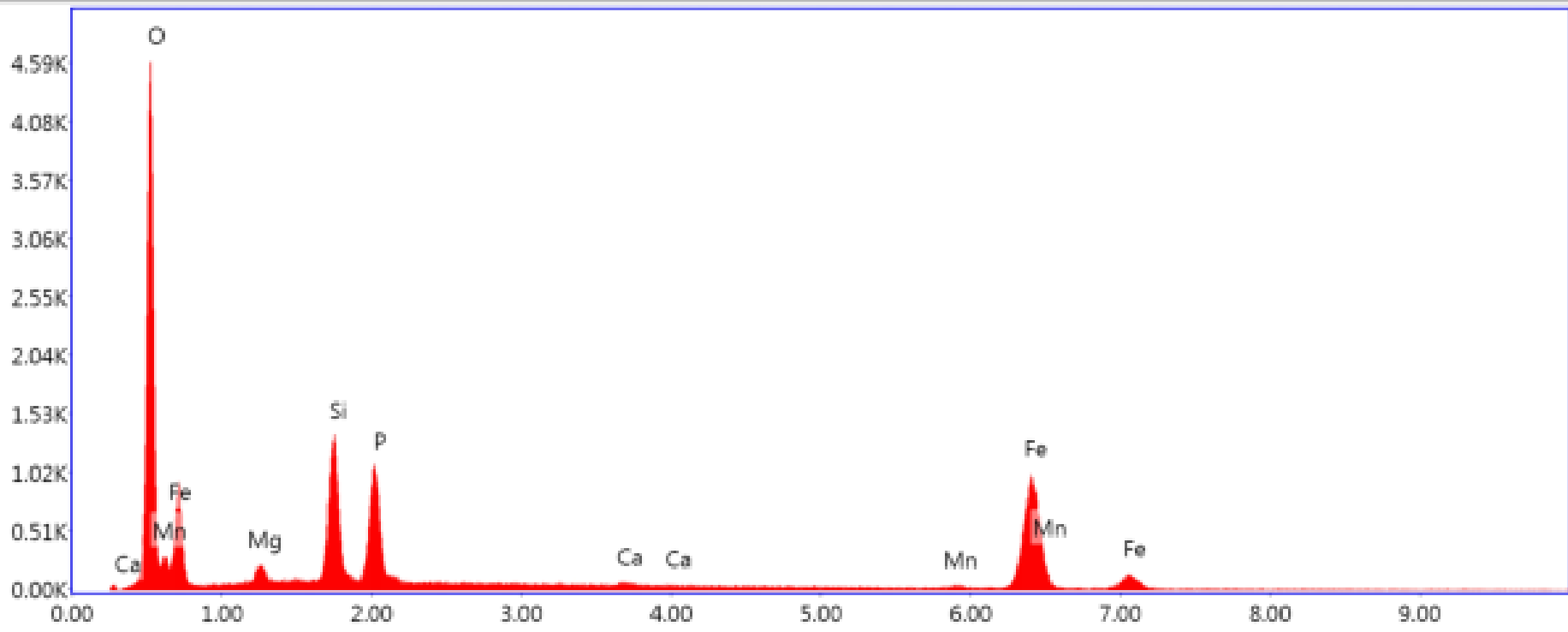




Espectro de análise química



PMT-Poli-USP



Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

Cada elemento químico ocorre num valor constante de energia (na horizontal)
E a altura do pico é proporcional ao teor daquele elemento naquela área analisada



PMT-Poli-USP

Objetos da FFI



- O diretor da Fábrica de Ipanema presenteou D. Pedro II com uma coleção de objetos de ferro lá produzidos.
- Esses objetos foram guardados no Museu Nacional do Rio de Janeiro.
- Em 2015, antes do incêndio, fomos autorizados a cortar fragmentos para analisar.



A coleção do Museu Nacional

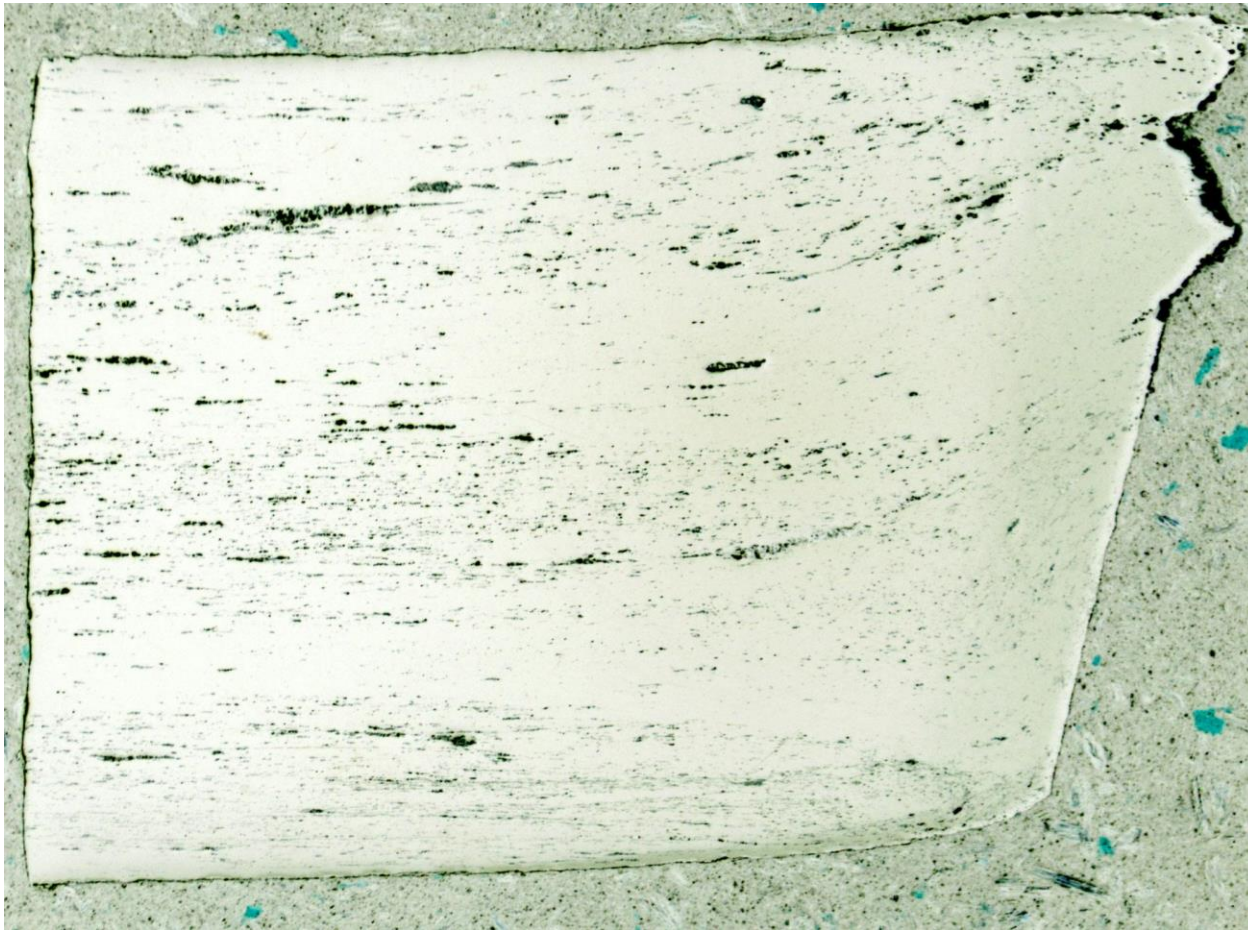


PMT-Poli-USP





PMT-Poli-USP



seção
longitudinal de
barra de
diâmetro 8mm,
(amostra 131):
Inclusões de
escória no
interior da barra



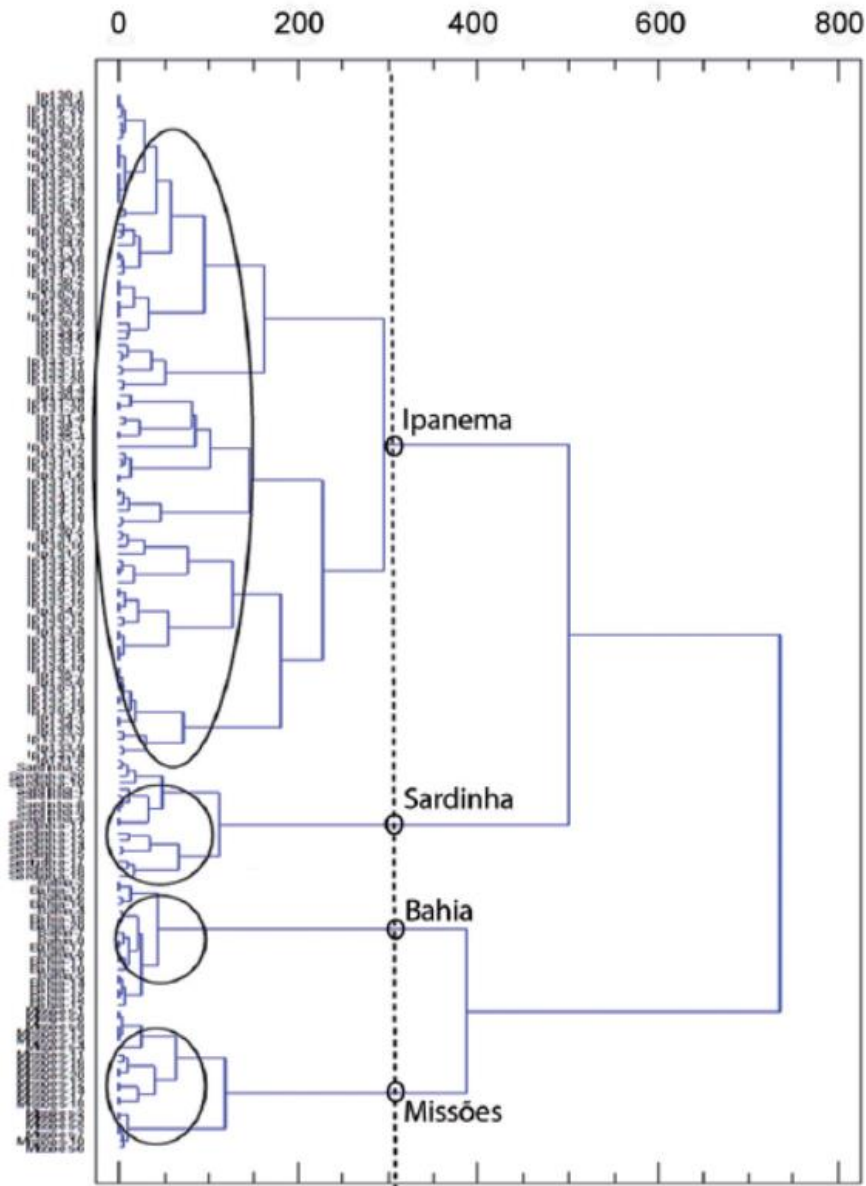
Sample	TiO ₂	V ₂ O ₅
Ip-130	0.5±0.2	1.7±0.6
Ip-131	1.0±0.3	3.0±0.6
Ip-133	0.3±0.2	1.5±0.6
Ip-134	0.5±0.4	2.0±0.7
Ip-135	0.6±0.3	1.6±0.9
B-145	0.9±0.1	0.5±0.2
M-123	0.1±0.1	0.3±0.2
S-107	1.2±0.3	3.2±0.9

- Os cristais de FeO das amostras da coleção do MN mostrou teor de vanádio consistentemente alto, indicando a possibilidade de ser uma “assinatura química” da FFI

Elmer Antonio Mamani-Calcina^{a,b}, Fernando José Gomes Landgraf^{b,c}, Cesar Roberto de Farias Azevedo^{a,}*

Materials Research.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0444>



Um aperitivo de Big Data Analytics,
E o reconhecimento de padrões

Foram analisadas
centenas de inclusões, de
8 amostras.

O uso da técnica de análise hierárquica de conglomerados nas análises químicas por EDS das fases wustita na inclusões de escória de amostras de diferentes procedências permitiu classificar corretamente suas procedências, diferentemente das análises da inclusão como um todo, ou da região fora das dendritas de wustita.

Figure 6: Dendrogram using the treated EDX results of the wüstite phase of the slag inclusions.



PMT-Poli-USP

Projetos em andamento



- Completar análise dos teores de V e Ti de pelo menos 30 amostras diferentes, para confirmar assinatura química.
- Entender a ocorrência de precipitados ricos em Ti e V em algumas amostras: como isso pode ocorrer?



PMT-Poli-USP

Sonhos para o futuro, nessa linha de pesquisa



- Reproduzir processo de redução de minério usado em Minas Gerais, em 1812.
- Reinsere Ipanema e a metalurgia brasileira nos livros de História do Brasil.



PMT-Poli-USP



Agradeço a atenção de todos,

f.landgraf@usp.br