

## **PRESERVAÇÃO DA FÁBRICA DE FERRO DE IPANEMA E A ANÁLISE MICROESTRUTURAL ARQUEOLÓGICA DE SEUS OBJETOS**

Fernando J. G. Landgraf<sup>\*</sup>

Paulo E. M. Araújo<sup>\*\*</sup>

Luciano B. Regalado<sup>\*\*\*</sup>

Rafael R. Maia<sup>\*\*\*\*</sup>

Cesar R. F. Azevedo<sup>\*\*\*\*\*</sup>

### **Introdução**

A siderurgia e a fundição brasileira do século XIX não têm merecido lugar nas visões gerais da nossa história (SCHWARCZ; STARLING, 2015), a menos da presença da Fundição da Ponta de Areia na vida do Barão de Mauá, quase como um fato isolado (CALDEIRA, 1995). Essa situação não faz justiça à existência das dezenas de fundições que se espalharam pelo país na segunda metade do século XIX nem ao tamanho da atenção e investimento estatal na Fábrica de Ferro de Ipanema (FFI) ao longo daquele século. Poucos reconhecem a mudança da cozinha brasileira induzida pelas chapas de ferro para fogões a lenha, acompanhadas pelas panelas de fundo chato, produzidas pelo tenente Friedrich Varnhagen, diretor da Fábrica entre 1815 e 1821 (ESCHWEGE, 1833), ou o impacto das 200 moendas de ferro fundidas pelo Capitão João Bloem, diretor entre 1835 e 1842, na modernização dos engenhos de açúcar paulistas (BLOEM, 1842), ou o gusa e as barras de ferro laminado fornecidas pelo Coronel Joaquim Mursa, diretor entre 1862 e 1889, às ferrovias locais no final do século XIX (DUPRÉ, 1885). Os melhores livros de siderurgia da época estiveram disponíveis aos seus diretores desde seu início em 1810 (LANDGRAF; ARAÚJO, 2015). Qualquer projeto de musealização da Fábrica de Ferro de Ipanema deve considerar a necessidade de reconhecer ali a presença da

---

<sup>\*</sup> Doutor em Engenharia metalúrgica, professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Presidente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. landgraf@ipt.br

<sup>\*\*</sup> Historiador, doutorando do Instituto de Geociências, Unicamp. araujo.pem@gmail.com

<sup>\*\*\*</sup> Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Analista Ambiental do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio e Coordenador do Centro de Memória de Ipanema. lbregalado@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup> Mestre em Engenharia metalúrgica, técnico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. rafael.maia@usp.br

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Doutor em Engenharia metalúrgica, professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. c.azevedo@usp.br

revolução industrial no Brasil, tanto no domínio empírico das técnicas siderúrgicas quanto no conhecimento teórico da operação, do ponto de vista mecânico e químico quanto nas suas repercussões no projeto arquitetônico. As bem preservadas ruínas (Figura) criam ali quase um local de culto para os engenheiros metalurgistas que gostam de história. Os estudiosos da tecnologia, como o professor Nestor Goulart Reis, a consideram “o núcleo mais importante de desenvolvimento de tecnologia em São Paulo, antes das ferrovias” (REIS, 2010). Além disso, por ter sido um empreendimento estatal e, a partir de 1850, muito ligado às primeiras escolas de engenharia brasileiras, no Rio de Janeiro e em Ouro Preto, a Fábrica teve sua vida muito discutida, documentada e preservada em vários arquivos, ainda que nem toda a documentação tenha sido analisada. É, portanto, um prato cheio para as futuras gerações de historiadores. Há, entretanto, uma mancha em seu passado: a fama de ter sido um fracasso.



**Figura 1** - Altos fornos gêmeos da Fábrica de Ferro de Ipanema. **Foto:** Edgar Gomes, 2006

Sua história já foi objeto de dezenas de estudos acadêmicos, muitos deles tratando desse “fracasso”, quase sempre buscando razões da difícil viabilidade econômica na concorrência com os importados. A dificuldade logística da distribuição de seus produtos é uma explicação sempre citada, desde Beyer (1990), em 1813. Outras

interpretações foram perpetuadas pela repetição, como a inadequação do minério do morro Araçoiaba, cujo teor de titânio seria a causa técnica da inviabilidade (CALÓGERAS, 1904). O papel de Ipanema como Escola, ou para usar um conceito atual, como unidade de demonstração, ainda que tenha sido explicitado por seus diretores, não convenceu os sucessivos governos do Império a arcar regularmente com seus custos. Nem entusiasmou nossos empresários, apesar do mercado brasileiro de ferro em 1870 ser suficiente para dezenas de altos-fornos como os de Ipanema. Ainda assim, a Fábrica operou por mais de cem anos, trouxe da Europa pelo menos quatro levas de técnicos especializados, produziu milhares de toneladas de ferro gusa e deu origem a várias fundições, cujos produtos embelezam, ainda hoje, os gradis de muitos dos casarões preservados na cidade de São Paulo (LANDGRAF; ARAUJO; SCHOEDER, 2016).

Novos objetos de análise da história de Ipanema, como a história das técnicas e a análise microestrutural arqueológica de objetos ali originados, trarão novos dados para o debate. A partir desses, será possível propor diferentes alternativas para intervenções no conjunto arquitetônico da Fábrica de Ferro de Ipanema, visando uma experiência mais significativa do visitante ao local. A análise microestrutural de barras de ferro produzidas no forno estiriano de refino do ferro gusa (SEQUEDA-LEÓN, 2015) levou à investigação por escaneamento eletromagnético da área, hoje aterrada, em que ele esteve instalado (LANDGRAF, 2016).

Para dar um exemplo do quanto ainda temos por conhecer, o presente artigo registra, por primeira vez, o entendimento de que a estrutura cônica e cilíndrica que se vê no lado norte da plataforma dos fornos gêmeos de Ipanema (Figura) foi construída depois de 1895. Aquela estrutura foi construída provavelmente em 1919, durante a pouca conhecida última fase de produção de ferro em Ipanema, sob a direção do Capitão Mendes Teixeira (CORREIO PAULISTANO, 1919). Os textos sobre Ipanema sempre se referem à data de fechamento da Fábrica de Ferro como sendo de 1895, apesar de existir uma placa comemorativa de reinício das operações em 1917, sob os auspícios do governo Wenceslau Braz. A placa está exposta na entrada da Casa do Administrador, local de implantação do Centro de Memória de Ipanema.

### **A Preservação no Conjunto de Museus de *Ironbridge Gorge***

Uma referência importante nas estratégias de preservação e difusão da história industrial metalúrgica é o conjunto de dez museus em torno da primeira ponte de ferro feita no mundo, em 1779, na Inglaterra, local conhecido como *Ironbridge Gorge*. O conjunto tem um orçamento anual de 20 milhões de reais e recebe milhares de visitantes

por ano, celebrando o papel do ferro no nascimento da revolução industrial (HAYMAN; HORTON, 2009). Situada a uma hora de viagem da cidade de Birmingham, no centro da Inglaterra, a ponte sobre o rio Severn foi construída por iniciativa privada dos empresários locais, que contavam com o retorno do investimento dado pelo pagamento do pedágio das carruagens e carroças. Resistiu bravamente esses 240 anos, mas hoje só pode ser usada por pedestres. Erguida para ser um símbolo das muitas capacidades desse novo material, sua criação foi acompanhada de prospectos de divulgação distribuídos em várias cidades inglesas.

Uma caminhada de 500m leva o visitante ao *Museum of the Gorge*, onde a estrela é uma maquete (Figura) de 10m de comprimento por 2m de largura que descreve aproximadamente 2km do vale do rio Severn, em 1795, centrados na ponte de ferro. A garganta escavada pelo rio Severn nos últimos milênios expôs camadas de minério de ferro, de calcário e de carvão mineral, facilitando a vida dos empresários e dos trabalhadores. A maquete mostra altos fornos à beira rio e os planos inclinados pelos quais os mineiros traziam seus insumos.



**Figura 2** - Detalhe da maquete exibida no *Museum of the Gorge*, em *Ironbridge*, Inglaterra. **Foto:** Fernando J. G. Landgraf, 2014

A siderurgia inglesa expandiu-se baseada em inovações associadas ao carvão mineral, como fonte da energia térmica para bombear água de volta para a represa supridora da energia hidráulica das rodas d'água (DAWSON, 2012, p.62) que acionavam

os foles, os martelos de forjamento e os laminadores, e como redutor químico substituto do carvão vegetal no alto forno.

Em 1790, a Inglaterra, maior consumidor mundial, produzia 105.000t (toneladas) de ferro gusa e ainda importava cerca de 50.000t anuais de ferro em barra da Suécia, enquanto a França só produzia 45.000t e a Espanha 15.000t. Portugal nada produzia, importando umas 3.500t anuais (HILDEBRAND, 1957). É possível que houvesse “fornos de lupa” produzindo ferro por redução direta no Brasil, mas não há evidência objetiva disso. Naquele momento praticamente só a Inglaterra usava carvão mineral para produzir ferro, pois nos outros países predominava a disponibilidade de carvões de alto teor de enxofre, que tornavam o ferro frágil na temperatura de forjamento.

Em 1775, perto de *Ironbridge*, James Watt estava criando sua máquina a vapor, enquanto seu sócio financista Matthew Boulton a vendia com base no valor da redução de despesas com carvão que a nova máquina prometia (DAWSON, 2012, p.65).

Um trajeto de 3km ao longo de um afluente do Rio Severn leva o visitante até *Coalbrookdale*, onde a família Darby manteve seu negócio de fundição por 200 anos (HAYMAN; HORTON, 2009). Abraham Darby patenteou, em 1705, a fabricação de objetos de ferro fundido a partir de modelos de madeira aplicados em moldes de areia bi e tripartidos. Essa técnica permitiu a fabricação dos clássicos caldeirões de ferro, décadas depois seguidos pelas chapas de ferro fundido para fogões e painéis de ferro de base plana, que causaram uma revolução na cozinha do planeta.

O Museu de *Coalbrookdale* mostra maquetes do funcionamento de altos-fornos com foles acionados à roda d'água, além de uma infinidade de cadeiras, pórticos e grades feitas de ferro fundido, que inundaram o mundo no século XIX (LAWLEY, 1980). É possível reconhecer ali o estilo das grades de sacadas de janelas que podem ser vistas no Rio de Janeiro, em São Paulo, e em tantas cidades brasileiras, fruto de uma moda que marcou o Brasil entre 1860 e 1910 (SILVA, 1988; KÜHL, 1998; COSTA, 1994).

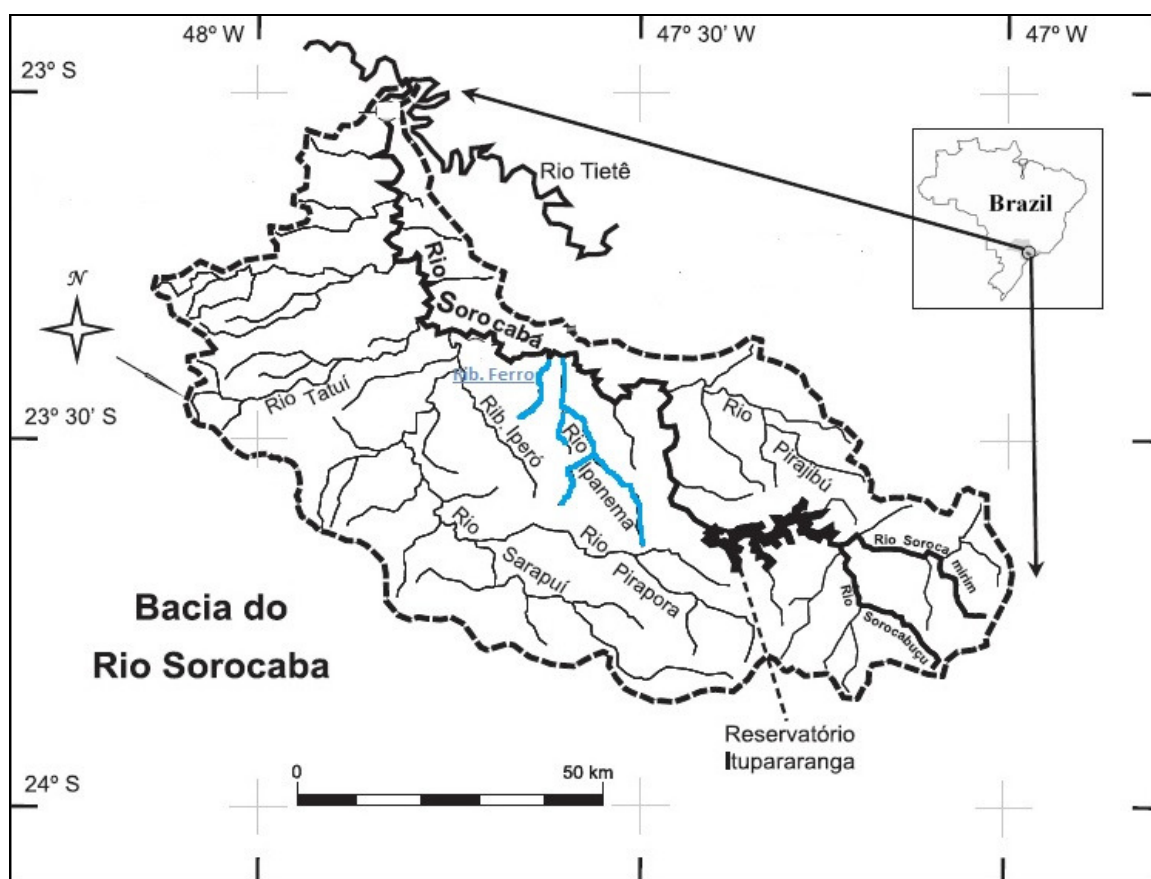
A visita a esse conjunto de museus em *Ironbridge* reforça o interesse em agregar mais informação aos remanescentes das construções existentes no terreno da Fábrica de Ferro de Ipanema, no vale do Rio Sorocaba, estado de São Paulo. A área dos altos fornos foi restaurada entre 2005 e 2006, financiada pela Usiminas, com o apoio da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM, conforme concepção de N&A Cultural (proponente e executora do restauro). Os remanescentes, tombados pelo IPHAN em 1964, estão em área da Unidade de Conservação Federal administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio/MMA. Uma



equipe local tem cuidado, ampliado e exposto parte do acervo de objetos ali produzidos entre 1810 e 1925.

### **Análise Microestrutural de Objetos Produzidos na Fábrica de Ferro de Ipanema**

Uma vertente interessante para identificar, documentar e reinterpretar a história da produção de ferro em Araçoiaba é a análise microestrutural de objetos ali produzidos. A arqueóloga Margarida Andreatta resgatou centenas de objetos de ferro, parte coletados num sítio arqueológico do vale do Ribeirão do Ferro, batizado em 1980 como Sítio Sardinha (SALAZAR, 1982; ZEQUINI, 2006), e parte coletados no entorno das construções da Fábrica de Ferro de Ipanema, às margens do Rio Ipanema. Os dois locais distam 3Km um do outro (Figura 3).



**Figura 3** - Localização do Ribeirão do Ferro e do Rio Ipanema na bacia do Rio Sorocaba (FERNANDES *et al.*, 2012)

⊕ acervo da Coleção Geológica do Museu Nacional, na Quinta da Boa Vista, Rio de Janeiro, inclui um conjunto de objetos referenciados à Ipanema, com data de entrada 1886 (RAMOS, 2014). Aquele conjunto abre a possibilidade de investigação de objetos

certamente produzidos pela FFI, com datação mais precisa. O Departamento de Geologia Econômica do Museu Nacional autorizou a retirada de fragmentos daqueles objetos para uso em análise microestrutural. Esse trabalho está em curso na Escola Politécnica da USP (SEQUEDA-LEON, 2015; MAMANI-CALCINA *et al.*, 2016), inserido no Projeto CNPq-edital Universal - Processo 444015/2014-0.

É interessante notar que a arqueóloga Anicleide Zequini já tinha informado da existência de outro conjunto de objetos de Ipanema, datados de 1890, na coleção do Museu Republicano de Itu. Os dois conjuntos de objetos são muito semelhantes. O conjunto de Itu poderá ser objeto de exame, no futuro.

Apesar de ali coletados, os objetos podem ter outra origem, produzidos em outros locais e para lá levados. A dissertação de mestrado de Rafael Maia identificou características microestruturais que permitiriam diferenciar objetos das duas origens (MAIA, 2014) e buscar explicações com base nas diferenças dos processos de fabricação: os objetos do sítio Sardinha devem ter sido produzidos por redução direta, enquanto os objetos de Ipanema devem ter sido produzidos por refino do ferro gusa. Além disso, a análise microestrutural permitiu afirmar que dois dos catorze objetos por ele analisados devem ter sido fabricados no século XX, em outros locais.

O trabalho de Maia encontrou dados, analisando objetos das coleções Andreatta (autorização dada no Projeto ICMBio FLONA Ipanema 20115-3 de 28 de abril de 2009), que sugeriram a existência de um marcador químico para o rastreamento de objetos produzidos em Ipanema: o teor de titânio nas inclusões de escória dos objetos de ferro batido. A presença desse elemento químico no minério do Araçoiaba e sua sobrevivência em peças de ferro batido oferecem a possibilidade de julgar se determinado objeto pode ter sido ali fabricado ou não. Alguns objetos de ferro fundido têm alguma identificação que os relaciona com a Fábrica, mas nem todos. A equipe deste projeto está em busca de alguma das 200 moendas de cana (BLOEM, 1841) vendidas em torno de 1840, ainda sem sucesso. Não se sabe se essas moendas tinham identificação do fabricante. Assim, a existência de algum indicador químico é de grande valia.

A presença de titânio no minério do Araçoiaba está suficientemente comprovada por análises químicas, ainda que falte uma investigação da variabilidade química das ocorrências de óxido de ferro naquela estrutura geológica. O minério de ferro contém magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e tem teor relativamente alto de titânio (3%), como mostra a Tabela .

**Tabela 1** - Análise Química (porcentagem em peso) do minério de ferro de Ipanema feita na Escola de Minas de Ouro Preto, conforme citado por Calógeras (1904) e análise recente por Guarino *et al.* (2012)

<b>Espécie mineral (%p/p) Fonte</b>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Calógeras	16	75	3,5	1,3	0,5	1,5	1,0	0,25
Guarino	-	80	2,5-3	-	2-2,5	-	5,0	0,1-3,0

As técnicas usadas para produzir barras de ferro forjado ao longo daqueles 330 anos, desde os fornos de lupa de Sardinha até o forno de pudlagem de Mursa, sempre resultavam no aprisionamento de uma fração volumétrica de mais de 1% de pequena quantidade de escória não metálica no interior da massa de ferro metálico. Esta escória é formada por óxidos de elementos químicos que devem estar associados a diversas fontes: o minério de ferro da região, as cinzas do carvão vegetal usado como combustível e reagente da transformação do óxido de ferro do minério em metal, outros minerais adicionados ao processo seguindo as receitas da época e a contaminação pelas pedras usadas na construção do forno. As inclusões de escória presentes numa barra de ferro permitem, portanto, a busca de uma associação com a região em que a barra foi produzida e, possivelmente, ao processo de fabricação usado. Essa é a hipótese de trabalho da linha de pesquisa e deste artigo: a possibilidade de encontrar um marcador químico que identifique objetos de Ipanema e capaz de diferenciar as inclusões de escória de objetos produzidos por técnicas de fabricação anteriores e posteriores à introdução do alto-forno como equipamento principal de redução do minério a metal em Ipanema.

O exame sistemático da microestrutura (que será descrita em seguida) de objetos associados a Ipanema foi iniciado com o mestrado de Rafael R. Maia (MAIA, 2014). Naquele trabalho foram analisados 14 objetos, ainda sem incluir objetos de 1886, só obtidos posteriormente.

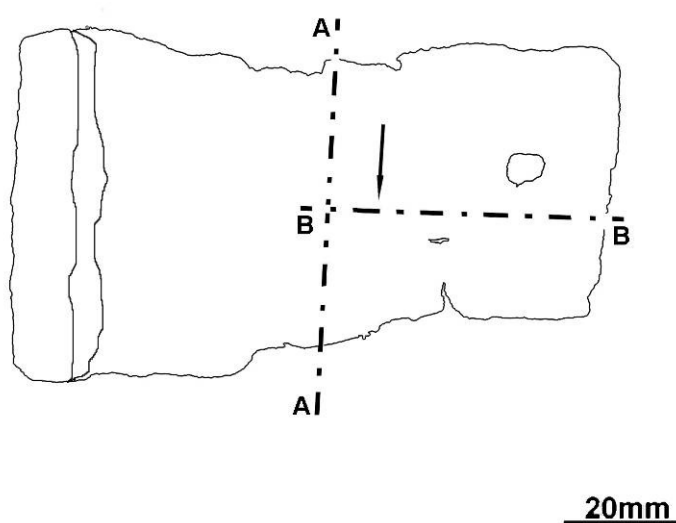
O exame microestrutural aplicado é “destrutivo”: exige que se corte uma fração da amostra, de preferência da ordem de 1cm<sup>3</sup> (um centímetro cúbico), mas pode ser menor. Uma superfície de corte é lixada e polida até ficar espelhada, tendo-se o cuidado de não arrancar as microscópicas partes não-metálicas que existem no interior do material. Essa superfície, quando observada em um microscópio eletrônico de varredura, pode ser submetida a procedimentos de análise química que determinam a composição química de regiões tão pequenas quanto um micrômetro cúbico.



A análise da microestrutura de uma dobradiça (retirada da coleção reunida pela professora Andreatta e por ela identificada pelo número 02-06) pode exemplificar o procedimento. A Figura 4 é uma fotografia da dobradiça, que passou a ser identificada pelo código PMT-84. A Figura 5 mostra um desenho da dobradiça e a identificação dos cortes feitos na dobradiça para obter uma superfície a ser polida. A dobradiça é uma peça plana, que deve ter sido laminada ou forjada até chegar nessa forma. É interessante examinar esse tipo de peça num corte que mostre as inclusões não metálicas no sentido de deformação da chapa. Por esse motivo foi escolhido o corte BB' mostrado na Figura 5.



**Figura 4** - Fotografia de dobradiça recolhida pela professora Andreatta na área da Fábrica de Ferro de Ipanema e por ela identificada como objeto 02-06. Esse objeto foi renomeado ao ser emprestado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP, passando a ter número PMT-84 (MAIA, 2014)



**Figura 5** - Desenho da dobradiça, amostra PMT-84, mostrando os cortes feitos no objeto. A superfície que foi polida é o corte BB' do desenho. A superfície polida atravessa a espessura da dobradiça (MAIA, 2014)

A Figura 6 mostra regiões escuras com um alinhamento horizontal (na Figura), imersos na matriz branca, que corresponde ao ferro metálico. As regiões escuras são as inclusões não-metálicas que resultam do aprisionamento de escória durante a operação de refino por forjamento que se aplicava no ferro, antes da segunda metade do século XIX. Nota-se que a distribuição espacial das inclusões é heterogênea. A fração volumétrica das inclusões não metálicas dessa peça foi determinada por método planimétrico e resultou em 7%. As propriedades mecânicas desse tipo de material são muito sensíveis à quantidade dessa “sujeira” (fração volumétrica de inclusões de escória) em seu interior. Essa característica é comum em objetos dessa época.

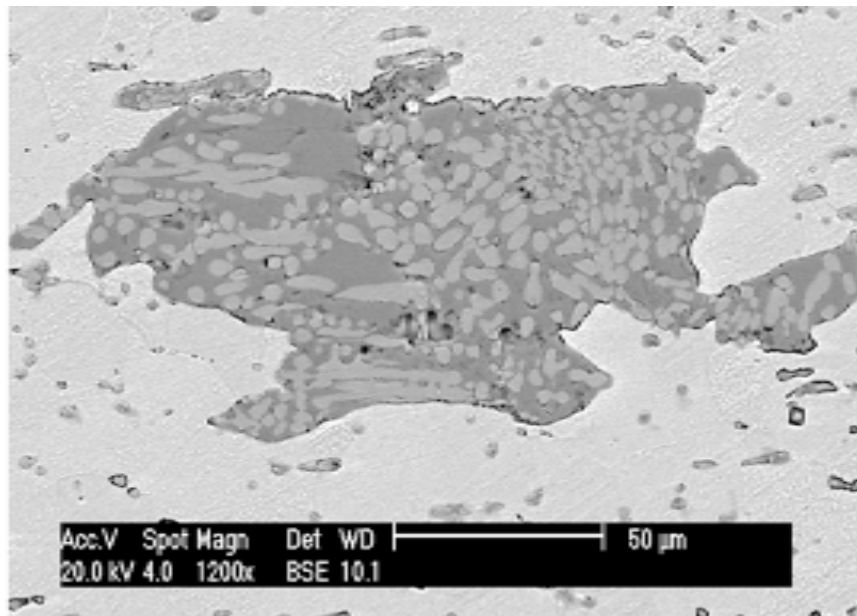


**Figura 6** - A superfície polida da amostra PMT-84 (dobradiça) mostra a presença de grande quantidade de inclusões não-metálicas, que são as partes pretas dessa foto. O fundo branco é a parte metálica, o ferro da dobradiça. Essa microestrutura é típica de materiais do início do século XIX. A fração volumétrica de inclusões foi estimada em 7% (MAIA, 2014)

A observação dessa microestrutura com maior aumento, como mostrado na Figura, permite notar a existência de dois tipos de inclusões: aquelas bem pequenas, quase esféricas, e as grandes, nas quais se vê dois tipos de evidência, ou duas “fases”, como os metalurgistas a elas se referem.

A inclusão grande é composta por uma matriz cinza escura, dentro da qual existem ilhas de tom cinza claro. A microanálise química feita no microscópio eletrônico de varredura revela que as ilhas com tom cinza mais claro contêm quase somente ferro e oxigênio, com pequenos teores de titânio e vanádio, enquanto a matriz, em tom cinza mais escuro, mostra a presença de muitos elementos, predominantemente oxigênio, ferro e silício, mas também alumínio, magnésio, cálcio e outros. Essa composição química é

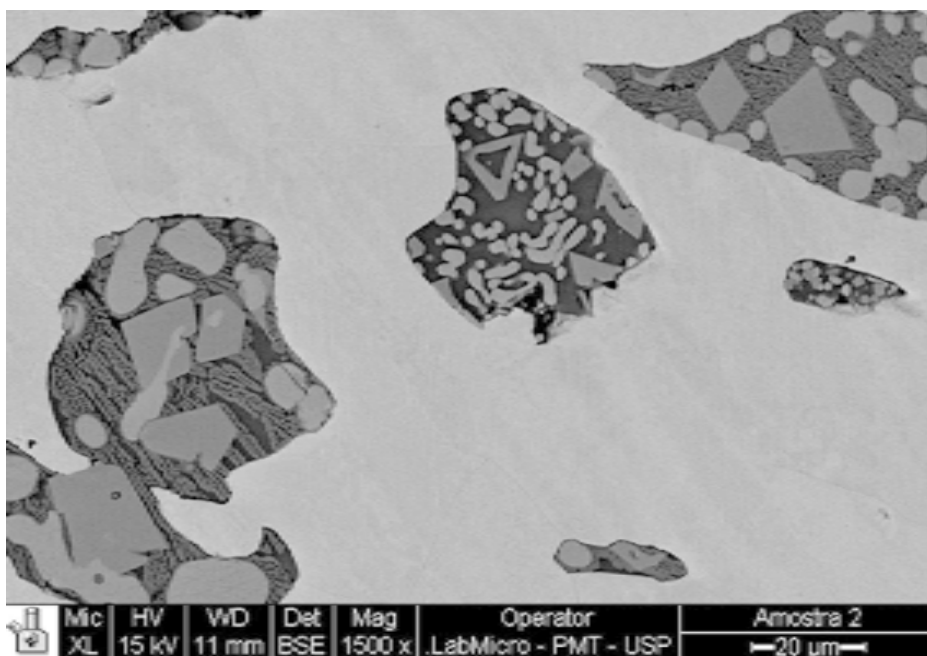
compatível com o que se espera de uma escória de um processo de redução e refino de ferro, parte vindo do minério, parte das cinzas do carvão, parte de fundentes adicionados para facilitar a retirada da escória e parte dos tijolos do forno. Os metalurgistas interpretam até uma sequência de solidificação dessas inclusões de escória: as ilhas são cristais de um tipo de óxido de ferro chamado de wustita ( $\text{FeO}$ ) e devem ser os primeiros componentes a se solidificar, crescendo no seio da escória líquida para eliminar o excesso de ferro que a escória pode conter ao se esfriar. Quando a temperatura cai abaixo de certo valor, que depende da composição da escória, a matriz solidifica-se ou pode até vitrificar-se. Em alguns casos essa solidificação final pode se dar com a formação de outros cristais.



**Figura 7** - Detalhe da superfície polida de um objeto de ferro coletado em Ipanema (amostra 84, referente a uma dobradiça). A superfície branca da foto retrata a matriz metálica, de ferro quase puro. Dispersos no fundo nota-se um grande número de pequenas esferas de óxidos e uma grande área de fundo cinza escuro dentro do qual existem ilhas de tom cinza claro. A análise química das ilhas de tom cinza claro indica predominância de ferro e oxigênio, enquanto que o fundo cinza escuro revela alto teor de oxigênio e pelo menos 10 outros elementos químicos, predominando ferro e silício (MAIA, 2014)

Dentre os 14 objetos analisados por Maia em seu mestrado, havia algumas peças que a coleção Andreatta identificava como sendo oriundas do chamado Sítio Sardinha. A Figura, relativa à amostra 01-04 da coleção Andreatta, reidentificada como PMT-106, mostra que as inclusões de escória ali presentes são muito diferentes. Pelo menos 4 fases são identificáveis nas inclusões, nas posições esquerda/inferior e direita/superior da fotografia: a fase mais clara do conjunto, correspondendo às ilhas de  $\text{FeO}$ , uma fase rendilhada, que a literatura identifica como  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , conhecida como faialita, a matriz

(a mais escura de todas as fases) e, por fim, uma fase poligonal, grande. Nessa fase poligonal da inclusão de escória foi identificado alto teor de titânio. É provável que seja o cristal chamado de ulvoespínélio ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ). O valor médio da composição química das inclusões mostrou um teor de aproximadamente 6% de titânio.



**Figura 8** - Inclusões de escória de objeto coletado pela Professora Andreatta no chamado “sítio Sardinha”, identificado como PMT-106. A fase poligonal no interior das inclusões de escória é rica em ferro e titânio, devendo ser o cristal ulvoespínélio,  $\text{Fe}_2\text{TiO}_3$  (MAIA, 2014)

É possível que o teor de titânio diferencie objetos de ferro forjado vindos do sítio Sardinha e do sítio Ipanema, apesar de usarem o mesmo minério, devido à diferença de processo de fabricação. No sítio Sardinha, que provavelmente operou no fim do século XVI (ZEQUINI, 2006), não existiu alto-forno, ou seja, ali ferro foi produzido por redução direta, sem passar pelo estado líquido. Em Ipanema foi construído e operado um alto forno, e o ferro batido foi produzido pelo refino de ferro gusa (ferro contendo 4% de carbono, o que baixa o ponto de fusão para  $1150^\circ\text{C}$ ) que passou pelo estado líquido, no interior dos altos-fornos (LANDGRAF; ARAÚJO, 2015). Neste segundo caso, o ferro gusa e a escória têm condições de separar-se fisicamente no estado líquido, no cadinho do forno, já que a densidade do ferro gusa é quase o dobro da densidade da escória e há tempo e condições físicas para a separação. Dadas as características termodinâmicas dos óxidos de titânio, é provável que grande parte do titânio fique na escória. No primeiro caso, como a transformação do minério de ferro em ferro metálico se dá no estado sólido, é mais difícil separar a escória formada no processo, mesmo que as gotas de escória

estejam no estado líquido, aumentando as chances de retenção de titânio nas inclusões de escória no interior do ferro batido.

Os resultados para alguns desses objetos já foram apresentados em artigo anterior (MAIA *et al.*, 2015), mas com abordagem diferente, na linha proposta pelos grupos de Dillmann (DILLMANN; L'HERITIER, 2007) e de Blakelock *et al.* (2009). A abordagem desses autores se baseia na hipótese de que as proporções entre os teores dos óxidos das inclusões possam ser características do local de sua proveniência e/ou processo de fabricação. A aplicação dessa abordagem aos objetos dos sítios Sardinha e Ipanema não permitiu identificar assinaturas químicas que claramente os diferenciasse.

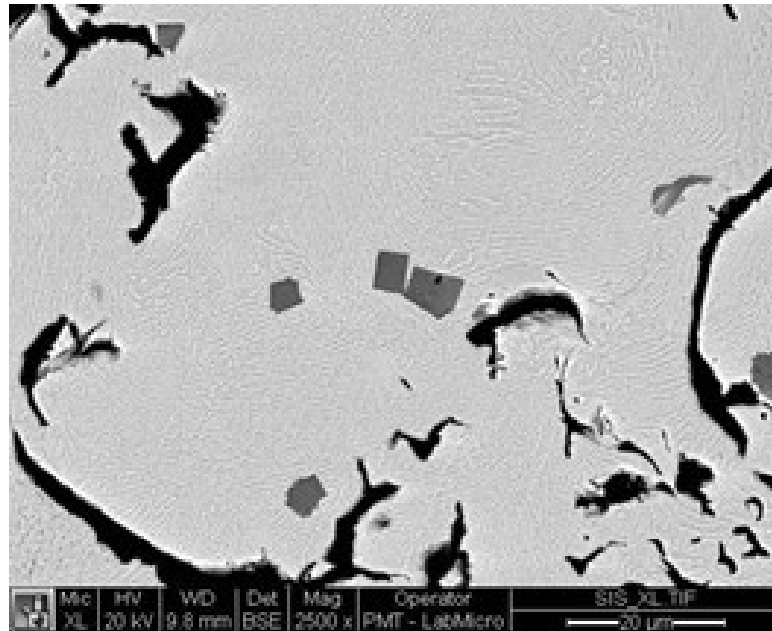
A análise química das inclusões de escória dos objetos da coleção do Museu Nacional oferece novas abordagens (MAMANI-CALCINA *et al.*, 2016), ainda a serem aprofundadas.

Adicionalmente, analisou-se uma amostra de ferro fundido cinzento, também proveniente do Museu Nacional. Na Figura 9, a micrografia mostra a matriz de ferro, os veios de grafita e inclusões de carbeto de titânio. A Figura 10 mostra o espectro de energia emitida pela inclusão, onde se nota a presença de picos de titânio e vanádio. Calógeras mencionou que as análises químicas do ferro gusa feitas pela Comissão Geológica de São Paulo e pela Escola de Minas de Ouro Preto indicavam teores de titânio de 0,43 a 0,60%, com carbono de 3%, silício de 1% e fósforo de 0,5%. (CALÓGERAS, 1904)

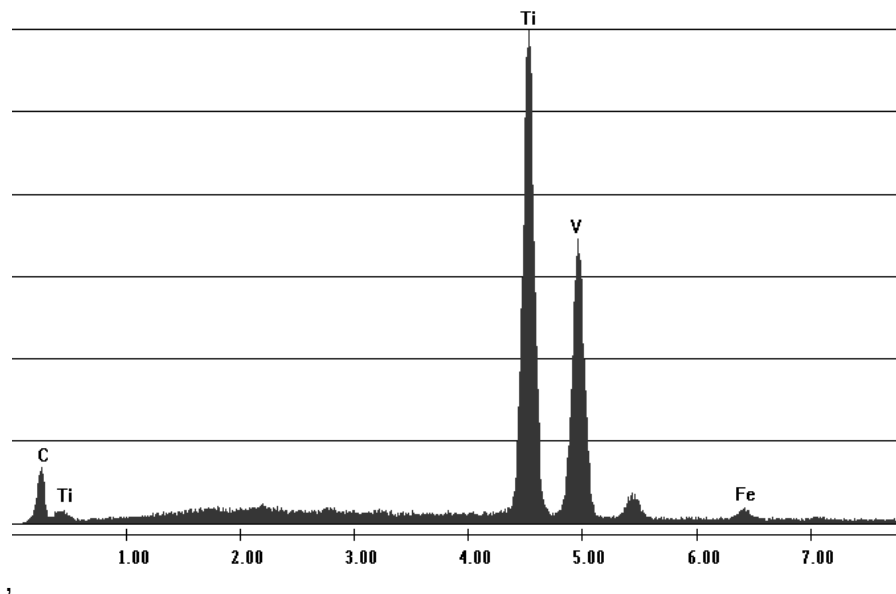
Essa evidência indica que se tem um possível marcador (o teor de titânio) para objetos de ferro fundido feitos com gusa de Ipanema. No século XIX, o avanço das técnicas de fundição permitiu uma grande redução de custo e peças de ferro fundido disseminaram-se pelo mundo e pelo Brasil. A Fábrica de Ipanema produziu peças fundidas desde o início da operação dos altos fornos, tendo como principais produtos grades, vasos, panelas, chapas de fogão a lenha e partes de moendas de cana (cilindros, engrenagens).

No Rio de Janeiro, a tradição de fundição é antiga, datando de antes da fundição do Barão de Mauá (a Fundição de Ponta de Areia operou pelo menos desde 1845, conforme Caldeira (1995). Alguns dos operários alemães contratados para trabalhar em Ipanema saíram da fábrica e montaram fundições em São Paulo (Georg Hund e Adolpho Sidow, por exemplo), enquanto outras fundições foram criadas em Campinas (Sampaio Peixoto, Bierrembach e Lidgerwood) e Rio Claro. Sabe-se que essas fundições importaram gusa para produzir suas peças. Havia também importação de peças prontas, especialmente como construções pré-fabricadas (o fornecedor mais conhecido é a

fundição escocesa *Saracen Foundry*, de MacFarlane, fabricante da estrutura da Estação da Luz, em São Paulo, e dezenas de outras construções no Brasil, conforme Costa (1994). Com base no indexador acima mencionado (o teor de titânio, com presença de carbeto de titânio na microestrutura) deve ser possível identificar se um dado objeto foi feito com gusa de Ipanema.



**Figura 9** - Microestrutura de ferro fundido cinzento da coleção Mursa. Notam-se veios irregulares de grafita, típicos dos ferros fundidos “cinzentos” e as inclusões poliédricas de carbeto de titânio (MAIA, 2014)



**Figura 10** - Espectrograma da microanálise EDS realizada na inclusão não metálica presente no ferro fundido (MAIA, 2014)



Um dos coautores do presente trabalho, Augusto C. Neiva, desenvolveu um equipamento semi-portátil de espectroscopia de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF, *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy*) para a análise elementar não-destrutiva de amostras de minério e gusa da Fábrica de Ferro de Ipanema, sem qualquer preparação superficial das amostras. O instrumento mostrou-se capaz de identificar a presença de titânio em amostras de Ipanema (NEIVA *et al.*, 2014) oferecendo-se como uma alternativa para o uso do marcador na identificação de origem de objetos.

Um teste para a aplicação da análise de titânio como marcador de objetos feitos com gusa de Ipanema poderá ser realizado no Rio de Janeiro. Existe na Avenida Marechal Câmara, centro da cidade, uma estátua do Conselheiro Buarque de Macedo, que foi fundida nas oficinas da Estrada de Ferro D. Pedro II. Uma notícia da Revista de Engenharia de 1883 afirma que a estátua, “com peso de 1300 kg, foi fundida de um só jato, com o ferro gusa nacional de Ipanema” (REVISTA DE ENGENHARIA, 1883).

## Referências

- BEYER, Gustavo. *Viagem ao Brasil no verão de 1813*. Campinas: Ed. PUC-Campinas, 1992. 51p.
- BLAKELOCK, Eleonore; MARTINÓN-TORRES, Marcos; VELDHUIJZEN Harald A; YOUNG Tim. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *Journal of Archaeological Science*, v.36, n.8, p.1745-1757, 2009.
- BLOEM, João. *Relação dos cilindros fundidos vendidos para engenhos de açúcar do tempo da administração do Sr. João Bloem, abril 1834-1841*. Fábrica de Ferro de São João de Ipanema, 22 de julho de 1841. Arquivo Público do Estado de S. Paulo.
- CALDEIRA, Jorge. *Mauá, Empresário do Império*. São Paulo: Ed. Companhia das Letras, 1995. 557p.
- CALÓGERAS, João Pandiá. *As Minas do Brasil e sua legislação*. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1904. Tomo II. 627p.
- CORREIO PAULISTANO, 6 de abril de 1919, p.3.
- COSTA, Cacilda Teixeira da. *O sonho e a técnica: Arquitetura de ferro no Brasil*. EDUSP, 1994. 198p.
- DAWSON, Frank. *John Wilkinson, King of the Ironmasters*. Gloucestershire: The History Press, 2012. 192p.
- DILLMANN, Philippe; L'HÉRITIER, Maxime. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, v.34, n.11, p.1810-1823, 2007.
- DUPRÉ, Leandro. Memória sobre a Fábrica de Ferro de São João de Ipanema. *Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto*, n.4, p.37-68, 1885.
- ESCHWEGE, Wilhelm Ludwig von. *Pluto brasiliensis*. Belo Horizonte/São Paulo: Itatiaia/Ed. USP, 1979.

FERNANDES, Alexandre Martins; NOLASCO, Murilo Basso; MORTATTI, Jefferson. Estimativa do escoamento superficial rápido e sua carga em suspensão com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos: bacia do Rio Sorocaba – SP. *Geociências*, São Paulo, v.29, n.1, p.49-57, 2010.

GUARINO, Vicenza; AZZONE, Rogerio Guitarri; BROTZU, Pietro; GOMES, Celso de Barros; MELLUSO, Leone; MORBIDELLI, Lucio; RUBERTI, Excelso Icon; TASSINARI, Colombo Celso Gaeta; BRILLI, Mauro. Magmatism and fenitization in the Cretaceous potassium-alkaline-carbonatitic complex of Ipanema São Paulo State, Brazil. *Mineralogy and Petrology*, Viena, v.104, p.43-61, 2012.

HAYMAN, Richard; HORTON, Wendy. *Ironbridge: history and guide*. The History Press, Stroud, 2009. 160p.

HILDEBRAND, Karl-Gustaf. *Fagerstabrukens historia*. Sexton-ochsjuttonhundratalen. Uppsala, 1957.

KÜHL, Beatriz Mugayar. *Arquitetura do ferro e arquitetura ferroviária em São Paulo*. Ateliê Editorial, 1998. 426p.

LANDGRAF, Fernando José Gomes; ARAÚJO, Paulo Eduardo Martins. A arquitetura do alto-forno e a biblioteca perdida de Ipanema: técnica e conhecimento no Brasil Joanino. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA, 14, 2014. Belo Horizonte. *Anais Eletrônicos...* 2015. Disponível em: <[http://www.14snhct.sbhct.org.br/conteudo/view?ID\\_CONTEUDO=800](http://www.14snhct.sbhct.org.br/conteudo/view?ID_CONTEUDO=800)>. Acesso em: 19 set. 2017.

LANDGRAF, Fernando José Gomes; Araújo, Paulo Eduardo Martins; SCHROEDER, R. Alemães em Ipanema. Ipanema e os alemães. Ipanema e os alemães. In: *Martius-Staden-Jahrbuch* 61, São Leopoldo: Oikos, 2016. p.164-177.

LAWLEY, Ian. Art and ornament in iron: design and the Coalbrookdale Company. In: *Design and Industry: The Effects of Industrialisation and Technical Change on Design, History of Design*. London: Ed. Hamilton and Newport (Design Council), 1980. p.18-21.

MAIA, Rafael R.. Análise de inclusões de escória em amostras metálicas da Fábrica de Ferro de Ipanema. 2014. 209p. *Dissertação* (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Orientador: Prof. Dr. Fernando J. G. Landgraf.

MAIA, Rafael R.; DIAS, Marcli Susaki; AZEVEDO, Cesar Roberto Faria; LANDGRAF, Fernando José Gomes. Archaeometry of ferrous artefacts from Luso-Brazilian archaeological sites near Ipanema River, Brazil. *REM: Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, v.68, n.2, p.187-193, 2015.

MAMANI-CALCINA, Elmer Antonio; LANDGRAF, Fernando José Gomes; AZEVEDO, Cesar Roberto de. Microanálise de inclusões não metálicas de artefatos ferrosos da Fábrica de Ferro de Ipanema visando estabelecer a assinatura do seu processo produtivo. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, 71, 2016, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2016. 10p.

NEIVA, Augusto Camara; PINTO, Herbert Prince Favero; LANDGRAF, Fernando José Gomes. Evaluating the presence of titanium in XIX-century Brazilian steels by energy-dispersive X-ray fluorescence. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 95, p.368-372, 2014.

RAMOS, Renato. Informação pessoal obtida durante o II Seminário sobre Preservação de Patrimônio Arqueológico, MAST, Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2014.

REIS, Nestor G. *Dois Séculos de Projetos em São Paulo - Grandes Obras e Urbanização - 1800-2000*. São Paulo: EDUSP, 2010.250p.

REVISTA DE ENGENHARIA, 1883, p. 349.

SALAZAR, Jose Monteiro. *Esconderijo do Sol: a história da Fazenda Ipanema, desde a primeira forja do Brasil até a Real Fábrica de Ferro*. Brasília: Ministério da Agricultura, Brasília, 1982. 132 p.

SEQUEDA LEÓN, Erica Maria. Caracterização metalográfica de barras de ferro da Fábrica de Ferro de Ipanema da coleção do Museu Nacional. *Monografia* (Graduação), Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP, 2015.

SCHWARCZ, Lilia Moritz; STARLING, Heloisa. *Brasil, uma Biografia*. São Paulo: Ed. Companhia das Letras, 2015. 792p.

SILVA, Geraldo Gomes da. *Arquitetura do ferro no Brasil*. Ed. Nobel, 1988. 248p.

ZEQUINI, Anicleide. Arqueologia de uma fábrica de ferro: Morro de Araçoiaba, Séculos XVI-XVIII. 2006. 223p. *Tese* (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Arqueologia, Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Orientador: Profa. Dra. Margarida Davina Andreatta.