

ARTIGOS - ARTICLES

**O refino estiriano na Fábrica de Ferro de Ipanema:
gestos engendrando cristais em 1885**

Fernando J. G. Landgraf
Prof. Titular Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais
POLI/USP
f.landgraf@usp.br

Paulo Eduardo Martins Araujo
Mestre em Ciências Sociais aplicadas à Educação
UNICAMP
araujo.pem@gmail.com

Resumo: A fabricação de barras de ferro maleável na Fábrica de Ferro de Ipanema é examinada com base na descrição do processo de refino do ferro-gusa feita pelo engenheiro Dupré, em 1884, e pela análise da microestrutura de alguns exemplares obtidos no Museu Nacional, no Rio de Janeiro, em 2014. Barras desse tipo foram utilizadas nas estradas de ferro do século 19. São contextualizados e explicados, a luz dos conhecimentos atuais, os gestos dos operadores do refino. As heterogeneidades microestruturais nelas observadas são similares às citadas na literatura sobre peças contemporâneas. Foi possível correlacionar a composição química do minério de ferro de Ipanema com a composição das inclusões de escória presentes naqueles objetos, parâmetro viável para estabelecer a “assinatura química” das barras lá fabricadas.

Palavras-chave: Fábrica de ferro de Ipanema; Refino; arqueometalurgia; assinatura química.

*Styrian refining at Ipanema Ironworks:
gestures engendering crystals in 1885*

Abstract: The production of wrought iron bars at Ipanema Ironworks is examined based on the description written by Dupré, in 1884, about the refining process used there, and by the microstructural analysis of samples obtained in the collections of Museu Nacional, in Rio de Janeiro, in 2014. Similar bars were used in the Brazilian railroads of the 19 Century. The microstructural inhomogeneities observed in those bars are similar to those described in the international literature about contemporary pieces. It is possible to correlate the chemical composition of the iron ore used at Ipanema to the composition of crystals found in the slag inclusions, becoming a viable parameter to establish a “chemical signature” of the bars there made.

Keywords: Ipanema Ironworks; Refining; archaeometallurgy, chemical signature.

Introdução

O ferro teve grande participação nas transformações da vida humana ao longo do século 19: as cidades, a arquitetura, os serviços domésticos, os transportes e a indústria foram construídas e equipadas com ferro fundido e ferro maleável. O consumo mundial de ferro passou de 1 milhão de toneladas, em 1800, para 30 milhões de toneladas em 1900. Construções carregadas de simbolismo refletiram as mudanças técnicas da época: A Grande Exposição de 1851, em Londres, teve como símbolo o Crystal Palace, feito de ferro fundido e vidro. A Exposição Universal de 1889, em Paris, teve como símbolo a Tour Eiffel, feita de ferro maleável puddado. Os gradis de ferro das sacadas, de ferro fundido ou de ferro maleável, caracterizam para o turista brasileiro a “antiguidade” dos núcleos históricos das nossas cidades, mesmo sendo, em geral, do século 19.

O ferro fundido atendeu importantes demandas, na primeira metade do século (LANDGRAF, CASTRO, REGALADO, 2021), mas o crescente consumo de ferro maleável exigiu revoluções técnicas na operação de refino que transformaram profundamente a siderurgia mundial. O Brasil participou dessas mudanças apenas como consumidor. Menos de 1% do ferro consumido no Brasil naquele século foi aqui produzido. Pequenas forjas produziam para o consumo circunvizinho, em Minas Gerais, e a Fábrica de Ferro de Ipanema atravessou o século claudicando em suas promessas de atender os arsenais e o mercado (SANTOS, 2013). Sua principal contribuição foi como uma fundição de peças para a indústria do açúcar no interior do estado de São Paulo, principalmente na primeira metade do século, mas também produziu barras de ferro maleável para as oficinas de manutenção das ferrovias da segunda metade daquele século.

Este artigo tem como um de seus objetivos descrever, à luz do conhecimento metalúrgico atual, as reações químicas envolvidas na complexa dança dos operadores da fabricação de barras de ferro maleável a partir do ferro fundido, ou seja, o trabalho do refino do ferro, uma das operações metalúrgicas mais importantes dentre as usadas na Fábrica de Ferro de Ipanema. Essa fábrica, a 100 km de São Paulo, foi o berço da siderurgia brasileira e operou, com interrupções, entre 1810 e 1926. Ao longo de sua vida, a Fábrica produziu milhares de toneladas de seus três tipos de produtos, lingotes de ferro-gusa para refusão, peças de ferro fundido e

barras de ferro maleável, refinado, para entrega a terceiros para posterior fabricação de objetos por forjamento. Durante toda sua existência, a Fábrica manteve equipes mistas, com mão-de-obra livre e número decrescente de escravos da nação e escravizados (RIBEIRO, 2016; OLIVEIRA, 2020), para conduzir operações de replantio de árvores, fabricação de carvão, mineração de ferro e de calcáreo, moagem do minério e calcinação do calcáreo, transporte das matérias primas até o alto-forno, operação do alto-forno, lingotamento, fabricação de modelos e moldes para fundição, fundição de peças, usinagem das peças fundidas e refino.

Em 1884, a fabricação do ferro maleável na oficina de refino incluía uma forja de refino dupla, cujo calor é utilizado para aquecer o ferro gusa a ser refinado e para aquecer, em um forno revérbero, o ferro que é espichado em dois martelos-pilões a vapor, num martinete de cauda movido a água e em um trem de laminação (DUPRÉ, 1885). Este artigo pretende apresentar as cuidadosas e precisas operações manuais envolvidas no processo, conforme foram descritas em artigo publicado em 1885 (DUPRÉ, 1885). Os enunciados técnicos desse tipo de documento contêm referenciais que hoje consideramos obsoletos, mas que só sua reinterpretação nos permitirá nos aproximar das culturas técnicas que os geraram (GARÇON, 2006). Essa oficina de refino foi implantada por mestres e ajudantes austríacos, contratados pelo diretor da Fábrica em 1873, tendo chegado em janeiro de 1874. Vários ficaram até 1890. A copiosa documentação disponível sobre Ipanema e a literatura internacional da época sobre as técnicas e a tecnologia utilizadas dão oportunidade para avançar na reconstrução (no conhecimento) das práticas da época.

Um segundo objetivo é apresentar os fundamentos da análise microestrutural de objetos de ferro maleável fabricados em Ipanema, buscando entender como as práticas da época afetavam a microestrutura e levando até a apresentação de hipóteses a serem investigadas na continuidade desta pesquisa.

Não é objeto deste trabalho entrar nas discussões sobre as causas dos fracassos comerciais de Ipanema, que tem sido muito bem discutidas em trabalhos recentes. Seus sucessos técnicos, retomados seguidas vezes ao longo do século, podem ser vistos em objetos nos acervos de vários museus brasileiros e em algumas obras a ela atribuídas. A engenharia de materiais pode contribuir na confirmação da procedência dos objetos de ferro, por meio da análise da composição química de

cristais presentes na microestrutura desses materiais, e da interpretação de como essa microestrutura é transformada durante o processo de fabricação.

A Fábrica de Ferro de Ipanema e sua Seção de Refino

Ipanema foi a única instalação metalúrgica brasileira a operar um alto-forno e produzir ferro-gusa, pelo menos até 1889 (ARAÚJO et al., 2017).

Esse processo permitia um volume de produção bem maior que os processos diretos de produção de ferro, usados em Minas Gerais ao longo do século 19 (LANDGRAF et al., 2021).

É importante apresentar de forma geral as transformações químicas e físicas que eram realizadas na Fábrica para transformar o minério nos vários produtos desejados. O processo usado em Ipanema, em linhas gerais, é o mesmo usado por 90% das siderúrgicas atuais. É chamado de “processo indireto”, pois tem duas etapas, uma chamada de redução e a outra de refino. A etapa de redução acontece no alto-forno e produz o chamado ferro-gusa. O ferro-gusa produzido, uma liga de ferro contendo carbono, silício e fósforo, é ideal para o uso em fundições, para fazer peças moldadas, mas é frágil e não tem boa resistência à tração. Para obter barras de ferro que sejam maleáveis e resistentes, é necessário eliminar aquelas três impurezas. Para isso opera-se o refino.

Passados 150 anos, nas siderúrgicas, a sequência é bem similar: na redução, colocar carvão, fluxantes e minério no topo do alto-forno, injetar ar por baixo para queimar o carvão, produzir o monóxido de carbono que reage com o minério, roubando seu oxigênio, e liberando o ferro metálico e escória. Nesse processo, o ferro absorve carbono, silício e fósforo, o ponto de fusão cai a 1150°C, forma-se o ferro-gusa. O ferro-gusa líquido é retirado do alto-forno e levado ao refino, onde um sopro de oxigênio queima as três impurezas, a temperatura sobe a 1600°C e resulta em ferro quase puro, líquido, com as impurezas formando uma escória sobrenadante. No século 19 o processo de refino era mais trabalhoso: deixava-se o ferro-gusa solidificar, para depois levá-lo a uma “forja de refino” para refundi-lo, soprar ar e jogar óxido de ferro para oxidar as impurezas. Ao eliminar as impurezas a tem-

peratura de fusão subia, mas a temperatura do forno não era tão alta, o ferro purificado solidificava e aprisionava as impurezas oxidadas na forma de uma escória. Essa escória, que à temperatura de 1200°C estava líquida, podia ser parcialmente espremida para fora da massa de ferro metálico, por martelamento a quente na forja.

Esse processo de refino era tão distinto que justifica um esforço, no âmbito da história da técnica, para compreendê-lo, especialmente por dispormos de algumas descrições e evidências: um artigo jornalístico¹ de 1886, um artigo científico (DUPRÉ, 1885) de 1884 e análises de objetos fabricados com essa técnica. O artigo de Dupré faz parte de um conjunto de artigos publicados na revista da Escola de Minas de Ouro Preto, cada um abordando a fabricação de ferro de uma região brasileira, com certeza refletindo um programa de estudos daquela Escola.

Como esse processo era descrito, na década de 1880? Uma visão jornalística, anônima, relata a visita que Pedro II fez à Fábrica de Ferro de Ipanema, nos dias 8 e 9 de novembro de 1886. Era a quarta vez que Pedro II a visitava. Desta vez ele veio de São Paulo pela Estrada de Ferro Sorocabana até a Estação Ipanema, para conhecer várias novas instalações da Fábrica, que comemorava 75 anos de operação quase contínua. A visita foi relatada pela Revista de Engenharia² na edição de dezembro de 1886. A reportagem descreve os dois dias de visitas, com passeios até o alto do pico do Araçoiaba e às instalações da Fábrica, concluídos por uma discussão, após o jantar do dia 9, sobre as possíveis origens geológicas do minério de ferro do Araçoiaba, na qual participaram o Imperador, o geólogo americano Orville Derby e o engenheiro Theodoro Sampaio, da Comissão Geológica do Império, acompanhados pelo geólogo Silva Coutinho e pelo diretor da fábrica, Coronel Mursa.

Um trecho da matéria da Revista de Engenharia descreve as principais instalações da Fábrica, inclusive o refino:

O Imperador começou a visita pelo novo forno alto em construção; em seguida foi à antiga oficina de fundição, onde teve ocasião de ver correr o ferro; assistiu à fundição de rodas para a Estrada de Ferro de Baturité; examinou as oficinas de modelação e

¹ Autor desconhecido. Excursão Imperial. Revista de Engenharia, p. 295.1886.

² A Revista de Engenharia foi editada no Rio de Janeiro, entre 1879 e 1891.

de máquinas, vendo funcionar os tornos e máquinas de aplainar ... Depois ..., seguiu ..., acompanhado pelo Sr Ministro da Agricultura³ e mais pessoas da comitiva para as novas oficinas de refino de ferro, que acabam de ser inauguradas.⁴

As novas oficinas de refino foram construídas entre 1881 e 1886. Sua localização está mostrada em planta apresentada na Figura 1, com a legenda de “26: novas oficinas”. É possível identificá-la como a nova oficina de refino, uma vez que inclui, em seu interior, o desenho de um forno estiriano de refino, que será detalhado mais a frente.

Em outubro de 1886 a fábrica tinha 184 empregados, sendo 45 com funções técnicas e 139 ajudantes. Na vila de Ipanema viviam 531 indivíduos, sendo 208 homens, 125 mulheres e 194 crianças. Esse conjunto incluía 399 brasileiros e 132 estrangeiros: 93 italianos, 6 alemães, 14 austríacos, 3 franceses, 10 portugueses, 2 orientais, 1 espanhol e 3 africanos. Já não havia escravos.⁵

³ A Fábrica fez parte do Ministério da Agricultura, entre 1878 e 1892. Antes e depois esteve ligada ao Ministério da Guerra. O ministro em 1886 era Antonio Prado, grande produtor paulista de café.

⁴ Autor desconhecido. Excursão Imperial. Revista de Engenharia, p. 295. 1886.

⁵ Relatório apresentado à Assembleia Geral Legislativa pelo Ministro da Agricultura, 1886. Os relatórios do Ministério da Agricultura aqui citados foram acessados em <http://dds-next.crl.edu/titles/108/items>

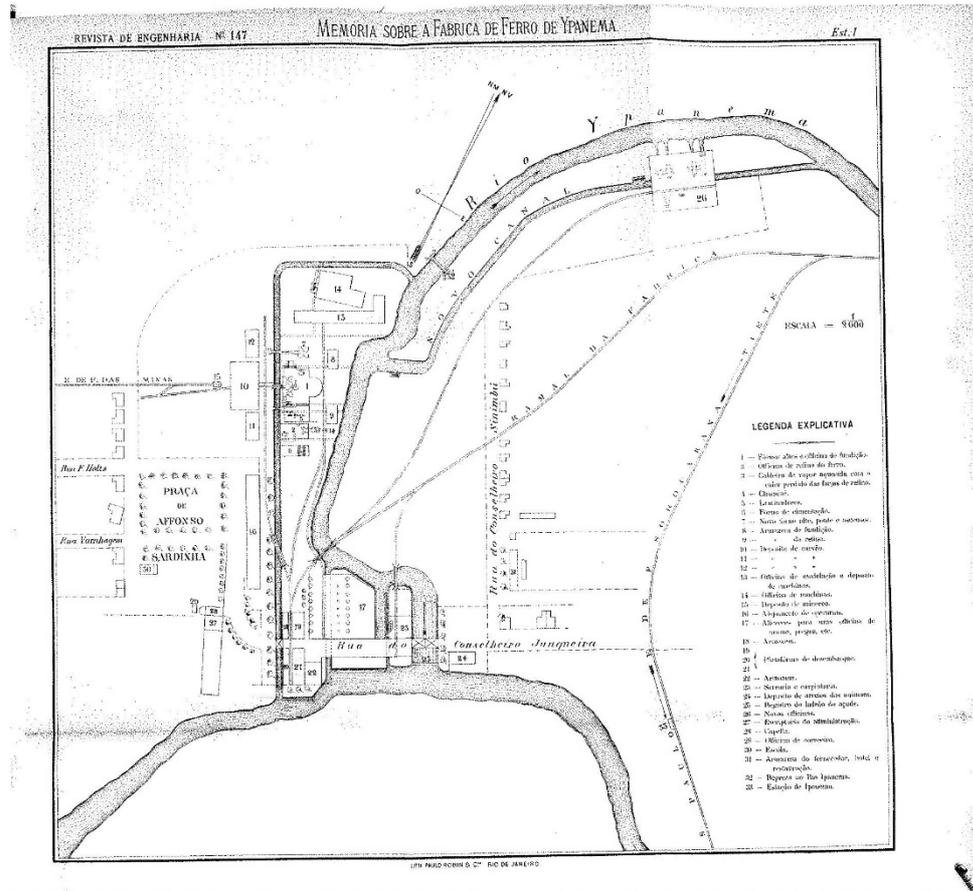


Figura 1 Mapa da Fábrica de Ferro de Ipanema em 1884. (DUPRÉ, 1885, Estampa 1).

Enquanto em 1877, a companhia produzira 210 toneladas de ferro em gusa, 101 toneladas de ferro moldado para engenhos de açúcar, despoldadores de café, ventiladores e, 20,5 toneladas de ferro em barras⁶, em 1886 a Fábrica produziu 530 toneladas de ferro-gusa e 130 toneladas de peças fundidas e em 1887 alcançou 294 toneladas de ferro maleável⁷. Este último número parece exagerado, em função de todos os outros dados de produção anual de ferro em barras.

Uma das oficinas de refino pode ser vista na Figura 2 e na Figura 3. A primeira é um recorte de um panorama feito pelo fotógrafo Julio Durski, em 1885. A

⁶ Relatório apresentado à Assembleia Geral Legislativa pelo Ministro da Agricultura, 1878, p. 244-6.

⁷ Relatório apresentado à Assembleia Geral Legislativa pelo Ministro da Agricultura, 1887.

segunda é um recorte da planta geral da Fábrica, apresentado no artigo do engenheiro Dupré (DUPRÉ, 1885), mostrando exatamente os prédios da foto. Destacam-se os prédios do refino, da caldeira e a chaminé do refino. A figura mostra o laminador (5), ao lado do prédio do refino (2), onde se vê a dupla forja, acoplada à caldeira e à chaminé. Hoje o que resta desse complexo são os três altos-fornos e dois prédios auxiliares. Valerá a pena investigar se, sob o atual gramado, existem as bases dos equipamentos de refino, caldeira e chaminé. Por outro lado, o prédio da “nova oficina de refino”, mencionado na Figura 1, está em pé, ainda que bastante alterado em seu interior.



Figura 2 Detalhe de fotografia da Fábrica, feita por Julio Durski. Comparando com a planta ao lado, o prédio da cementação está muito maior na foto. Data da foto geralmente citada é 1885.

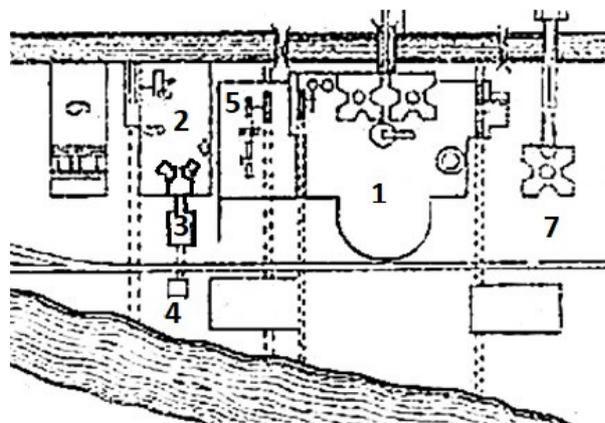


Figura 3 Planta da Fábrica publicada por Leandro Dupré, em 1885. (1) Altos-fornos e oficina de fundição; (2) Refino; (3) caldeira; (4) chaminé; (5) laminador; (6) cementação; (7) novo alto-forno.

Continuando a reportagem de 1886:

O vento para as forjas de refino é fornecido por um novo ventilador de Hoppe, de Frankfurt. É tocado por uma máquina a vapor de 12 cavalos. O laminador é movido por uma roda hidráulica. Fizeram-se diversas experiências com ferro de Ipanema e ferro inglês, e Sua Majestade teve ocasião de ver a excelência do produto da fábrica.⁸

O ventilador de Hoppe, movido a vapor, é tipo de soprador de ar, de dois eixos (VON JHERING, 1903). É uma inovação que substitui os foles movidos a roda d'água. O sopro de ar é importante para queimar o carvão e aquecer o forno e, além disso, para criar uma atmosfera que oxide o carbono do ferro-gusa. O vapor era gerado na caldeira (número 3 na Figura 3) que era aquecida pela saída de gases quentes do forno de refino. A comparação do ferro de Ipanema com o ferro inglês, mencionada acima, já tinha sido objeto de exame e relato pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro⁹ três anos antes, em 1883, e reproduzida na imprensa da época. O relatório¹⁰ diz que a empresa ofereceu ao Governo Geral uma redução de 10% no preço do frete dos produtos que saíssem da Fábrica de Ferro, em relação ao preço de produtos similares de outras procedências e decidiu dar preferência aos produtos de Ipanema. Ao comparar as propriedades mecânicas do ferro de Ipanema com “ferro inglês”, conclui que o ferro inglês tinha maior resistência mecânica, mas o ferro de Ipanema tinha maior ductilidade (infelizmente sem citar números). As duas propriedades eram importantes para as aplicações da época, havendo aquelas em que a maior ductilidade do ferro de Ipanema era uma vantagem. O relatório também afirma que o ferro de Ipanema é de qualidade tão boa quanto ao ferro da Suécia e da Rússia, ou seja, similar aos produzidos em países que usavam, como Ipanema, carvão vegetal como agente transformador do minério em metal. Para ser mais amplamente usado, entretanto, o relatório recomendou que Ipanema

⁸ Autor desconhecido. Excursão Imperial. *Revista de Engenharia*, p. 295.1886

⁹ Relatório da Directoria da Companhia Paulista para a sessão da assembleia geral de 26 de agosto de 1883. Documento disponível na biblioteca do Museu da Cia Paulista, em Jundiá.

¹⁰ O relatório sobre o ferro de Ipanema está inserido no Relatório da Directoria da Companhia Paulista de 1883. Beatriz Kühl chamou atenção para esse relatório em seu livro *Arquitetura do Ferro*, 1998. O Inspetor Geral da Companhia era Walter Hammond, o engenheiro chefe interino era José Pereira Rebouças e o presidente do conselho da empresa era Fidêncio Nepomuceno Prates.

fizesse ferro mais duro e com preço menor, pois custava 33% mais caro que o ferro inglês.

Poucos dias após a edição do relatório acima, a Revista de Engenharia republicou o trecho do Relatório referente à comparação do ferro de Ipanema com o ferro inglês quase na íntegra, acrescido de uma explicação do Coronel Mursa sobre a questão do preço do ferro:

suponho que no Brasil ninguém tem a pretensão de produzir ferro mais barato do que se fabrica e vende na Inglaterra o ferro comum. Outros países onde a indústria metalúrgica é poderosa não o podem fazer. Apesar disso, o ferro de Ipanema é vendido a 180.000 reis a tonelada, enquanto o melhor ferro inglês custa, na Inglaterra 132.000 reis a tonelada, chegando a custar, no Brasil, 230.000 réis a tonelada (MURSA, 1883).

A reportagem da visita de Pedro II em 1886 não afirma, mas é bem possível que o diretor da Fábrica tenha aproveitado a visita e feito a entrega ao Imperador de um conjunto de objetos que deram entrada na Coleção de Geologia Econômica do Museu Nacional naquele mesmo ano de 1886: uma caixa contendo exemplares dos vários produtos metálicos produzidos em Ipanema: lingotes de ferro-gusa¹¹ tipo cinzento (tipo de matéria prima usada pelas florescentes fundições de ferro paulistas e cariocas, pelas oficinas das estradas de ferro e pelo Arsenal da Marinha, no Rio de Janeiro) e barras de ferro laminado, de secção redonda, quadrada e retangular, usadas pelas oficinas das estradas de ferro e serralherias. Não bastasse isso, para nossa sorte, a caixa guardava subprodutos como a escória do alto-forno e a escória do refino, mais algumas das matérias-primas usadas no processo -- minério de ferro, refratário e ferro-gusa tipo branco, usado para produzir barras laminadas.

¹¹ Ferro-gusa é o nome dado ao ferro contendo 4% de carbono que é o produto da transformação do minério de ferro em ferro metálico, no alto-forno. É um material de “baixo” ponto de fusão (1200° C) e é frágil. Usado para fazer produtos de “ferro fundido” ou, após o refino que lhe retira todo o carbono, “ferro maleável”. Os dois tipos de gusa, branco e cinzento, referem-se à cor da fratura do ferro, associada a forma como o carbono ocorre na microestrutura: quando o carbono forma veios de grafita, a fratura fica cinzenta. Quando o carbono se combina com ferro e forma placas de carboneto de ferro, a fratura fica brilhante, “branca”.



Figura 4 Dois dos objetos da Coleção do Museu Nacional. As duas barras mostram que foram dobradas a 180 graus e não romperam totalmente. Acompanha legenda da Coleção do Museu Nacional. Imagem de Augusto Camara Neiva.

Os objetos de ferro laminado da coleção não são apenas segmentos de barras de vários tamanhos, mas sim o que hoje chamamos de “corpos de prova”, são objetos que foram submetidos a um ensaio, um teste de avaliação de qualidade, em relação à ductilidade do material, que hoje chamaríamos de teste de dobramento a 180 graus, com entalhe, como mostra a Figura 1. Todas as barras ali presentes sofreram um entalhe, depois foram dobradas a 180 graus e não se romperam totalmente, ou seja, demonstraram grande ductilidade. Além disso, as fraturas demonstram-se fibrosas, o que era considerado um aspecto positivo da qualidade do material.

O conjunto de objetos é muito semelhante a um outro, que hoje faz parte do acervo do Museu Republicano de Itu, só que todos acondicionados numa caixa de madeira, com menção a sua doação ao Presidente do Estado de São Paulo Prudente de Moraes, em 1890, e com identificação original das amostras na caixa. É provável que os objetos do Museu Nacional originalmente tenham estado em caixa semelhante, posteriormente deteriorada, e foram trasladados para as atuais caixas de papelão onde estão. A referência existente na tampa da caixa de Itu é “ferro maleável, fibroso e granulado”.



Figura 5 Caixa em madeira contendo amostras de pedras e metais de Ipanema. Coleção Prudente de Moraes. Acervo Museu Republicano "Convenção de Itu" / Museu Paulista / USP

Em dezembro de 2014, o Museu Nacional autorizou a retirada de fragmentos, por corte, de objetos da sua coleção. Desde então, essas amostras foram objeto de estudo do Grupo de Arqueometalurgia da Escola Politécnica da USP, resultando em duas dissertações de mestrado (MAMANI-CALCINA, 2016; MAIA, 2014), trabalhos de conclusão de curso (SEQUEDA, 2015; BERTIN, 2017), e artigos (MAIA, DIAS, LANDGRAF, 2015; MAMANI-CALCINA, LANDGRAF, AZEVEDO, 2016). Neste artigo, discutiremos as microestruturas de alguns desses fragmentos e a relação com suas propriedades mecânicas. As barras de ferro maleável, constantes das caixas, são produtos da Oficina de Refino da fábrica.

Três questões de nomenclatura: ferro, forja e caldear

Para facilitar o entendimento da discussão que vem a seguir, é interessante esclarecer as mudanças de significado de algumas palavras técnicas. Um bom exemplo é a palavra aço. Hoje em dia chamamos de aço qualquer liga metálica cuja composição contenha mais de, digamos, 80% de ferro, independentemente do teor de carbono. Entretanto, não foi sempre assim. O material hoje conhecido como “aço de baixo carbono” seria chamado de “ferro” em 1880. Essa expressão sobrevive hoje no chamado “ferro de construção”. Aço, até aquele momento, era a palavra usada para ligas de ferro com mais de 0,3% de carbono que fossem capazes de serem endurecidas por aquecimento seguido de resfriamento rápido, operação que se chamava “dar têmpera” ao aço. A maior parte da produção mundial atual de aço (que é de mais de um bilhão de toneladas por ano) seria chamada de ferro, e não aço, em 1880. A grande mudança ocorreu entre 1860 e 1890, quando houve uma revolução na etapa de refino do ferro, ou do aço. Antes disso, o refino produzia um material com carbono menor que 0,2%, chamado de ferro batido, enquanto o aço era obtido por meio da carbonetação do ferro sólido numa operação chamada de cementação. Depois de 1860 o refino pôde produzir ferro com teor de carbono controlado entre 0,1 e 1%, ou seja, poderia produzir aço diretamente, no estado líquido, sem precisar da posterior carbonetação. Essa mudança de significado é mundial, e não apenas na língua portuguesa. As siderúrgicas, que produziam muito ferro batido (wrought iron, fer, stabeisen, em inglês, francês e alemão), passaram a produzir principalmente aço (steel, acier, stahl).

Outras duas palavras têm mais de um sentido e com isso confundem a leitura, as palavras “forja” e “caldear”. Hoje entendemos o substantivo “forja” ou como o estabelecimento onde são conformados objetos metálicos ou como o conjunto dos instrumentos de trabalho do ferreiro (fornalha, bigorna, fole, martelo, etc)¹². No século 19, chamava-se de forja à fornalha, o local onde o ferro-gusa era refinado e o ferro era reaquecido, antes do martelamento.

¹² <https://www.dicio.com.br/houaiss/>

O verbo “caldear” é hoje compreendido principalmente como a operação de “soldar ou ligar peças ou pedaços de metal aquecido, prensando-os ou martelando-os juntos na bigorna”. Entretanto, os documentos daquela época também usam o verbo no seu outro significado que é “tornar incandescente ou maleável, fazer ficar em brasa”, ou seja, caldear queria dizer aquecer.

Comentários do engenheiro Carlos Conrado Niemeyer sobre Ipanema, em 1878.

Em novembro de 1877 a Fábrica de Ferro de Ipanema passou a ser administrada com recursos do Ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas, órgão que já administrava as ferrovias públicas. No final de 1878, o ministro instruiu o engenheiro Niemeyer, formado pela Escola Central do Rio de Janeiro em 1867 e naquele momento responsável pelas oficinas da Estrada de Ferro D. Pedro II, para investigar se havia conveniência em aumentar o investimento na Fábrica. O relatório do engenheiro tem 24 páginas e descreve as condições e necessidades das seções de altos fornos, refino e máquinas. Assume que a fábrica está montada para produzir 900 toneladas de ferro gusa e 150 toneladas de ferro batido e discute em detalhe vários aspectos econômicos que estão fora do escopo deste trabalho. Alguns trechos selecionados destacam aspectos técnicos do refino:

O refino é feito em uma forja coberta, segundo o sistema alemão e com o emprego do carvão vegetal. As lupas de 50 a 75 quilogramas são espichadas em um martelo de cauda, tocado por uma roda hidráulica da força de 12 cavalos. A produção da forja do refino é de 500 quilogramas em 24 horas.

...

Assim, apesar da pequena diferença que existe em seu preço no Rio de Janeiro para os ferros similares da Suécia e de Yorkshire, não podem as barras de Ipanema sustentarem com vantagem a concorrência, atendendo a que a sua fabricação ainda não conseguiu, economicamente, toda a perfeição desejável e que supponho difícil realizar no atual martelo de cauda da fábrica, empregado para o espichamento das lupas.

...

Na oficina do refino, os melhoramentos a introduzir fundam-se no aumento da sua produção e redução no consumo do combustível. Propomos para este fim, a exemplo do que se faz na Styria e em substituição à forja atual a construção de duas forjas cobertas combinadas com um forno de pudelar que operará o refino do ferro pelos gases das duas forjas os quais serão depois aproveitados para o aquecimento de uma caldeira especial que alimentará o serviço de um martelo a vapor de 1,5 tonelada.

...

A caldeira e o martelo a vapor, assim como um pequeno laminador que convém montar com urgência, já existem na fábrica.

...

Do que temos exposto e dos algarismos que determinamos resulta que a fábrica de Ypanema pode desenvolver-se vantajosamente e merece, portanto, toda a atenção do Governo (NIEMEYER, 1878).

O relatório se expande na discussão de planos mais ousados para o refino, com a introdução de refino Bessemer e Siemens, que também vão além do que pode ser aqui discutido. Interessa o comentário de que nem o refino estiriano nem o martelo a vapor estavam implantados naquele momento, apesar dos técnicos austríacos lá estarem há cinco anos. O apoio do ministério da Guerra vinha minguando rapidamente, a ponto de o jornal Correio Paulistano relatar, em dezembro de 1876, que os empregados da Fábrica não recebiam salário há 10 meses. O relatório de Niemeyer convenceu o ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas a propor a duplicação do orçamento da Fábrica e a convencer a Assembleia a aprovar a proposta, como Santos descreveu em detalhe (SANTOS, 2013).

A descrição do Refino pelo engenheiro Leandro Dupré, em 1884.

Dispomos de uma apresentação detalhada da operação de refino que transformava ferro-gusa em ferro maleável, na visão de um engenheiro de minas, formado pela primeira turma da Escola de Minas de Ouro Preto, em 1878, e que foi

contratado para apoiar o diretor: o engenheiro Leandro Dupré¹³. Ele publicou, em 1885, um artigo (DUPRÉ, 1885) descrevendo todo o processo de fabricação.

Quando queremos entender o que está escrito num documento como esse, buscamos traduzir aquelas descrições para o vocabulário técnico-científico atual, reconstruir, conceitualmente, o processo segundo nossa compreensão dos fenômenos e por fim imaginar como esse processo gerou as microestruturas que identificamos nos objetos investigados.

Queremos nos deter apenas na etapa de refino, pois tanto o teor de carbono do ferro que estamos analisando experimentalmente nos objetos do Museu Nacional quanto a microestrutura da escória contida em seu interior foram constituídos nessa etapa. As poças de escória semissólida solidificam-se ao longo desse processo e regiões metálicas com pequenas variações do teor de carbono são reorganizadas pelo martelamento, como será mostrado mais à frente. Nossa observação experimental, portanto, deve estar relacionada com as subetapas descritas por Dupré em três páginas, com figura mostrando planta e elevação do forno de refino. É sobre essa etapa que Dupré cita duas referências bibliográficas importantes para especificar mais exatamente o tipo de refino lá utilizado e menciona as duas gerações tecnológicas seguintes (pudlagem e Bessemer), que ainda não eram usadas industrialmente em Ipanema. A pudlagem era usada raramente, por dificuldade operacional (“*É um trabalho penoso num clima quente*”) e a segunda é um dos sonhos não realizados do diretor da fábrica, Coronel Mursa.

O texto de Dupré abre o capítulo “O refino” com as seguintes frases:

O processo empregado em Ipanema para a transformação do ferro fundido em ferro maleável é o mesmo usado em Leoben, na Alta Styria, para aqui importado pelos operários refinadores contratados nessa parte da Áustria. Esse processo difere sensivelmente em alguns pontos daquele descrito por Karsten em seu tratado de metalurgia, sob a denominação de processo styriano. A forja atual de Ipanema (estampa VII figuras 1 e 2) é semelhante

¹³ O engenheiro Dupré foi contratado em Ipanema a pedido do então diretor da Escola de Minas de Ouro Preto, Prof. Gorceix, pois os engenheiros de minas não estavam encontrando colocações profissionais ligadas à suas competências.

a uma que trabalha em Reich(e)nau e de que fala P. Tunner em seu livro (DUPRÉ, 1885).

Os operários austríacos que o autor menciona foram trazidos para Ipanema, contratados em 1873, na viagem em que o diretor Mursa comprou vários equipamentos para a Fábrica, com recursos obtidos com o ministério Rio Branco (1871-1875). Mursa descreveu as dificuldades que teve na busca de operários nas regiões de metalurgia a carvão vegetal na Alemanha e na Suécia, devido a uma atitude crítica à imigração para o Brasil naquele momento (MURSA, 1874). Somente na Áustria, graças ao apoio do embaixador Francisco Varnhagen e à sua visita a Leoben, conseguiu contratar os 13 técnicos que desejava, liderados pelo mestre de refino Jorge Katzer. Havia uma expectativa de que esse novo grupo, experiente em refino, fosse capaz de vencer o desafio de produzir um bom ferro maleável, segmento em que a produção de Ipanema já fora criticada no passado.

A Estíria era uma região rica em minério de ferro e florestas, com muitas fábricas de ferro, sede de uma escola de minas desde 1840. A literatura técnica do século 19 inclui o processo estiriano dentre as dezenas de métodos de refino, que tinham pequenas diferenças, cuidadosamente mantidas por seus praticantes. Eschwege, por exemplo, cita 13 métodos diferentes (ESCHWEGE, 1812), cada um adequado a um tipo de minério ou redutor. Percy, que cita 14 métodos, afirma que as diferenças entre eles são mínimas, “so much so, indeed, that it is impossible to detect any absolutely essential distinction between them”¹⁴.

As referências citadas por Dupré são dois clássicos da literatura metalúrgica do século 19: Carl Karsten (KARSTEN, 1841) e Peter Tunner (TUNNER, 1858). O primeiro escreveu vários livros entre 1816 e 1841, que ainda preservavam o caráter descritivo das inúmeras variações de processos siderúrgicos existentes no início do século. Johann Bloem, diretor de Ipanema entre 1836 e 1842, solicitou a compra de dois de seus livros. A biblioteca de obras raras da Escola de Minas de Ouro Preto dispõe da edição de 1841 do livro *Handbuch fur Eisenhuttenkunde*, em 5 volumes.

¹⁴ “tanto assim que é impossível detectar qualquer distinção essencial entre eles”. (PERCY, 1864, p. 580).

Mas qual a diferença entre o refino estiriano descrito por Karsten e aquele praticado em Ipanema? Na descrição de Karsten, que é muito semelhante à descrita por Hassenfratz (HASSENFRAITZ, 1812), outro clássico da época, a transformação do gusa em gusa branco é garantida pela solidificação em placas finas (a velocidade de resfriamento mais alta garante que o carbono se combine com o ferro na solidificação, em vez de formar a grafita que caracteriza o gusa cinzento). Depois essas placas finas são empilhadas, espaçadas por camadas de carvão moído, para depois serem fundidas e oxidadas pelo vento. Nada disso era feito em Ipanema, como se verá a seguir.

O livro de Peter Tunner (TUNNER, 1858)¹⁵ também foi muito importante no século 19. Sua primeira edição é de 1846, mas é a segunda edição, de 1858, que apresenta o Forno de Refino de Reichenau e inclui seu desenho. Peter Tunner é austríaco da cidade de Leoben, na província de Estíria, filho de um gerente de fábrica de ferro. Foi diretor de siderúrgica e professor da Escola de Minas de Leoben, criada em 1840. A semelhança entre os desenhos de Tunner e o de Dupré é muito grande, como mostram a Figura 6 e a Figura 7. Ambos têm uma câmara abobadada que lhes apõe o nome de “forno revérbero”, ambos têm duas fornalhas e ambos buscam o aproveitamento do calor perdido. Nessa última parte os dois projetos divergem bastante, mas ambos pretendem aproveitar o gás quente para reaquecer o ferro para outras operações e a seguir aquecer água de uma caldeira de máquina a vapor.

O importante é que nesse forno ocorre o refino do ferro-gusa de Ipanema e o reaquecimento da lupa (explicaremos a seguir o que é a lupa) para posterior alongamento no martelo, e temos duas detalhadas descrições do processo, uma escrita por Dupré, já citado, e outra por Pandiá Calógeras em série de artigos (CALÓGERAS, 1895) publicados em 1895. Como já dito, o desafio é estabelecer ligações entre a microestrutura que pode ser observada nos objetos da coleção do Museu Nacional e os detalhes dos processos descritos por Dupré e Calógeras, eventualmente cotejados com os textos dos livros de Karsten, Tunner, Percy e outros.

¹⁵ O título do livro de Peter Tunner pode ser traduzido como “A preparação de barras de ferro e aço em Fornos de Refino, ou, O bem-informado Mestre de Forja”.

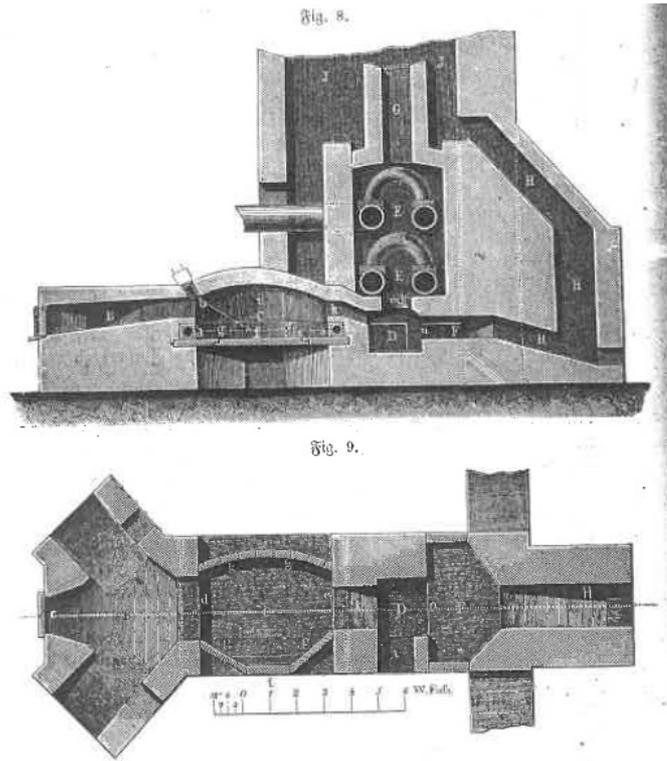


Figura 6 Forno de Refino Estiriano em Reichenau, Austria, conforme livro de P. Tunner (TUNNER, 1858)

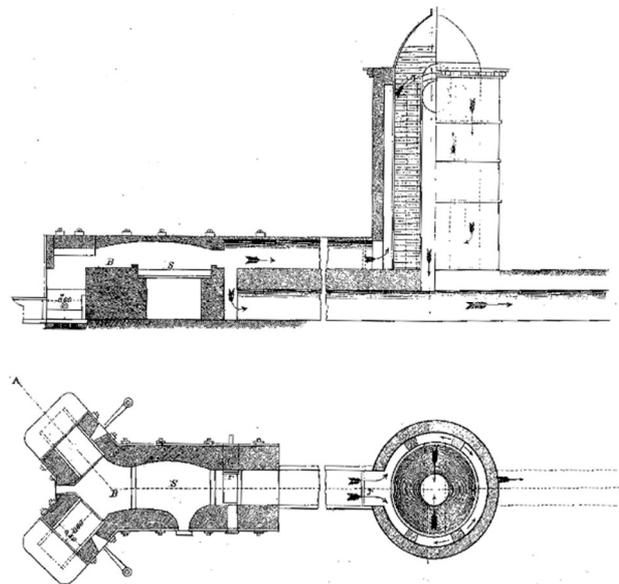


Figura 7 Forno de Refino Estiriano em Ipanema, Brasil, conforme artigo de Dupré, 1885, estampa VI

É possível dividir o refino em quatro partes, o refino químico (fusão do gusa e oxidação), o refino físico (a consolidação da lupa no martelo pilão, espremendo parte da escória para fora da lupa), o reaquecimento da lupa e sua transformação em barra por espichamento no martelo de cauda. Leandro Dupré assim descreveu o processo, em 1885:

Supondo que terminou uma operação, o refinador lança um pequeno balde de água dentro do cadinho [do forno de refino], desprega as crostas que aderem à chapa do algaraviz e prepara com elas e carvão fino a cama para a nova lupa, de modo que fique apenas 2 a 3 centímetros abaixo do algaraviz. Com um gancho de ferro, puxa da parte B do forno, os pedaços de gusa que aí devem estar desde o começo da operação precedente, aproveitando o calor (DUPRÉ, 1885).

Neste trecho aparecem, pela primeira vez, os gestos do refino. Os gestos técnicos, esses que exigiam a prática e habilidade do refinador para atingir, repetidamente, um produto de qualidade. Dupré descreve em detalhe a coreografia que o mestre e seus auxiliares realizam, e não apenas nesse trecho. Essa coreografia será descrita em vários parágrafos à frente. A cuidadosa reprodução dessa coreografia era considerada crítica para o sucesso do produto final. Nosso objetivo aqui será o de buscar justificativas técnicas e científicas para aqueles gestos.

Dando mais informações para o entendimento do parágrafo, o cadinho da forja é uma cavidade revestida com chapas de ferro, dentro da qual todo o processo se realiza. O objetivo do processo é transformar o ferro-gusa, que tem 4% de carbono e funde a 1200° C, num ferro com teor de carbono abaixo de 0,2%, que só se fundiria a 1520° C, o que não acontece, pois a temperatura máxima desse forno deve ser de 1300° C. Portanto, o gusa é fundido e, durante o processo de descarbonetação (que também oxida outros elementos contidos no ferro-gusa, além de ferro e carbono), o ferro se solidifica. Nesse processo aprisiona uma quantidade de escória no interior do metal. O algaraviz é o tubo por onde entra o ar que é soprado para queimar o carvão e para incidir sobre o ferro, provocando a oxidação do carbono que é o principal objetivo dessa etapa. A placa do algaraviz, também chamada de “warme”, na época, oxida-se por estar quente e próxima à entrada de ar.

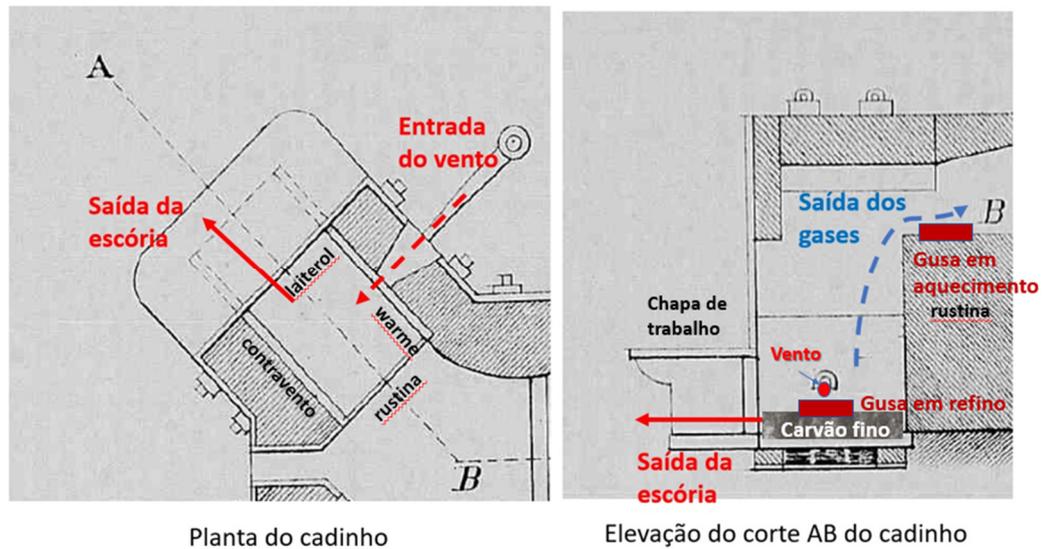


Figura 8. Detalhe da planta e elevação do cadinho do forno de refino utilizado em Ipanema. Adaptado de DUPRÉ, 1885.

O autor explica que *pedaços de gusa* estavam sendo pré-aquecidos na mesa B (ver Figura 8). Por meio desse procedimento consegue-se uma economia de energia, pois o calor gerado dentro do cadinho, pela queima do carvão, é aproveitado para pré-aquecer o gusa que vai entrar no cadinho.

As crostas que aderem à chapa devem ser óxidos de ferro e de outros elementos que solidificam de encontro à chapa.

A lupa será o resultado do processo de refino, um aglomerado de ferro metálico sólido e escória.

Coloca-se a carga de gusa que é de 65 quilogramas, do lado do contravento, junta-se uma pá de escórias ricas de operações precedentes, cobre-se com carvão grosso e dá-se vento fraco (DUPRÉ, 1885).

As quatro paredes laterais do cadinho têm nomes: parede do algaraviz, oposta a do contravento, e a parede do laterol (da saída da escória), oposta a da rustina. É importante notar que o operador joga uma pá de escórias ricas. A referência é o teor de óxido de ferro. Escória rica é rica em teor de óxido de ferro, um óxido que facilmente reage com o carbono do ferro-gusa. Como o gusa mais escória

são cobertos por carvão grosso, e sobre eles incide vento fraco, supõe-se que o objetivo seja queimar o carvão para aquecer o gusa até fundir e contar com alguma reação química entre a escória rica e o gusa, iniciando a descarbonetação do ferro.

A coleção de objetos do Museu Nacional inclui um denominado “gusa branco”, que é aqui mostrada na Figura 9.



Figura 9 Lingote de gusa branco da coleção do Museu Nacional, mostrando a cor branca da fratura e a presença de porosidade no interior do material. Imagem do autor.

[Depois de 45 minutos], toda a atenção do operário concentra-se na refinação da gusa que já deve estar fundida.

Introduz uma vareta grossa de ferro por um dos buracos da chapa do laiterol, para fazer correr as escórias cruas, assim chamadas por serem produzidas durante a fusão do ferro cru. Essas escórias são muito fluidas, contem pouco metal, porém muita sílica. (DUPRÉ, 1885)

Nesse momento a temperatura está alta o suficiente para fundir o gusa (ali chamado de ferro cru) e a escória gerada na reação do gusa com a tal escória rica. O refinador elimina uma escória que contém muita sílica, antes de constituir a lupa que será depois forjada.

Agora com uma alavanca, o refinador começa a levantar os pedaços de ferro acima do algaraviz para expô-los à ação descarburante do oxigênio do vento. Junta mais uma pá de escórias ricas

e cobre tudo novamente de carvão. E assim continua com pequenos intervalos a expor o ferro ao vento do algaraviz (DUPRÉ, 1885).

Se no trecho anterior Dupré fala que o gusa (o ferro cru) já estaria fundido, quando agora afirma que levanta pedaços de ferro, podemos supor que trata-se já de ferro com teor de carbono menor que do gusa, já sólido, mas que ainda exige a ação descarburante do oxigênio do vento e das escórias ricas.

De cada vez que o refinador introduz a alavanca, [o refinador] vê se a escória que sai na ponta dela despega-se ou não facilmente; se despega é indício de que a descarburetação não vai adiantada. Toda a vez que o refinador tem de virar o ferro, o servente lança sobre o fogo um balde de água para refrescar o carvão (DUPRÉ, 1885).

Aqui vem uma interessante informação de uma técnica de “controle de processo”, o uso da observação da viscosidade da escória, que depende da sua composição química, para inferir sobre o teor de carbono do metal. Nossa hipótese é que, em escórias muito ricas em ferro, quanto menor o teor de carbono do ferro, maior será o teor de FeO da escória, e com isso maior sua viscosidade. Se não há mais carbono no ferro, o vento e a escória vão passar a oxidar o ferro, aumentando o teor de FeO da escória.

No fim de 1 hora e 30 minutos, aumenta-se o vento, há grande projeção de escórias em forma de estrelas brilhantes (DUPRÉ, 1885).

É possível que o aumento da vazão de vento pudesse projetar gotas de escória para fora do cadinho. Não se pode excluir, entretanto, que as estrelas brilhantes sejam a queima de carbono, tal qual se vê hoje no esmerilhamento de aço, que quanto mais carbono tem, mais solta fagulhas.

Introduz-se a vareta, pela abertura mais baixa da chapa do laiterol e correm então as escórias cozidas. Estas correm mais dificilmente, são mais pastosas e muito ricas de ferro oxidulado na proporção de 80 a 90%. Em razão de sua densidade elas ocupam o fundo do cadinho (DUPRÉ, 1885).

Nesse ponto do refino, a remoção do carbono deve estar praticamente completa, a escória já recebeu muito óxido de ferro. É importante notar esse conhecimento já estabelecido: a escória do final do processo tem maior teor de ferro, tem mais viscosidade e é mais densa. São informações compatíveis com os conhecimentos atuais. Dentre os objetos da coleção do Museu Nacional consta a “escória do refino”, ver Figura 10, cuja composição química foi analisada em 2016, resultando em 83% de ferro, 6% de silício e 6% de fósforo, cálcio e magnésio somados, excluindo o teor de oxigênio.



Figura 10 amostra de escória das forjas de refino de Ipanema, da Coleção do Museu Nacional. Foto de Augusto C. Neiva.

Depois da saída da escória, vem o último período, que os franceses chamam de avalage, e que entre nós não tem designação especial. Consiste em juntar com a alavanca todos os pedaços de

ferro que ainda não estão reunidos em uma massa única a que se chama lupa (DUPRÉ, 1885).

Esse trecho define, melhor que qualquer outra explicação, a formação da lupa. É de supor-se que aqueles pedaços de ferro tenham facilidade para juntar-se à massa maior. Nessa etapa o ferro, já sem carbono, está sólido, mas deve haver escória entremeada ao ferro, quem sabe facilitando a adesão entre os pedaços de ferro.

Reunidos os pedaços, lança sobre a lupa uma pá de óxidos de bateduras, reúne o resto do carvão que se acha espalhado no cadinho e está terminada a operação, gastando no último período 12 a 15 minutos (DUPRÉ, 1885).

Óxidos de batedura é um galicismo (*oxide de batidure*) e refere-se às carepas (óxidos que se formam na superfície do ferro exposto ao ar) e que se soltam do ferro quando ele é martelado. As carepas compõem-se predominantemente de óxido de ferro. Os óxidos de batedura podem incluir também as escórias que são expulsas do interior do ferro ao ser espremido pelo martelamento¹⁶.

Antes de retirar do fogo a lupa, o servente limpa o cadinho com uma enxada retirando as cinzas, e também, tomando uma alavanca, ajuda o refinador a voltá-la de cima para baixo, de maneira que a escória que está na cavidade feita pelo jato de vento batendo contra ela se derrame no cadinho (DUPRÉ, 1885).

O importante desse trecho é a informação de que o jato de vento forma uma cavidade no topo da lupa, cavidade que se enche de escória. Da leitura dos trechos anteriores, não ficava claro que havia vento incidindo diretamente sobre a

¹⁶ A escória espremida para fora da lupa deveria ficar ao redor da bigorna do martelo de pilão, onde a lupa era forjada. Carepas de óxido de ferro menos contaminado com escória deveriam ficar ao redor da bigorna do martelo de cauda, onde a lupa já aglomerada era forjada até a forma final.

lupa. O refinador e seu ajudante tombam a lupa num giro de 180°, colocando-a de “cabeça para baixo” para a escória sair.

Levantando-a novamente, dão-lhe um impulso e colocam-na sobre a chapa do trabalho, onde é tomada por um carrinho de ferro que a leva ao martelo-pilão para ser aglomerada. Toda a operação do refino dura 1 hora e 45 minutos, mais ou menos. (DUPRÉ, 1885)

Mais um gesto forte da coreografia: mestre e ajudante levantam a massa, que pesa mais de 50 quilogramas, e num impulso a colocam numa superfície plana para ser levada ao martelo. É uma pena que Dupré não descreveu os gestos do martelamento, a sincronia de introduzir a lupa sobre a bigorna e segurá-la enquanto o martelo a achata com muitos golpes por minuto, girá-la de 90°, achatá-la daquele lado. Essa etapa foi descrita por vários autores em desenhos que mostram a evolução da forma da lupa. Dentre eles, Paul Ferrand, professor da Escola De Minas de Ouro Preto, ao descrever as forjas de redução direta existentes em Minas Gerais, em artigo no mesmo volume dos *Annales* (FERRAND, 1885) em que Dupré publicou o artigo que estamos aqui citando. O processo de conformação da lupa do refino de Ipanema não devia ser muito diferente da representada na figura do artigo de Ferrand.

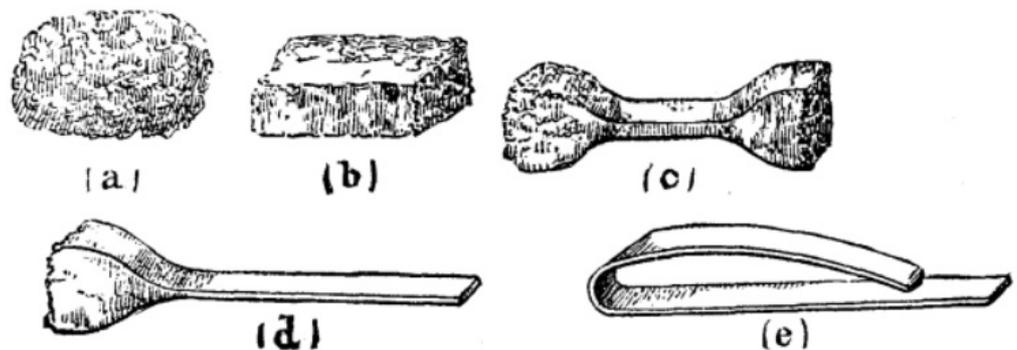


Figura 11. Imagens da evolução da lupa ao longo do forjamento. (a) lupa conforme retirada do cadinho; (b) lupa aglomerada no martelo pilão; (c),

(d,) (e) etapas da conformação no martelo de cauda. Imagem retirada de artigo de Ferrand.^{Erro! Indicador não definido.}

A Fábrica de Ferro recebeu um martelo-pilão, acionado a vapor, importado em 1875. O artigo de Dupré cita a presença de dois martelos-pilões de meia tonelada e o artigo de 1886 cita um martelo pilão de uma tonelada “feito no estabelecimento”. A Figura 12 mostra uma fotografia com um dos martelos-pilões de Ipanema ao centro. A forma dos martelos-pilões (steam hammer) da época é bem típica.

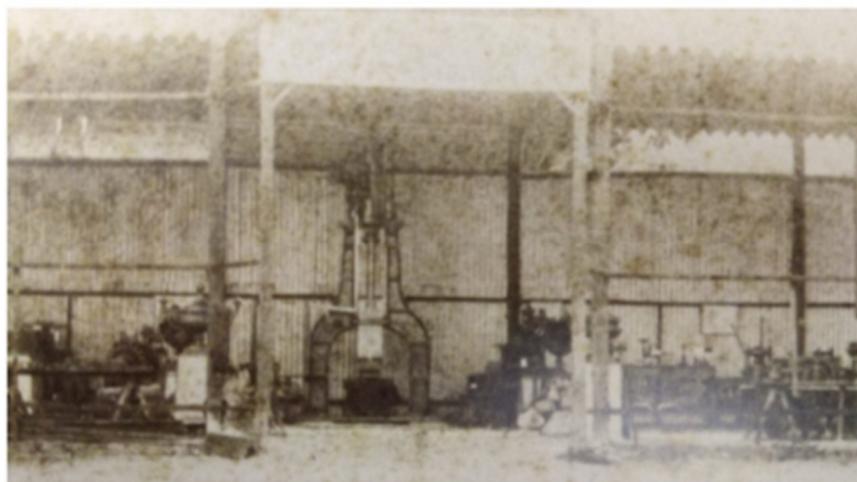


Figura 12. Martelo pilão de Ipanema exibido na exposição provincial de 1885. Adaptado de fotografia de Carlos Hoenen. Biblioteca Nacional.

Nessa operação de aglomeração no martelo pilão a lupa deixa de ser uma massa informe e toma a forma aproximada de um paralelepípedo. Além disso, parte da escória que está no interior da massa informe é espremida para fora. Depois dessa série de pancadas no martelo pilão, a lupa volta para o cadinho da forja.

... o refinador caldeia (aquece) a lupa, Para isso, ele a coloca sobre o carvão ... e carrega o fogo novamente com mais carvão. Mantem-se sempre o ferro que está caldeando (aquecendo), completamente coberto. No fim de 15 minutos, o servente introduz uma pá de modo a levantar o carvão que está sobre o ferro e, se ele está ao vermelho branco, retira-se com uma grande tenalha e

vai então ser batido no martelo de cauda, movido por uma roda hidráulica.

Espichado de um lado, volta, novamente ao fogo para caldear a outra ponta.

...

O ferro em barras para o comércio que, até 1882, era espichado nos martinets, é atualmente preparado num pequeno trem de laminadores que pertenceu outrora à Casa da Moeda do Rio de Janeiro. Ele é movido por uma roda hidráulica de 4 metros de diâmetro e 1,5 m de largura, recebendo água a meia altura.

O revérbero serve de forno de reaquecer para o ferro que tem de passar no laminador. Trabalhando regularmente, o laminador prepara 1.200 e 1.300 quilogramas de ferro por dia (DUPRÉ, 1885).

É possível que toda a preocupação em descrever que a lupa é colocada sobre carvão e deve ficar sempre coberta por carvão até ser retirada por uma tenaz (tenalha, instrumento formado por duas hastes de ferro, unidas por um eixo, à maneira de tesoura, com cabos longos, com que o ferreiro tira peças incandescentes da forja) tivesse como objetivo provocar uma carbonetação da superfície da lupa, que por fim resultaria na desejada camada superficial de mais alto carbono. Entretanto nada se explicita quanto a isso. Calógeras, que descreve em mais detalhe as duas primeiras fases do refino (CALÓGERAS, 1895), nem menciona a necessidade de recobrir a lupa com carvão, nem quaisquer cuidados especiais quanto a isso.

O trecho acima menciona o uso do martelo de cauda e o martinete para espichar as barras de ferro. Ambos eram movidos a roda d'água. Tylecote discutiu os diferentes tipos de martelos que vigoraram antes da introdução do martelo-pilão acionado a vapor (TYLECOTE, 1992). O acoplamento da haste do martelo com o eixo da roda d'água, a massa do malho, a abertura máxima e o número de golpes por minuto são os elementos diferenciadores. A Figura 13 (a) mostra os componentes de um martelo de cauda, em que a roda d'água faz girar o eixo e, com ele, as cames, que empurram para baixo a cauda da haste, levantando na outra ponta o malho. Quando a came em movimento solta a cauda da haste, o malho cai sobre a lupa que está sobre a bigorna. A Figura 13 (b) apresenta o martinete, em que a haste fica paralela ao eixo, as cames a levantam numa posição mais próxima à cabeça do

malho e, portanto, podem levantar um peso maior e numa abertura maior. O nome martinete é às vezes também usado para o martelo de cauda. Dependendo da velocidade da roda e do número de cames, o número de batidas do malho variava de 90 até 240 batidas por minuto. Esses dois tipos de malho foram muito usados em forjas brasileiras (ZEQUINI, 2006; FERRAND, 1885).

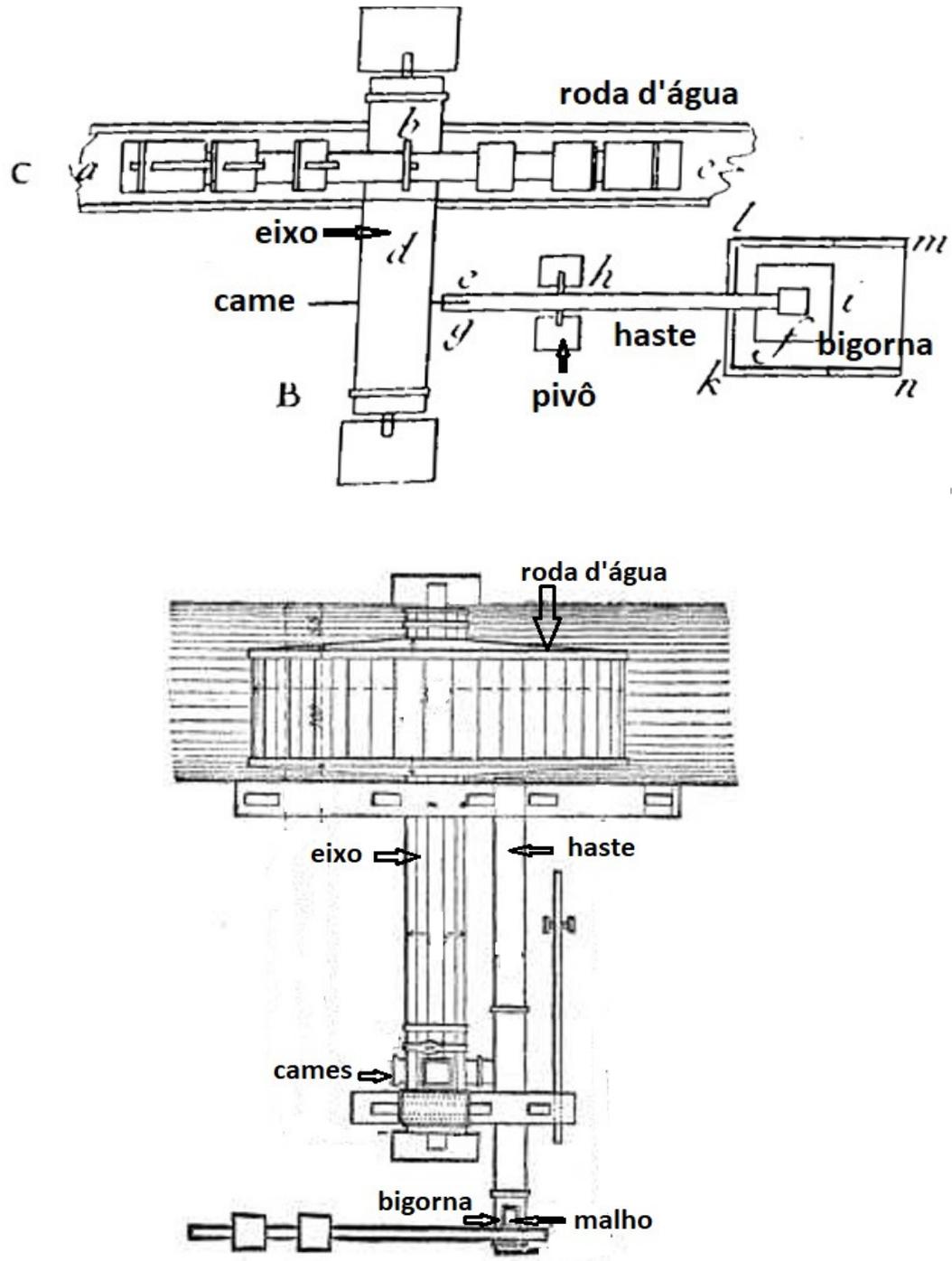


Figura 13. (a) Martelo de cauda acionado por roda d'água (adaptado de Hassenfratz) (b) martinete, adaptado de Ferrand

A descrição do processo de refino feita por Dupré é muito semelhante á descrição que John Percy fez do processo estiriano em 1864. John Percy, professor de metalurgia da Royal School of Mines (criada em 1851), escreveu o livro “A treatise on Metallurgy” (PERCY, 1864), cujo volume 2, sobre ferro e aço, tem um capítulo sobre “A produção de ferro maleável a partir de ferro fundido”. Um dos catorze processos de refino é o estiriano, ao qual Percy dedica uma página (p. 610). Mas Dupré não termina assim sua abordagem do refino, no seu artigo de 1885. Escreve também sobre a pudlagem e sobre o processo Bessemer:

PUDDLAGEM

Para se avaliar da intensidade do calor perdido de dois fogos de refino, tem-se experimentado este processo de transformação do ferro fundido em ferro maleável, com os melhores resultados, no forno de reverbero da forja, conseguindo-se em 2 horas refinar 120 a 150 quilogramas de gusa.

A pudlagem não pode ser, entretanto, uma operação corrente entre nós. É um trabalho penoso num clima quente. Como experiência ela tem sido feita nas ocasiões em que a Fábrica é visitada pelos alunos da Escola De Minas de Ouro Preto (DUPRÉ, 1885).

A pudlagem era o principal método de refino de ferro no mundo, naquele momento. A produtividade era mais alta, pois gerava o dobro da massa de ferro no mesmo período de duas horas. Nesse processo, o gusa era colocado para fundir sobre uma cama de óxidos colocada sobre as placas de ferro da região “S” da Figura 7, apresentada acima. Não está claro o motivo pelo qual a operação de pudlagem era mais penosa do que o refino estiriano.

ACIERIAS

Está-se a concluir um forno para fabricação de aço cementado e, em breve, dar-se-á começo às obras para uma acieria Bessemer.

Esse trecho já aponta para um futuro uso do processo Bessemer, que era um dos três mais modernos processos de refino da época (junto com o processo

Thomas e o processo Siemens Martin), e assim concluíam-se as referências do artigo de Leandro Dupré ao refino.

A microestrutura das barras refinadas

Os objetos de ferro maleável presentes na coleção do Museu Nacional são apresentados na Figura 14. Note-se que todos eles são corpos de prova de fratura, e quase todos suportaram um dobramento de 180° sem rompimento total. O aspecto das fraturas tem características que podem ser consideradas “fibrosas”, por analogia com a fratura de madeira. A Figura 15 mostra esse aspecto em mais detalhe.

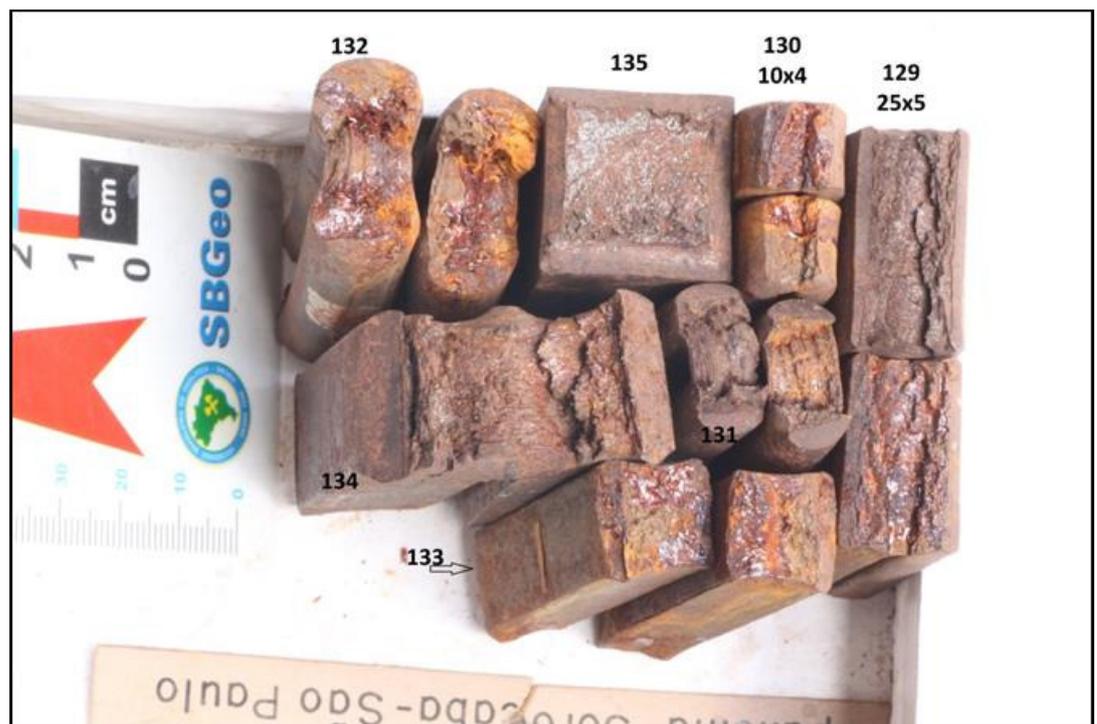


Figura 14 Caixa da Coleção de Geologia do Museu Nacional contendo 12 objetos de ferro dos quais cinco em duplicata. À fotografia foram superpostas as identificações numéricas USP de sete amostras. Pode-se observar as superfícies de fratura de cada uma das amostras (fotografia feita por Augusto C. Neiva, 2014).



Figura 15 Aspecto da fratura de barra de ferro maleável. (amostra CHC 134). Fotografia de Augusto Camara Neiva.

O texto de Dupré nada fala sobre métodos de ensaio das barras, nem menciona o caráter “fibroso” do ferro de Ipanema. Jean Le Coze, importante pesquisador da história do refino do ferro, comenta que mesmo até 1930 pensava-se que uma estrutura fibrosa aumentava as propriedades mecânicas do ferro maleável. Hoje sabe-se que essas fibras tinham origem nas poças de escória, chamadas hoje de inclusões de escória, dispersas no interior do ferro (LE COZE, 2000).

A Figura 16 e a Figura 17 mostram o aspecto do interior da barra, numa seção longitudinal polida (um corte ao longo do comprimento da barra), destacando a presença de regiões escuras por serem não reflexivas, por serem regiões não metálicas. Essas regiões, formadas principalmente por óxidos, estão alongadas pela deformação da barra ao se transformar de uma lupa, em uma barra redonda de 8 mm de diâmetro, por forjamento e laminação. Nota-se que as inclusões escuras têm comprimentos que vão de micrometros a milímetros. Um corte semelhante numa barra de aço fabricada em 2020 não mostraria quantidade tão grande de inclusões escuras, pois a evolução tecnológica trouxe maior “limpeza” aos aços, melhorando suas propriedades. A fração volumétrica média das inclusões de escória nas várias barras analisadas foi calculada em 1% (MAMANI-CALCINA, LANDGRAF, AZEVEDO, 2016), fração muito menor do que as barras fabricadas pelo método da pudlagem, que era da ordem de 5%, confirmando observações da literatura.



Figura 16 Superfície polida de corte longitudinal da barra de ferro maleável de 8 mm de diâmetro (amostra 131), da coleção do Museu Nacional, embutida em baquelite. As “fibras” escuras no interior da barra são inclusões de escória. Imagem do autor.

Quando a mesma superfície é observada com uma lente de maior aumento, como na Figura 17, é possível perceber no interior das inclusões a presença de partículas de diferentes tons de cinza que são diferentes tipos de cristais no interior de cada uma das inclusões. Os tipos se repetem nas diferentes inclusões da microestrutura. A análise química dessas diferentes inclusões, a ser discutida mais a frente, é o principal objeto da literatura científica contemporânea na arqueometalurgia (KILLICK, 2012). Este novo ramo de investigação trata do uso de ferramentas modernas de caracterização microestrutural na análise de objetos ligados à história da metalurgia (BUCHWALD, 1998).

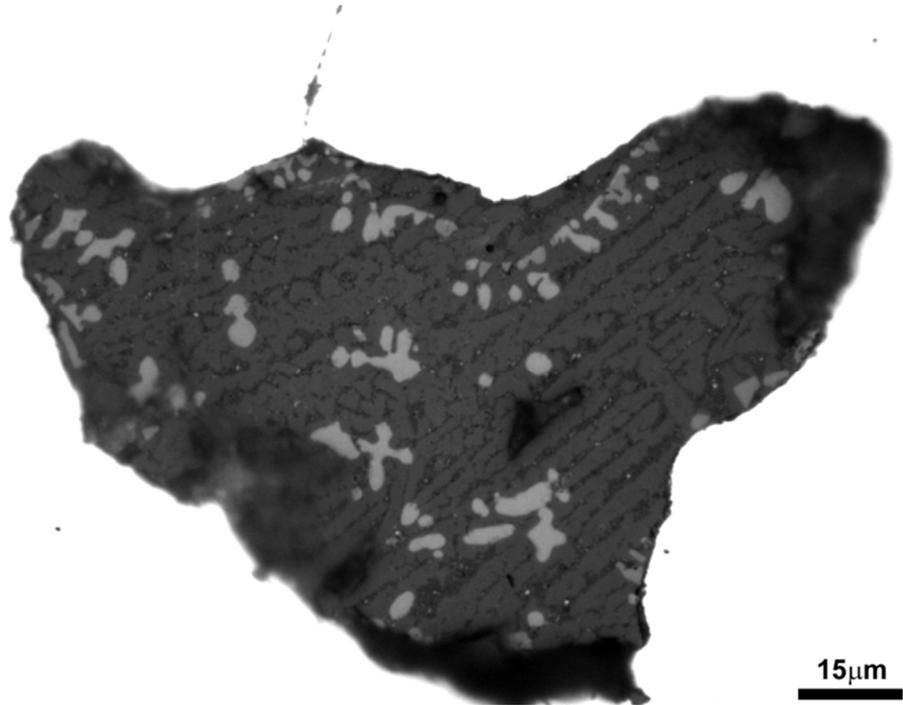


Figura 17 Inclusão de escória contendo vários tipos de cristais, no interior da barra de ferro maleável de 8mm de diâmetro, da coleção do Museu Nacional (amostra 133) com *maior aumento do que a figura anterior*.

Hoje pode-se fazer a análise química de regiões microscópicas dos materiais, com base no espectro de energia dos elétrons emitidos quando um feixe de elétrons de um microscópio de varredura incide em uma região. Quando uma área da matriz metálica (a região branca da Figura 17) é analisada, encontra-se praticamente apenas ferro na composição química. Quando as inclusões são analisadas, encontra-se uma grande quantidade de elementos químicos: ferro é o elemento predominante, com média de 30%. Oxigênio é o segundo elemento mais presente, seguido de silício, cálcio, fósforo e outros elementos. Isso indica que, no caso desses objetos de ferro, as impurezas não ficaram disseminadas entre seus átomos. Em vez disso, devido à sua afinidade química pelo oxigênio elas espontaneamente segregaram nas gotas das inclusões não metálicas, ou inclusões de escória.

Os cristais se formaram enquanto a escória se solidificava no interior do ferro metálico, durante a operação de refino do ferro, dependendo da composição química das gotas, das inclusões.

Pelo menos três tipos de cristais podem ser vistos no interior da inclusão de escória mostrada na Figura 17, cada tipo analisado por Espectroscopia de Dispersão de Energia: os cristais arredondados, mais claros, são cristais de FeO (chamado de wustita), imersos numa matriz que contém dois tipos de cristais muito mais escuros: cristais alongados, de silicato de ferro (faialita) e as regiões escuras entre os cristais alongados contém cálcio, fósforo, oxigênio e outros elementos.

Um trabalho publicado pela equipe de arqueometalurgia da Escola Politécnica (MAMANI-CALCINA, LANDGRAF, AZEVEDO, 2016) identificou a presença de pequena quantidade dos elementos titânio e vanádio nos cristais de wustita das inclusões de escória das barras de ferro maleável da Coleção do Museu Nacional.

A presença do elemento químico titânio do minério de Ipanema é conhecida desde 1880, identificado em análises feitas na Alemanha e depois na Escola de Minas de Ouro Preto (CALÓGERAS, 1895). Muitos autores creditaram as dificuldades técnicas da fabricação do ferro em Ipanema à presença de titânio (FELICÍSSIMO, 1969; CARVALHO, 2010). De fato, o minério contém 3,5% de TiO_2 (GUARINO et al., 2012), e 0,5% de V_2O_5 , mas esse teor não impediu seus operadores de fabricarem ferro-gusa e ferro maleável de boa qualidade.

As amostras que Pedro II recebeu de Mursa, em 1886, reunidas na Coleção Museu Nacional, incluiu também exemplares de escória do alto-forno e da já citada escória de refino. Sua análise química revelou, dentre outros, 50% de óxido de silício, 17% de óxido de cálcio, 8% de óxido de titânio e apenas 0,6% de óxido de vanádio, enquanto o ferro-gusa do tipo branco, usado para as operações de refino continha 0,2% de vanádio e praticamente nada de titânio. Ou seja, o poder redutor do alto-forno foi insuficiente para reduzir o óxido de titânio, que se transferiu quase integralmente para a escória, enquanto uma parte do vanádio do minério foi transferida ao metal.

Os cristais de wustita das inclusões de escória das barras de ferro da Coleção do Museu Nacional contém, em média, 0,5% de óxido de titânio e 1,5% de óxido de vanádio (MAMANI-CALCINA, LANDGRAF, AZEVEDO, 2016), enquanto o ferro metálico contém praticamente nada desse elementos. Isso sugere que o teor de vanádio do gusa foi totalmente oxidado, transferido para a escória durante o

refino, parcialmente capturado pelas inclusões de escória que restaram no interior do ferro refinado que, na solidificação, resultou em cristais de wustita que absorveram esse vanádio. Os resultados mostram que as outras fases presentes nas inclusões de escória (a faialita e o composto de óxido de cálcio e fósforo) praticamente não contém vanádio nem titânio. Essa proporção V/Ti nos cristais de wustita das inclusões de escória pode ser usada como uma “assinatura química” (CHARLTON, 2012) dos objetos fabricados em Ipanema, pelo menos aqueles fabricados com o refino estiriano.

A presença de titânio nessas inclusões, apesar da sua virtual ausência no gusa branco, pode ser justificada pela possível agregação de gusa do tipo cinzento no processo de refino. A amostra de gusa cinzento da coleção do Museu Nacional mostrou presença de 0,3% de titânio, além de 0,3% de vanádio, fato compatível com a necessidade de operar o alto-forno em temperatura mais alta para levar o teor de silício do gusa para 1,5% e assim obter solidificação com grafite, que caracteriza o gusa do tipo cinzento. Calógeras discute, em seus artigos (CALÓGERAS, 1895) de 1895, um possível equívoco do diretor Mursa de pretender produzir um gusa misto, que servisse tanto para a fundição de peças (uso típico do gusa cinzento) e também para o refino (uso típico do gusa do tipo branco, em que o carbono forma um carboneto de ferro na solidificação, em vez de grafita). Esse pode ser o motivo das inclusões de escória das barras refinadas conter vanádio e titânio.

A discussão acima pretendeu demonstrar que a aplicação de técnicas modernas de análise microestrutural permite estabelecer um diálogo com os documentos gerados sobre Ipanema na época, e também com a literatura que buscou analisar, posteriormente, a história daquela Fábrica.

Regiões ricas em carbono

Uma das observações que podem ser feitas sobre a microestrutura das barras de ferro da coleção do museu é sobre uma heterogeneidade que denota a presença de regiões ricas em carbono, em geral mais próximas à superfície das barras, mas distribuídas com grande heterogeneidade. As macrografias das barras, exibidas na Figura 18 e Figura 19, mostram regiões claras e escuras. Nas regiões escuras é

possível identificar cristais muito grandes de ferrita (ferro metálico). Nas regiões claras, a análise com maior aumento mostra a presença de perlita, uma mistura de ferrita com carbonetos de ferro, indicando a presença de maior teor de carbono naquelas regiões.

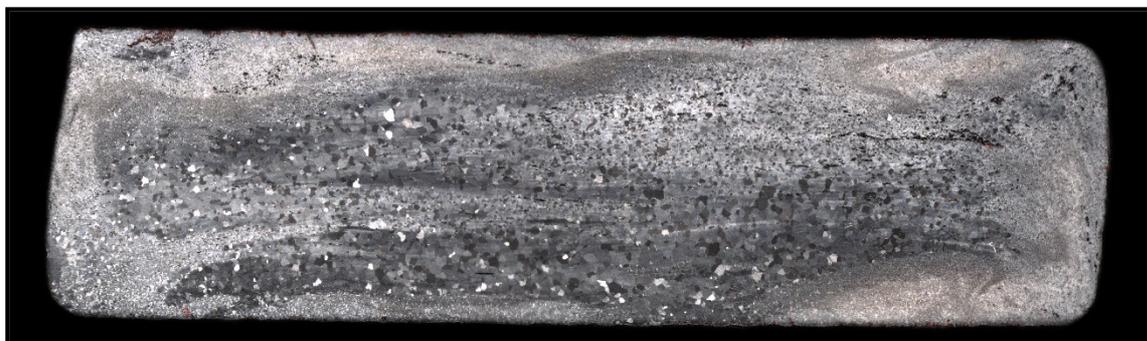


Figura 18 Macrografia ampliada da seção transversal do objeto 129 (barra de 25x5 mm)

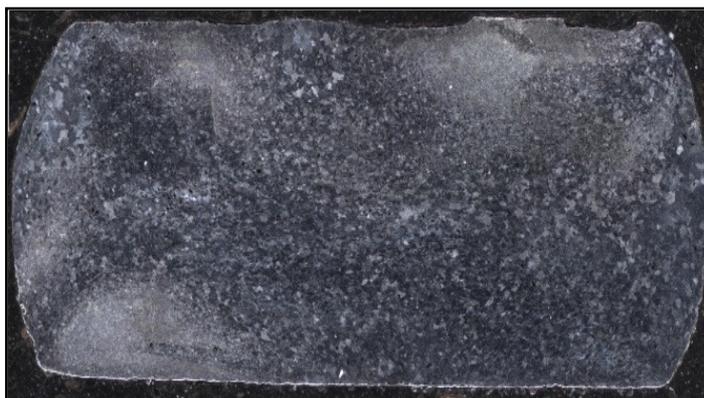


Figura 19 Macrografia ampliada da seção transversal do objeto 130 (barra de 10x4 mm)

O objeto 129 tem regiões claras em quase toda a superfície, enquanto o objeto 130 as tem em área menor. Esse tipo de heterogeneidade ocorre comumente em objetos fabricados antes de 1900 (BUCHWALD, 1998).

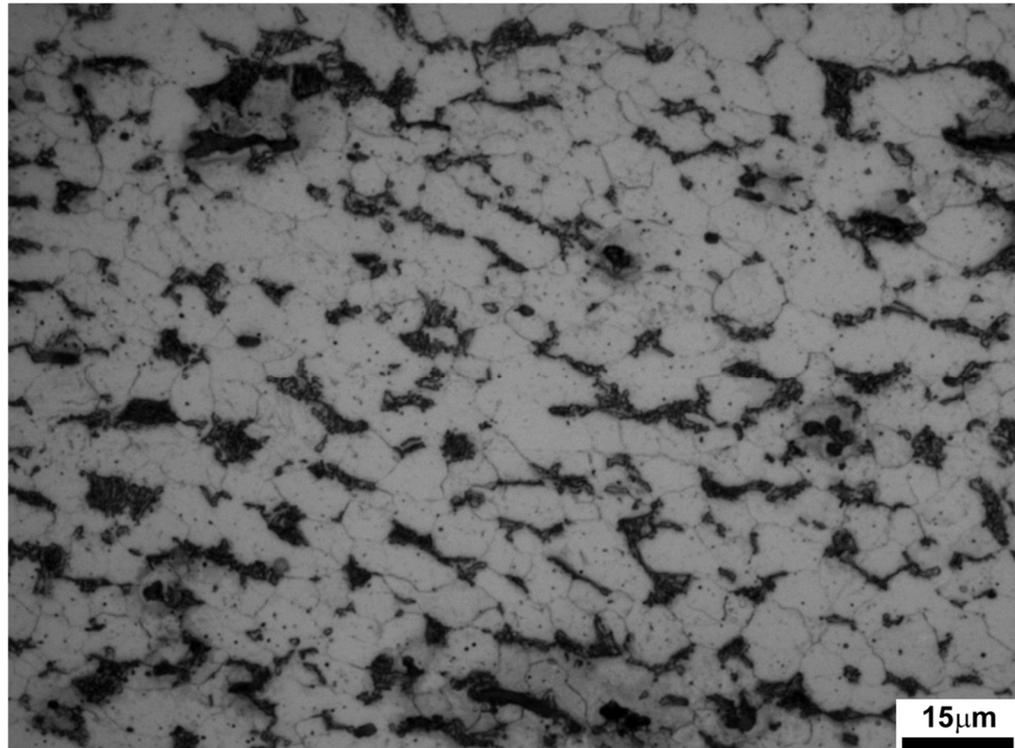


Figura 20. Microestrutura da região clara da amostra CHC 130, mostrando a presença de carbonetos e perlita na microestrutura. Foto do autor.

É muito provável que essa presença de regiões ricas em carbono esteja associada ao esforço da Fábrica em aumentar a resistência mecânica do ferro, atendendo ao desafio colocado pela Companhia Paulista no relatório de 1883. A relação entre o teor de carbono do ferro e a resistência já estava bem estabelecida. John Percy, ao apresentar o efeito do carbono nas propriedades do ferro, o faz por meio de uma resenha de um trabalho apresentado por Karsten em 1846, em que o alemão afirma, dentre outras coisas, que

Quando combinado com carbono, não excedendo certos limites, ferro aumenta em tenacidade e, conseqüentemente, sua elasticidade; também em maleabilidade, ductilidade e dureza (PERCY, 1864).

Essas propriedades mecânicas dos materiais mudaram bastante de significado. Percy esclareceu, na página 5 de seu livro, que “*resistência a tração é a palavra geralmente usada pelos engenheiros para denotar tenacidade*”. Hoje tenacidade é a medida da quantidade de energia mecânica absorvida pelo material deformado até ruptura, medida em unidades de energia, e não de tensão mecânica. A Tabela 1, apresentada ao

final do livro de Percy, lista as propriedades mecânicas de barras de ferro de diferentes classes e fabricantes. A resistência a tração, ali chamada de deformação de ruptura por polegada quadrada, varia pouco e é da ordem de 58.000 libras, ou seja, 400 MPa. A medida de ductilidade é a redução de área na ruptura e varia muito, de 22 a 61%.

Tabela 1. Propriedades mecânicas de barras redondas e quadradas de ferro, segundo Percy.

TABLE IV.
ROUND AND SQUARE BARS.

	Districts and Brands.	* No. of experiments.	Specific gravity.	Breaking strain per square inch.		Contraction of area per cent.
				lbs.	tons.	
1	Yorkshire. Low Moor.....	20	7·760	61,648	27·5	49·8
	.. Bowling					
	.. Farnley.....					
2	Lanarkshire ◊ GOVAN ◊...	12	7·720	58,181	26·0	49·4
	Do. Extra B Best	30	7·683	57,411	25·6	39·9
	Best scrap					
	Do. Best Best B Best	61	7·658	58,737	26·2	36·0
	B Rivet					
	Do. Best *	24	..	58,265	26·0	22·6
3	Staffordshire charcoal Ⓢ.....	4	..	57,216	25·6	60·9
	Do. B B scrap	4	..	59,370	26·5	52·0
	Do.  S. C.  Best	21	7·689	58,698	26·2	39·5
	Best Best					
	Do.  Best K. B. M.	4	..	55,000	24·6	27·0

O aumento do teor de carbono aumenta a resistência e diminui a ductilidade. Os resultados da comparação entre o “ferro inglês” e o ferro de Ipanema, como medido pelas oficinas da Companhia Paulista, são compatíveis com um maior teor de carbono nas barras de “ferro inglês”.

Não é possível realizar ensaio de tração em fragmentos pequenos como os que puderam ser retirados da Coleção do Museu Nacional. Entretanto, é possível estimar os valores, usando medidas de microdureza. Com base nesse tipo de medida, chega-se a 350 MPa nas regiões sem carbono, e 500MPa nas regiões mais ricas. Daí que o “ferro de Ipanema” tinha condições de competir com o “ferro inglês”, se conseguissem manter alta a fração volumétrica de regiões ricas em carbono.

Comentários finais

Este estudo mostra a metodologia usada para propor uma “assinatura química” para objetos fabricados no refino estiriano usado na Fábrica de Ferro de

Ipanema: a presença de teor de vanádio três vezes maior do que o teor de titânio nos cristais de wustita das inclusões de escória. Será importante encontrar e analisar objetos feitos com barras de ferro em períodos anteriores da história daquela fábrica, períodos que usaram outros processos de refino, para avaliar como a proporção vanádio/titânio se comporta.

Segundo as informações disponíveis, Ipanema foi o único local em que se realizava o refino do ferro gusa para produzir ferro maleável ao longo do século 19. Quando fechou, em 1895, essa cultura, aqueles gestos descritos por Dupré, foram perdidos. Não se realizou a expectativa de que Ipanema fosse uma escola de técnicos siderúrgicos. Teria sido possível realizar esse refino a partir de gusa importado, quem sabe nos Arsenais, ou nas oficinas da Central do Brasil, ou mesmo em alguma das dezenas de fundições que já o importavam. Entretanto, referências a algo assim são desconhecidas (CASTRO, 2017). Mesmo quando Manoel Buarque de Macedo criou a Companhia Nacional de Forjas e Estaleiros, em 1891, durante a bolha financeira do Encilhamento, e comprou o alto forno recém-construídos por Gerspacher em Itabirito (MG), ele não incluiu o refino na operação. Em vez disso, decidiu produzir ferro maleável por redução direta, importando “bloomeries” americanas para fazê-lo, em Rio Piracicaba (MG). Essas as iniciativas foram interrompidas com a falência da empresa em 1897. A Companhia Mechanica e Importadora, importante fundição paulista do início do século 20, implantou uma aciaria Siemens Martin em 1918, mas não se sabe detalhes do processo (BARROS, 2013). O refino do gusa só voltaria a se realizar, no Brasil, com a instalação da Companhia Belgo Mineira, em 1926.

A importância do refino de Ipanema, aqui descrita, deve demonstrar a necessidade de se planejar uma investigação arqueológica naquele local, que pode trazer à vista do visitante as fundações do prédio do refino estiriano, da caldeira e da chaminé.

Agradecimentos

FJGL agradece ao CNPq pelo apoio ao projeto 307631/2018-4, a Renato Schroeder pelos comentários e a Adolfo Frioli pelas sugestões.

Os autores agradecem a Renato Cabral Ramos e Maria Elizabeth Zucolotto, do Museu Nacional, pelo apoio da extração dos fragmentos dos objetos da Coleção Ipanema daquele Museu.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, P. E. M.; PICANÇO, J. L. P.; FARIA, G.; ZUFFO, M. K.; BALZANI, M.; ROSSATO, L.; SASSO, D. F.; LANDGRAF, F. J. G. Evolução do perfil interno dos altos-fornos brasileiros no século 19. In: 47º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-Primas, ABM São Paulo, p. 432-456. 2017. DOI 10.5151/2594-357X-0EDPIAFB.

BARROS, Gustavo O Desenvolvimento do setor siderúrgico brasileiro entre 1900 e 1940: Criação de empresas e evolução da capacidade produtiva. In: IV Jornadas de Historia de la Industria y los Servicios, 2013, Buenos Aires. CD de las IV Jornadas de Historia de la Industria y los Servicios, 2013.

BERTIN, Eduardo Henrique. Caracterização química comparativa de inclusões de wustita em ferro refinado do século 19. TCC (Graduação) USP, 2017. 72p.

BUCHWALD VF, WIVEL H. Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. *Materials Characterization*. 1998;40(2):73-96.

CALÓGERAS, J.P. A Fábrica De Ferro de S. João de Ipanema, em seis partes. *Revista Brasileira*, v. 1, 1895.

CARVALHO, J. Murilo de. A escola de Minas de Ouro Preto: o peso da glória. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010, 196 p.

CASTRO, Adler Homero Fonseca de. A pré-indústria e governo no brasil: iniciativas de industrialização a partir do arsenal de guerra do Rio de Janeiro, 1808-1864. 2017. Tese (Doutorado em História Comparada) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CHARLTON, M.F. ; Blakelock, E. ; Martín-Torres M.; Young T. Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods. *Journal of Archaeological Science*, v. 39 p. 2280-2293, 2012.

DUPRÉ, L. Memória sobre a Fábrica de Ferro de São João do Ipanema. *Anais da Escola de Minas de Ouro Preto*. v. 4 p. 37-68, 1885.

ESCHWEGE, G.B. Memória sobre as dificuldades das Fundições e refinações nas fábricas de ferro. Memórias Econômicas da Academia Real de Ciências de Lisboa, tomo 4, p. 121-128. Lisboa, 1812

FELICÍSSIMO, J. *História da siderurgia de São Paulo, seus personagens, seus feitos*. Ed. Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo. 1969.

FERRAND, P. A indústria do Ferro no Brasil (província de Minas Gerais). *Annais da Escola de Minas de Ouro Preto*, número 4, pag 122-139, 1885.

GARÇON, A-F Vents et fours en paléoméallurgie du fer, du minerai à l'objet. Programme collectif de Recherche, SRA Bretagne, année 2006. Rapport final - <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00202682/>

GUARINO, V.; AZZONE, R. G.; BROTZU, P.; GOMES, C. B.; MELLUSO, L.; MORBIDELLI, L.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C. G.; BRILLI, M. 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.

HASSENFRATZ, Jean-Henri. *La Sidérotechnie, ou l'art de traiter les minéraux de fer, pour en obtenir de la fonte, du fer et de l'acier*. Paris: Firmin Didot, tome premier, 1812. Disponível em: <http://bavarica.digitale-sammlungen.de>

KARSTEN, C.J.B. *Handbuch für Eisenhüttenkunde*. Ed. C. Reimer, Berlin, 1841.

KILLICK, D., FENN, T. Archaeometallurgy: The Study of Preindustrial Mining and Metallurgy. *Annu. Rev. Anthropol.* 2012. 41:559–75.

LANDGRAF, F. J. G., CASTRO, A. H. F. de, ARAUJO, P. E. M., REGALADO, L. B. Os canhões de Ipanema: tecnologia, indústria, logística e política em 1840. *Anais Do Museu Paulista: História E Cultura Material*, v. 29, p. 1-36, 2021.

LANDGRAF, F. J. G.; RIBEIRO, M. Y. Q.; ROSA, G. I. L.; CARVALHO, P. S. G.; RODRIGUES, D. L.; MAIA, R. R.; BENEDUCE NETO, F.; AZEVEDO, C. R. F. Archaeometallurgy of ferrous artefacts of the Patriótica Iron Factory (19 century, Ouro Preto, Brazil), *Revista da Escola de Minas International. Engineering Journal*. v.74, n.4, p.483-501, 2021

LE COZE, Jean. Purification of Iron and Steels a continuous effort from 2000BC to AD2000. *Materials Transactions of the Japan Institute of Metals*, vol 41, n.1, 2000, pp219-232.

MAIA, Rafael R. Análise de inclusões de escória em amostras metálicas da Fábrica de Ferro de Ipanema. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 209 p.

MAIA, R. R.; DIAS, M.S.; AZEVEDO, C.R.F.; LANDGRAF, F.J.G. Archaeometry of ferrous artefacts from Luso-Brazilian archaeological sites near Ipanema River, Brazil, *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, v. 68, n.2, p.187-193, 2015.

MAMANI-CALCINA, E. Microanálise de inclusões não-metálicas de artefatos ferrosos: Investigação da assinatura química de procedência (Real Fábrica de Ferro São João de Ipanema, Sítio de Afonso Sardinha, Sítio de Missões e Mossend Iron Works) por análise hierárquica de conglomerados. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MAMANI-CALCINA, ELMER ANTONIO; LANDGRAF, FERNANDO JOSÉ GOMES; AZEVEDO, CESAR ROBERTO DE FARIAS. Investigating the Provenance of Iron Artifacts of the Royal Iron Factory of São João de Ipanema by Hierarchical Cluster Analysis of EDS Microanalyses of Slag Inclusions. *MATERIALS RESEARCH*, v. 20, p. 119-129, 2016.

MURSA, Joaquim de Souza. Relatório do Diretor da Fábrica de Ferro de São João do Ipanema. In *BRASIL, Relatório do Ministério da Guerra apresentado à Assembleia Geral Legislativa*, 1874.

MURSA, Joaquim de Souza. Nota ao Editor. *Revista de Engenharia*, p. 259, 1883.

NIEMEYER, C.C. Relatório sobre a Fábrica de Ferro de Ypanema. In *Ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas, Relatório apresentado à Assembleia Geral Legislativa*, 1878.

OLIVEIRA, Franciely da Luz. *Forjando “máquina grande” nos sertões do Atlântico: dimensões centro-africanas na história da exploração das minas de Ipanema e na instalação de uma Real Fábrica de Ferro no morro do Araçoiaba (1597-1810)*. Dissertação (Mestrado), UNICAMP, Campinas, 2020.

PERCY, John A *Treatise on Metallurgy*, vol. ii. 'On Iron and Steel,' p. 610 *Styrian Process*, 1864, p. 112.

RIBEIRO, Mariana Alice Pereira Schatzer. *Entre a fábrica e a senzala*. Ed. Alameda, 2016.

SANTOS, N. P. *A fábrica de ferro São João de Ipanema: economia e política nas últimas décadas do Segundo Reinado (1860-1889)*. Ed. Multifoco, Rio de Janeiro, 2013.

SEQUEDA LEÓN, E. M. Caracterização metalográfica de barras de ferro da Fábrica de Ferro de Ipanema da coleção do Museu Nacional. Trabalho de Formatura. Escola Politécnica da USP, 2015.

TUNNER, P. *Die Stabeisen- und Stahlbereitung in Frischherden, oder, Der Wohlunterrichtete Hammermeister*, Engelhardt, Freiberg 1858

TYLECOTE, R.F. *A History of Metallurgy*. Ed. Institute of Materials. 2a ed. 1992 (p.104)

VON IHERING, A. *Die Gebläse*. Springer Verlag. 1903. (p. 326)

ZEQUINI, Anicleide. *Arqueologia de uma fábrica de ferro: Morro de Araçoiaba, Séculos XVI-XVIII*. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação do Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 223 p.