

GABRIEL COSTA FARIA

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL PARA A  
MODELAGEM DA REAL FÁBRICA DE FERRO DE IPANEMA NO PERÍODO  
DE ADMINISTRAÇÃO DE VARNHAGEN

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Engenheiro

São Paulo  
2018

Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais da  
Escola Politécnica da USP

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

2923181

TF - 2018

F226 u

AD2018

**DEDALUS - Acervo - EPMT**



31800009429

**Catalogação-na-publicação**

Faria, Gabriel Costa

Utilização de ferramentas de fabricação digital para a modelagem da Real Fábrica de Ferro de Ipanema no período de administração de Varnhagen / G. C. Faria -- São Paulo, 2018.

103 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Real Fábrica de Ferro de Ipanema 2. Fábrica de Ferro São João do Ipanema 3. História da Metalurgia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

## AGRADECIMENTOS

Ao meus pais, Osmar e Maristela, que sempre me incentivaram e deram suporte. À minha irmã Lays, que sempre me apoiou e ajudou nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao professor Dr. Fernando Landgraf pela orientação e apoio ao longo da elaboração deste trabalho. Agradeço também a Paulo Eduardo Martins Araújo pela grande ajuda. Agradecimentos aos professores Dr. Antonio Carlos Barossi e Dr. Marcelo Knörich Zuffo bem como ao Dr. Luciano Regalado e Emerson Moreto.

Agradeço por fim ao professor Dr. Paulo Edson Alves Filho e o professor Dr. Gildo Magalhães dos Santos Filho pela disponibilidade de participar da banca e pelas contribuições sobre este trabalho.

## RESUMO

Esta monografia apresenta a tecnologia siderúrgica que existia na Fabrica de Ferro São João de Ipanema, especificamente na época da administração de Varnhagen (1814 - 1821), que ocorreu durante a primeira revolução industrial. O desenvolvimento da metalurgia foi fundamental para que a revolução acontecesse, fornecendo em quantidade seu insumo mais importante: o ferro. Para tal são apresentadas as tecnologias de produção de ferro do período, em especial o alto-forno, bem como tecnologias adjacentes, como máquina insufladora, moinho, malho e fornos de refino. Foi feita uma pesquisa bibliográfica e documental da época para verificar informações relevantes para o trabalho. Foram modelados em CAD, os edifícios da fabrica bem como as máquinas que lá funcionavam, visando a construção de uma maquete virtual, bem como física, utilizando as ferramentas de manufatura digital disponíveis.

Palavras-chave: Real Fábrica de Ferro de Ipanema. História. Metalurgia.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Forja de Quatro Cadinhos . . . . .	14
Figura 2	Cadinho em funcionamento . . . . .	15
Figura 3	Trompa D'Água . . . . .	16
Figura 4	Forno Italiano . . . . .	16
Figura 5	Corte de alto-forno do século XVIII . . . . .	17
Figura 6	Preparação para fundição . . . . .	18
Figura 7	Vazamento do ferro . . . . .	19
Figura 8	Corte esquemático da parte inferior do alto-forno . . . . .	20
Figura 9	Interior da fundição . . . . .	20
Figura 10	Foles Movidos a roda d'agua . . . . .	21
Figura 11	Fole Sueco . . . . .	22
Figura 12	Foles . . . . .	22
Figura 13	Soprador cilíndrico de madeira . . . . .	24
Figura 14	Soprador cilíndrico com mecanismo de acionamento por manivelas . . . . .	25
Figura 15	Soprador cilíndrico . . . . .	25
Figura 16	Soprador com acionamento duplo . . . . .	26
Figura 17	Soprador cilíndrico de madeira instalado no alto-forno de Nassawango (Estados Unidos da América) . . . . .	27
Figura 18	Ventilador centrífugo . . . . .	28
Figura 19	Máquina sopradora a vapor instalada na fábrica de Blaenavon em 1800	29
Figura 20	Máquina a vapor instalada na Fábrica de Ferro Grazebrook, em Nether- ton, Inglaterra em 1817. . . . .	30
Figura 21	Moinho de Minério . . . . .	31
Figura 22	Moinho de Minério . . . . .	31
Figura 23	Detalhe das ponteira, do came do moinho de minério e da grelha de seleção . . . . .	32
Figura 24	Moinho de Eschwege pertencente ao museu do ouro em Sabará-MG . . . . .	33
Figura 25	Refino do Ferro . . . . .	33
Figura 26	Malho Hidráulico . . . . .	34
Figura 27	Operador preparando para jogar água no momento da martelada . . . . .	35
Figura 28	Tipos de roda d'agua: (a) alimentação subaxial; (b) alimentação so- breaxial; (c) pitchback e (d) alimentação pelo meio . . . . .	36
Figura 29	Perfil das aletas da roda d'agua . . . . .	37
Figura 30	O Ipanema em 1821 . . . . .	39

Figura 31	O Ipanema em 1821 - Ampliação no Edifício dos Alto Fornos . . . . .	40
Figura 32	Real Fábrica de São João do Ipanema - 21 de julho de 1823 . . . . .	40
Figura 33	Real Fábrica de São João do Ipanema - 21 de julho de 1823 - Ampliação do Edifício dos Alto Fornos . . . . .	41
Figura 34	Ipanema em 1827 . . . . .	41
Figura 35	Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Vista em Corte . . . . .	42
Figura 36	Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Vista Superior . . . . .	43
Figura 37	Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Encartada na Versão Alemã do Pluto Brasiliensis . . . . .	44
Figura 38	Vista Superior - Encartada na Versão Alemã do Pluto Brasiliensis de provável autoria de Rufino Felizardo . . . . .	45
Figura 39	Ipanema em 1890 . . . . .	45
Figura 40	Ipanema em 1890 - Ampliação do Edifício dos Alto Fornos . . . . .	46
Figura 41	Ipanema Vista das Oficinas - Década de 1870 . . . . .	46
Figura 42	Ipanema Vista das Oficinas - Década de 1870 - Vista dos Prédios Ampliada . . . . .	47
Figura 43	Ipanema Vista Geral tomada do lado Este - Década de 1870 . . . . .	47
Figura 44	Chapa da Dame . . . . .	48
Figura 45	Fornos Altos . . . . .	48
Figura 46	Fresadora Router CNC Etruska EK01 . . . . .	50
Figura 47	Deposição de Filamento Fundido . . . . .	51
Figura 48	Processo de manufatura por estereolitografia . . . . .	51
Figura 49	Chip DLP . . . . .	52
Figura 50	Estereolitografia DLP . . . . .	53
Figura 51	Desenhos 2D posicionados ortogonalmente . . . . .	54
Figura 52	Modelagem no Inventor <sup>TM</sup> . . . . .	55
Figura 53	Vista frontal do alto-forno . . . . .	56
Figura 54	Vista traseira do Alto Forno . . . . .	56
Figura 55	Perfis dos altos-fornos de Ipanema: (a) o AF desenhado a partir dos dados de Varnhagen no livro de Eschwege e (b) o AF desenhado por Dupré . . . . .	58
Figura 56	Entrada do Vazio Interior . . . . .	59
Figura 57	Aberturas do forno. (a) Desenho das plantas (b)Desenho modificado .	59
Figura 58	Corte do Forno . . . . .	60
Figura 59	Detalhe do alto-forno (arcobotante?) . . . . .	60

Figura 60	Modelagem do alto-forno . . . . .	61
Figura 61	Máquina sopradora - Vista Frontal . . . . .	62
Figura 62	Máquina sopradora - Vista superior . . . . .	63
Figura 63	Máquina sopradora - Versão 1 . . . . .	64
Figura 64	Máquina sopradora - Versão 1 - Vista superior . . . . .	65
Figura 65	Máquina sopradora de caixões horizontal . . . . .	65
Figura 66	Máquina sopradora - Versão 2 . . . . .	66
Figura 67	Máquina sopradora - Versão 2 - Vista Frontal . . . . .	67
Figura 69	Sopradora de foles do "Rural Life Centre"em Tilford, Inglaterra . . . . .	67
Figura 68	Máquina sopradora - Tipo 2 - Vista Superior . . . . .	68
Figura 70	Esquemático de mecanismo de conversão de movimento circular em linear com manivelas . . . . .	69
Figura 71	Soprador manual tipo "Fuigo" . . . . .	69
Figura 72	Planta da fábrica antiga de Hedberg com a inscrição "kastengebläse" .	70
Figura 73	Sopradores de pistões de madeira com acionamento por roletes . . . . .	71
Figura 74	Moinho de Minério . . . . .	72
Figura 75	Moinho de Minério - vista superior . . . . .	72
Figura 76	Moinho de minério desenhado . . . . .	73
Figura 77	no subsidios . . . . .	74
Figura 78	no Garney . . . . .	74
Figura 79	Roda d'agua desenhada . . . . .	75
Figura 80	Malho a vapor . . . . .	75
Figura 81	Malho hidráulico em funcionamento na Suécia . . . . .	76
Figura 82	Corte do Refino mostrando o malho . . . . .	77
Figura 83	Corte transversal do refino mostrando o malho e fornos de refino . . .	77
Figura 84	Malho - vista superior . . . . .	78
Figura 85	Forno de refino e sopradora - vista superior . . . . .	78
Figura 86	Malho desenhado . . . . .	79
Figura 87	Fole de refino . . . . .	80
Figura 88	Forno de refino . . . . .	81
Figura 89	Casa de fundição . . . . .	81
Figura 90	Casa de refino . . . . .	82
Figura 91	Casa dos pilões . . . . .	84
Figura 92	Coroa usada na aclamação de Dom João VI . . . . .	85
Figura 93	Coroa de ferro fundida na FFI . . . . .	86
Figura 94	Monumento - imagem provisória . . . . .	87

Figura 95	Aspecto geral do modelo . . . . .	88
Figura 96	Modelo da maquete com cortes . . . . .	89
Figura 97	Protótipo de impressora estereolitográfica DLP usada . . . . .	90
Figura 98	IIUsinagem de PVC expandido . . . . .	91
Figura 99	Peças usinadas . . . . .	92
Figura 100	Peças usinadas . . . . .	92
Figura 101	Peças usinadas - detalhe do edifício da fundição . . . . .	93
Figura 102	Impressão 3D por processo FDM . . . . .	93
Figura 103	Modelo da roda da sopradora com suportes para impressão . . . . .	94
Figura 104	Impressão SLA . . . . .	94
Figura 105	Impressão do moinho em escala 1:100, por processo SLA . . . . .	95
Figura 106	Detalhe do edifício do refino na maquete finalizada . . . . .	96
Figura 107	Detalhe do monumento na maquete finalizada . . . . .	97
Figura 108	Maquete finalizada . . . . .	97
Figura 109	Maquete finalizada . . . . .	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DLP	Digital Light Processing
FFI	Fábrica de Ferro São João do Ipanema
SLA	Estereolitografia
UV	Luz Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	11
<b>1.0.1 Objetivos</b>	12
<b>1.0.1.1 Objetivo Geral</b>	12
<b>1.0.1.2 Objetivo Específico</b>	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	13
<b>2.1 BREVE HISTÓRIA DA FÁBRICA E CONTEXTO HISTÓRICO</b>	13
<b>2.2 TECNOLOGIA SIDERÚRGICA NOS SÉCULOS XVIII E XIX</b>	13
<b>2.2.1 Produção de ferro</b>	14
<b>2.2.1.1 Método dos Cadinhos</b>	14
<b>2.2.1.2 Método Italiano</b>	15
<b>2.2.1.3 Alto-forno</b>	17
<b>2.2.2 Alto-forno</b>	17
<b>2.2.3 Máquinas Sopradoras</b>	21
<b>2.2.3.1 Foles</b>	21
<b>2.2.3.2 Soprador de Widholm ou Fole Sueco</b>	21
<b>2.2.3.3 Soprador cilíndrico de madeira</b>	23
<b>2.2.3.4 Ventilador centrífugo</b>	28
<b>2.2.3.5 Máquinas sopradoras a Vapor</b>	28
<b>2.2.4 Moinho de Minério</b>	30
<b>2.2.5 Refino e Malho Hidráulico</b>	34
<b>2.2.6 Rodas d'água</b>	35
<b>2.2.6.1 Alimentação Subaxial</b>	35
<b>2.2.6.2 Alimentação Sobre Axial</b>	36
<b>2.2.6.3 Alimentação Pitchback</b>	36
<b>2.2.6.4 Alimentação pelo meio</b>	37
<b>2.3 HISTÓRIA DA FÁBRICA DE FERRO SÃO JOÃO DO IPANEMA</b>	37
<b>2.3.1 Fábrica no Período de Varnhagen</b>	39
<b>2.3.2 FFI em períodos posteriores</b>	43
<b>2.4 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL</b>	49
<b>2.4.1 Métodos de manufatura Extrativa</b>	49
<b>2.4.1.1 Fresadora CNC Router</b>	49
<b>2.4.1.2 Cortadora a laser</b>	49
<b>2.4.2 Manufatura Aditiva (Impressão 3D)</b>	49

2.4.2.1	<i>Deposição de Filamento Fundido</i>	50
2.4.2.2	<i>Estereolitografia e Estereolitografia DLP</i>	50
2.4.2.3	<i>Sinterização Seletiva a Laser</i>	52
2.4.2.4	<i>Impressora de pós</i>	53
2.4.2.5	<i>PolyJet™</i>	53
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>		54
3.1	<b>ALTO FORNO</b>	56
3.1.1	<b>Chaminés</b>	57
3.1.2	<b>Perfil do forno</b>	58
3.1.3	<b>Entrada de carregamento do forno</b>	58
3.1.4	<b>Abertura Inferior do Forno - Dame e Timpe</b>	59
3.1.5	<b>Acabamentos</b>	60
3.2	<b>MODELAGEM DAS MÁQUINAS</b>	62
3.2.1	<b>Máquina Insufladora</b>	62
3.2.2	<b>Moinho</b>	71
3.2.3	<b>Rodas D'água</b>	73
3.2.4	<b>Malho</b>	74
3.2.5	<b>Fole Sueco e fornos de refino</b>	76
3.3	<b>MODELAGEM DOS EDIFÍCIOS</b>	77
3.3.1	<b>Casa de Fundição</b>	77
3.3.2	<b>Casa de Refino</b>	82
3.3.3	<b>Casa dos Pilões</b>	83
3.3.4	<b>Canal</b>	83
3.3.5	<b>Monumento</b>	85
3.4	<b>CONSTRUÇÃO DA MAQUETE</b>	87
3.4.1	<b>Escolha da Escala</b>	87
3.4.2	<b>Preparação do modelo para a manufatura</b>	87
3.4.3	<b>Divisão das peças em Manufatura Aditiva e subtrativa</b>	88
3.4.4	<b>Peças usinadas</b>	91
3.4.5	<b>Impressão 3D</b>	92
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>		99
<b>Referências</b>		100

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos trezentos anos a humanidade passou por três revoluções industriais, que geraram profundas transformações na sociedade e na economia. Especialmente a primeira revolução industrial foi um divisor de águas na história e quase todos os aspectos da vida cotidiana foram influenciados de alguma forma por esse processo.

A Primeira Revolução Industrial ocorreu entre 1789/1848 e não foi totalmente percebida até a década de 1830 ou de 1840, de acordo com Hobsbawm (1962). Um dos seus marcos é a construção do primeiro tear mecânico. Destaca-se a utilização da energia hidráulica e a vapor. A segunda aconteceu a partir de 1870, onde tivemos a a primeira linha de produção em massa de Henry Ford, com uso massivo de energia elétrica. A terceira, a partir da década de 1970 com o surgimento do primeiro Controlador Lógico Programável (CLP), com a utilização de sistemas eletrônicos juntamente com a automação da manufatura.

A 4<sup>a</sup> Revolução Industrial, acontecendo nos dias atuais, baseia-se nos sistemas ciber-físicos (KAGERMANN et al., 2012). Estes sistemas ciber-físicos ocorrem com a integração das tecnologias digitais criadas na terceira revolução industrial com o mundo físico. A linha divisória de mundo digital e mundo físico está sendo apagada. Estão surgindo diversas tecnologias, como a Indústria 4.0, inteligência artificial, Big Data, Internet das Coisas, carros autônomos, realidade aumentada entre muitas outras.

Para essas tecnologias surgissem e fossem popularizadas foi necessário toda a fundação tecnológica criada pela revoluções industriais anteriores, desde a primeira, na qual máquinas movidas à água e a vapor ajudaram a mecanizar a produção, permitindo a fabricação sem precedentes de bens industrializados.

No início desta primeira revolução industrial foi fundamental o intenso desenvolvimento da metalurgia, com a criação de novos processos de fabricação para que as fábricas recém criadas tivessem insumos para trabalhar. Em especial, o desenvolvimento do alto-forno, foi fundamental para a produção em massa de ferro e aço. Sem ele, toda a revolução vinda a posterior não teria sido possível, já que é insumo básico para a fabricação de quase todos os bens cotidianos e bens de capital.

No Brasil, quem melhor representa a primeira revolução industrial é a Fábrica de Ferro São João do Ipanema (FFI), a primeira indústria a produzir ferro em escala industrial no hemisfério Sul. Em 1818, entrou em operação o seu primeiro alto-forno, cuja primeira corrida é o marco do início da revolução industrial no Brasil.

Uma maneira muito interessante de relembrar a nossa história é utilizar as tecnologias da presente revolução industrial, como a fabricação digital e a realidade virtual para contar um pouco de como foi este período de grande importância ao nosso país. Para isso este trabalho

se propõe.

### 1.0.1 Objetivos

#### 1.0.1.1 *Objetivo Geral*

Apresentar a Fabrica de Ferro de São João de Ipanema e o modo de produção de ferro através do Alto-forno e maquinários adjacentes na época da gestão de Vanhagen.

#### 1.0.1.2 *Objetivo Específico*

Para alcançar o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os métodos de produção de ferro durante a primeira revolução industrial;
- Discorrer sobre o método do Alto-forno;
- Apresentar os maquinários adjacentes utilizados para a produção de ferro no período;
- Identificar meios de prototipagem rápida;
- Modelar digitalmente o alto-forno, máquinas e edifícios.
- Apresentar uma maquete virtual da Fabrica de Ferro de São João de Ipanema.
- Apresentar uma maquete física da FFI.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BREVE HISTÓRIA DA FÁBRICA E CONTEXTO HISTÓRICO

A construção da Fábrica de Ferro São João do Ipanema ocorreu em plena primeira revolução industrial, onde o uso da roda d'água e máquina a vapor revolucionaram toda a maneira de produzir bens. O que antes era fabricado com intenso trabalho manual e em pequenas quantidades, passou a ser produzido em escala, aumentando a qualidade de vida da humanidade de maneira nunca antes vista.

O insumo mais importante, que permitiu a mudança no modo de vida da humanidade, é o ferro, que é usado direta ou indiretamente na produção de todos os bens cotidianos. Sua produção em grande escala foi primordial para o processo industrial.

Com a vinda da Família Real portuguesa ao Brasil em 1808, a cidade do Rio de Janeiro passou a ser a sede do Reino de Portugal e visando a produção de ferro, foi criada a fábrica de ferro São João do Ipanema, em 1810, sendo seu primeiro diretor Carl Gustav Hedberg. Hedberg não foi bem-sucedido em sua empreita, sendo substituído em 1815 pelo engenheiro alemão Ludwig Wilhelm Varnhagen que iniciou a construção do primeiro alto-forno.

### 2.2 TECNOLOGIA SIDERÚRGICA NOS SÉCULOS XVIII E XIX

Nos séculos XVIII E XIX a tecnologia siderúrgica estava em franca expansão, devido ao grande aumento da demanda por metais. Métodos tradicionais de produção estavam sendo substituídos por outros com maior produtividade.

De maneira a contemplar esses processos, nesse capítulo será abordado uma contextualização da produção de ferro nessa época feita através de 3 métodos: o método dos cadiinhos, o método italiano e o alto-forno.

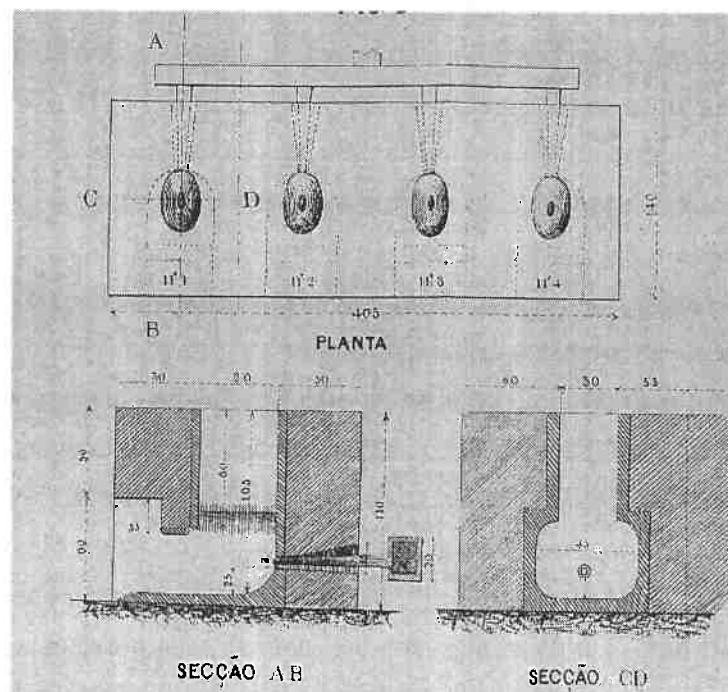
Desses três métodos este trabalho de conclusão de curso aborda com mais profundidade o método do alto-forno, considerado o mais importante por permitir uma produtividade muito maior e que continua sendo usado até os dias atuais. Para que esse assunto seja abordado são apresentados em tópicos os processos adjacentes que fazem com que o alto-forno tenha pleno funcionamento. Após a apresentação da tecnologia do alto-forno daquela época, será abordado sobre a Fábrica de Ferro de Ipanema e sobre a administração de Varnhagen.

## 2.2.1 Produção de ferro

No Brasil, antes da inauguração dos alto-fornos de Varnhagen em 1818 eram empregados métodos diretos para a produção do ferro, que permitem a transformação do minério para o metal sem passar pela fusão. Os métodos diretos receberam muitas denominações. O professor Ferrand (1885) da Escola de Minas de Ouro Preto sintetizou esses tipos em dois: Métodos dos Cadiinhos e o Método Italiano.

### 2.2.1.1 Método dos Cadiinhos

Figura 1 - Forja de Quatro Cadiinhos

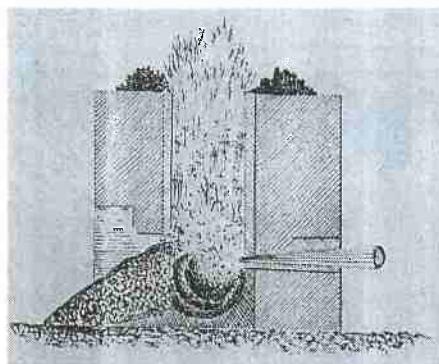


Fonte: (FERRAND, 1885)

O método dos cadiinhos é o método mais simples mas produz muito pouco ferro de cada vez. Consistia de uma forja de cadinho (Figura 1), que era um cubo de alvenaria com várias cavidades cilíndricas com base elíptica, tendo na parte de baixo duas entradas: uma abertura retangular que dá acesso à parte de baixo do cadinho, para saída da lupa de ferro e uma abertura para a entrada de ar (FERRAND, 1885).

O ar é fornecido por uma trompa d'água (Figura 3), que consiste de um tronco de árvore oco e uma caixa de ventos, na qual água passa por um estrangulamento (região 'E' na figura 3) que provoca uma baixa pressão relativa (efeito Venturi) que faz com que ar seja sugado do exterior,

Figura 2 - Cadiño em funcionamento



Fonte: (FERRAND, 1885)

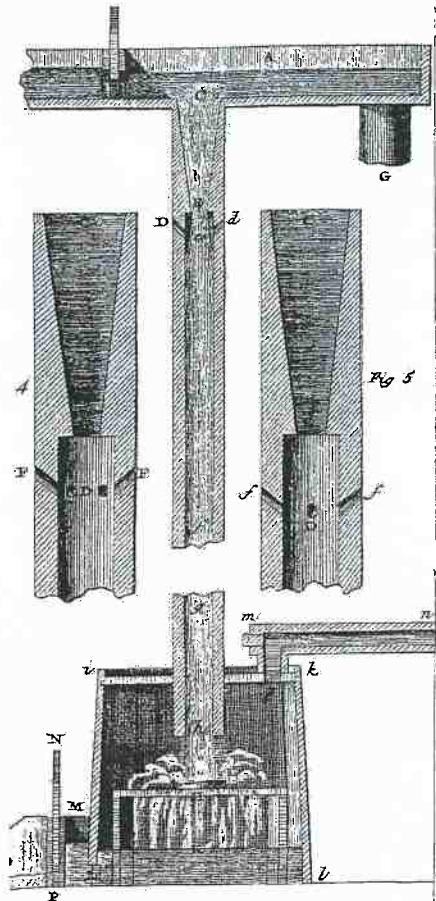
entrando por 'f'. Este ar se mistura com a água que cai pelo tubo, sendo posteriormente separados em uma câmara de separação (caixa de ventos), saindo a água por um lado e o ar pelo outro (SPONG, 1881). É um método que fornece um fluxo contante de ar, não possui partes móveis mas o ar soprado possui grande quantidade de umidade.

Na forja fazem-se 3 operações por dia com duração de 3 a 4 horas cada. Em cada operação utilizam-se cerca de 22kg de minério e 45kg de carvão vegetal para a obtenção de uma lupa de 15kg. A lupa é o produto resultante deste processo, que é uma massa esponjosa de ferro e escória que precisa ser refinada por martelagem hidráulica antes do uso. A operação é feita do seguinte modo: o operário prepara no fundo do cadiño um leito com uma mistura de areia e carvão fino, depois enche o cadiño de carvão até as bordas. Após cerca de 15 minutos é colocada a primeira carga de minério em pó (cerca de dois quilos), que cobre com carvão. A partir deste momento, pelas próximas duas horas, ele vai carregar a cada 5 ou 10 minutos, entre 1kg e 2kg de minério, sempre mantendo o cadiño cheio de carvão. Após isso, com o fogo já apagado, separa o leito de areia e carvão que fecha a abertura do fundo, retira as escórias que formam uma massa dura que envolve a lupa e retira esta última com um gancho (FERRAND, 1885).

#### 2.2.1.2 *Método Italiano*

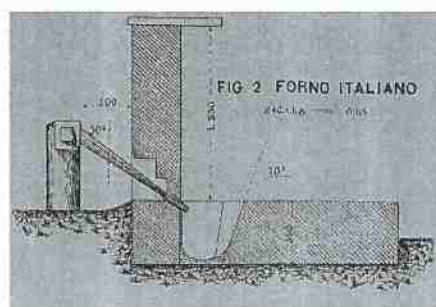
No processo de fabricação do ferro, designado por método italiano, que pouco se difere do método catalão, obtém-se um produto de melhor qualidade do que o método dos cadiños, fabrica-se em maior quantidade e com menor consumo de carvão, mas exige uma maior habilidade por parte dos trabalhadores. É uma variação do Método Catalão (FERRAND, 1885).

Figura 3 - Trompa D'Água



Fonte: (DIDEROT, 1762)

Figura 4 - Forno Italiano



Fonte: (FERRAND, 1885)

O forno italiano (Figura 4) consiste em uma cavidade aberta em um maciço de alvenaria junto de uma parede lateral construída em um dos lados do maciço. O lado do forno que está no pé da parede é vertical e é onde está a ventaneira. Os outros três lados são inclinados de 70 graus com a horizontal. Uma das faces laterais é composta de três chapas de ferro, sendo as

duas primeiras sustentadas na parte superior por meio de uma vara de ferro. No meio existem duas aberturas que servem para o escoamento das escórias. O vento é soprado por meio de uma trompa d'água.

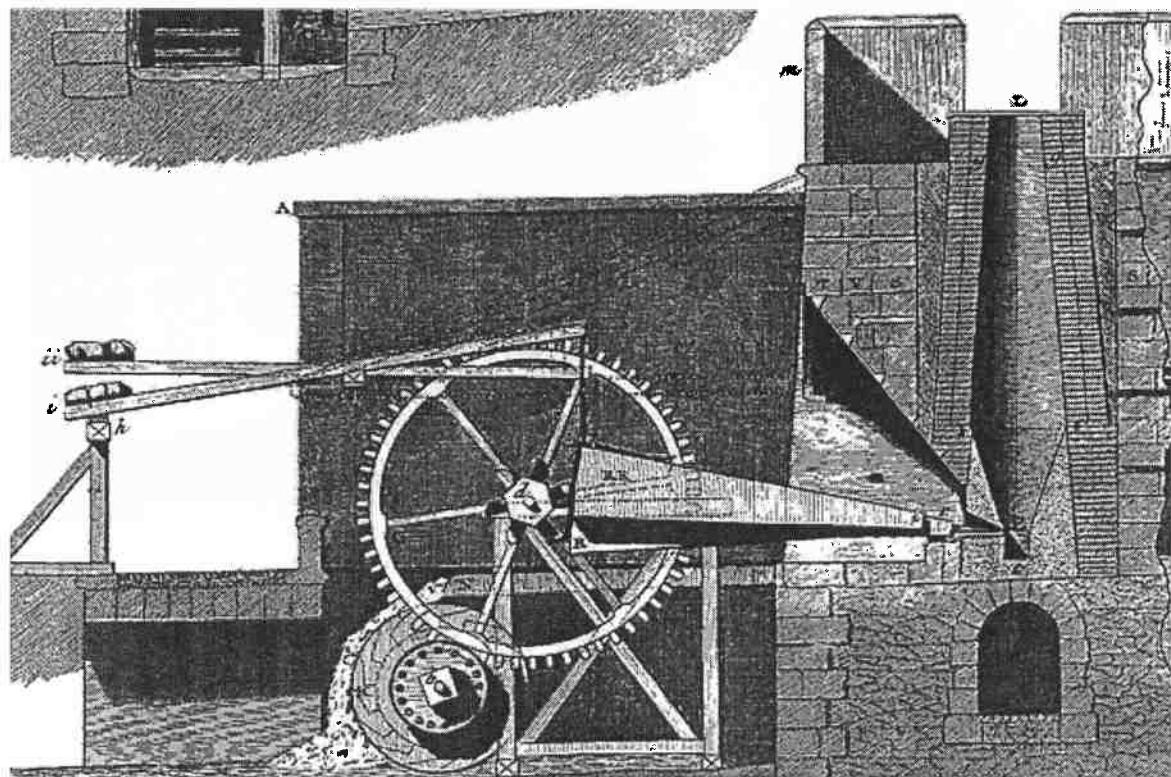
#### 2.2.1.3 *Alto-forno*

O alto-forno é o método de obtenção de ferro mais utilizado a nível mundial na época da construção de Ipanema, continuando a ser nos dias atuais. É um processo contínuo e produz ferro metálico líquido, ao contrário dos métodos anteriores. Tem uma produtividade muito maior. Por ser um processo muito importante, o próximo tópico o abordará com maiores detalhes.

#### 2.2.2 *Alto-forno*

O alto-forno é um processo contínuo de produtividade muito maior que os métodos diretos.

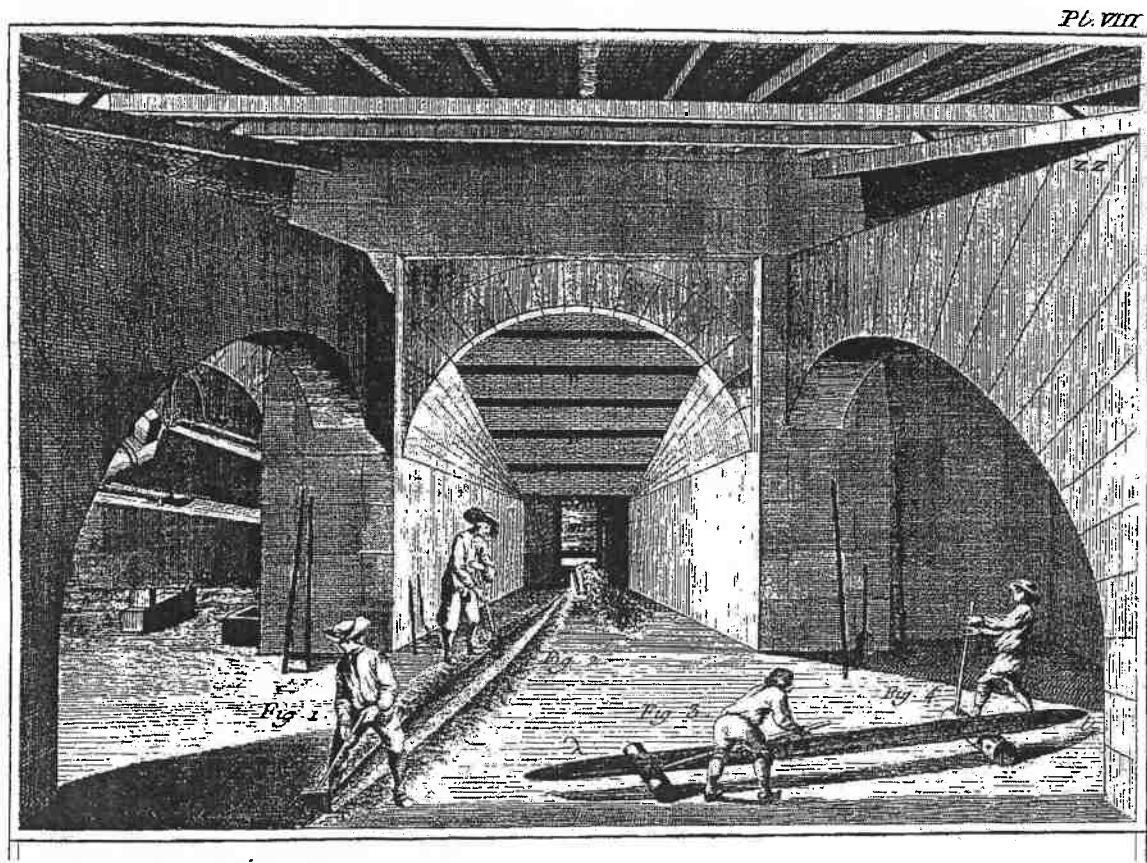
Figura 5 - Corte de alto-forno do século XVIII



Fonte: (BOUCHU, 1757)

A figura 5 mostra o corte de um alto-forno do século XVIII, conforme descrito na Encyclopédie organizada por Diderot. A altura é em torno de 7,6 metros de altura (25 pés). O vento é fornecido por um par de foles (RR na figura). Na goela do forno (L) são colocados carvão, minério de ferro e calcário. É mantido cheio, com a carga realizando fluxo descendente. Lentamente o carvão é consumido pelas chamas, reduzindo o ferro, que absorve carbono, funde e se acumula na parte inferior do forno (cadinho - E) sobre o qual boiam as escórias líquidas. A combustão é mantida pelo fluxo de ar forçado pelos foles. A vida útil é de cerca de 30 semanas, fim das quais ele tem que ser parado, esvaziado e reformado (DIDEROT, 1762) .

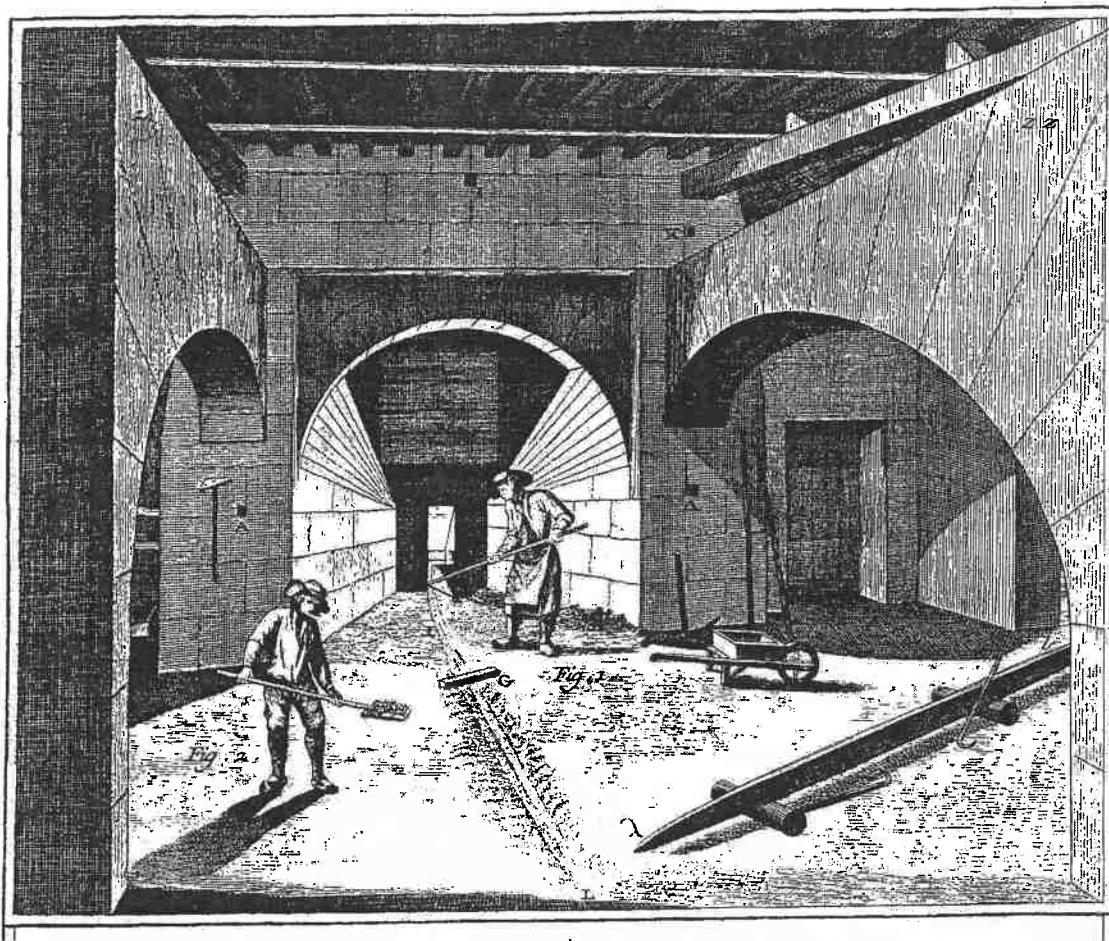
Figura 6 - Preparação para fundição



Fonte: (BOUCHU, 1757)

O ferro produzido pelo alto-forno era utilizado de duas formas principais: fundição de peças diretamente do forno ou fundido em formato de tarugos que eram vendidos para fundições para fabricação de peças em aço maleável. A figura 6 mostra a preparação para a fundição das barras, onde era feito um molde no chão de areia. Quando estava na hora do vazamento, era aberta a pedra que fechava o cadinho, e o ferro escoava para o molde (Figura 7) (DIDEROT,

Figura 7 - Vazamento do ferro



Fonte: (BOUCHU, 1757)

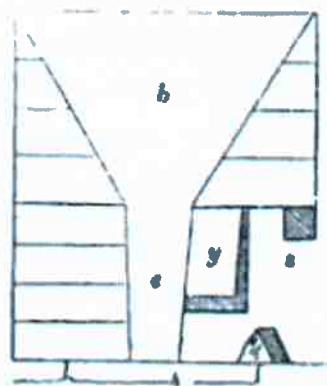
1762).

O ferro jorrado pelo forno vinha com uma camada de escória sobre ele. A separação desta era feita pela barra G da Figura 7. Com o ferro ainda incandescente, era jogado uma camada de cinzas sobre ele (subfigura 2 - Figura 7).

A pedra que fechava o coração do forno denominada Dame, que permitia que o grosso das escórias passasse sobre ela, enquanto o ferro fundido ficava no cadinho. A figura 8 mostra uma vista em corte da parte inferior de um alto-forno, no qual s é uma barra de ferro que suporta o peso do arco do forno; y é a pedra timpe, protegida por uma camada de ferro fundido (Timpe em gaulês significa entrega e designa a parte do forno onde o produto é entregue) e d é a pedra dame (APPLETON, 1852).

A figura 9 mostra a fundição de peças diretamente do forno. Para a fundição de peças pequenas, o ferro era retirado com uma ferramenta em formato de concha sobre a dame

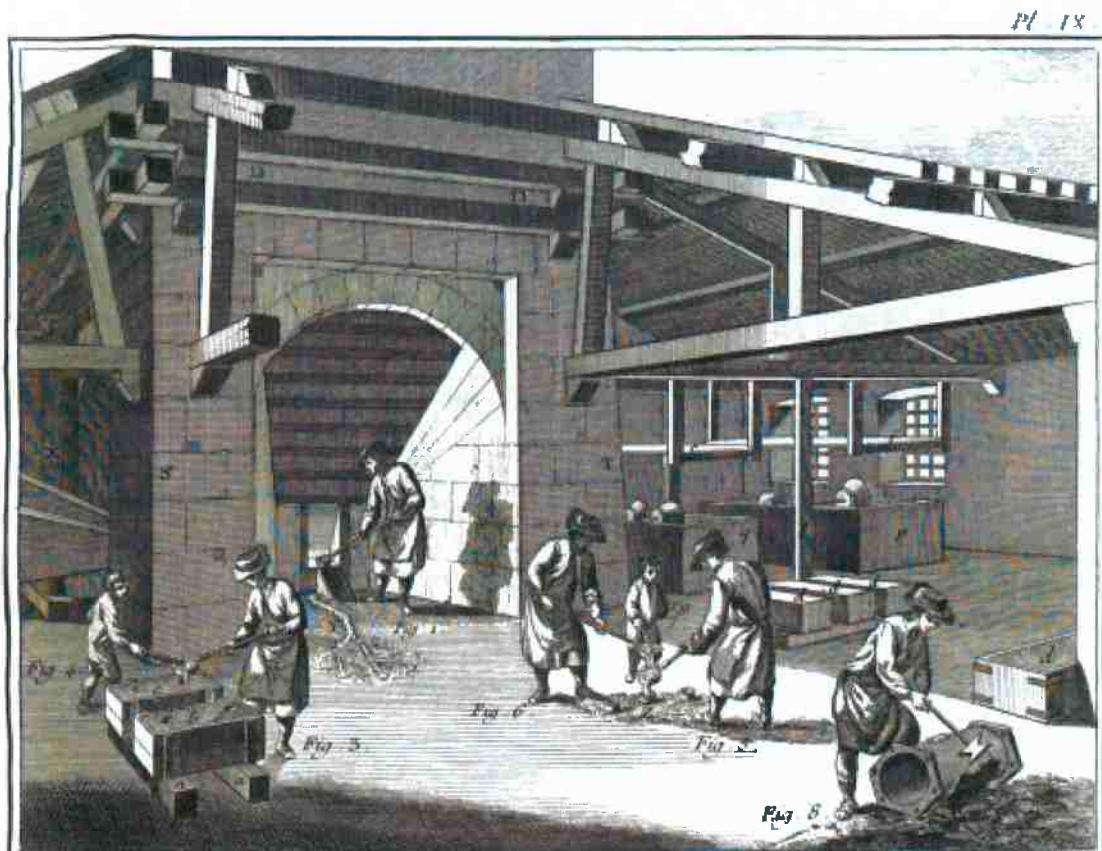
Figura 8 - Corte esquemático da parte inferior do alto-forno



Fonte: (APPLETON, 1852)

(subfigura 1) e fundido manualmente (subfiguras 4 e 7). As crianças que aparecem na imagem estão removendo as escórias (DURFEE, 1890).

Figura 9 - Interior da fundição



Fonte: (ALEMBERT, 1765)

### 2.2.3 Máquinas Sopradoras

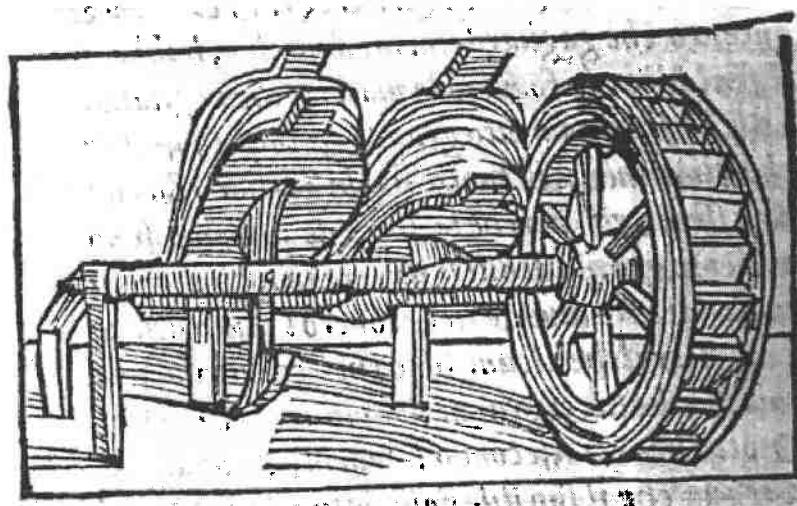
Existiam tipos diferentes de máquinas para soprar o ar para os fornos. Na Inglaterra já eram usadas as máquinas a vapor nesta função, mas no Brasil bem como no resto do mundo esta tecnologia não tinha sido implementada até o inicio das atividades na Real Fábrica de Ipanema.

As máquinas sopradoras que eram utilizadas dependiam do movimento das águas, sendo movimentadas por rodas d'água acopladas as mesmas. Dessa maneira serão abordadas as máquinas mais utilizadas no período, que são: foles; soprador de Widholm; soprador cilíndrico de madeira; ventilador centrífugo e máquinas sopradoras a vapor.

#### 2.2.3.1 Foles

O tipo mais simples de fole é feito de estrutura de madeira e fechamento em couro. Foi muito usada anteriormente ao século XVII, já que a parte móvel de couro se degastava rapidamente com o uso intensivo (OVERMAN, 1851). Podemos ver um exemplo deste fole na figura 10.

Figura 10 - Foles Movidos a roda d'água



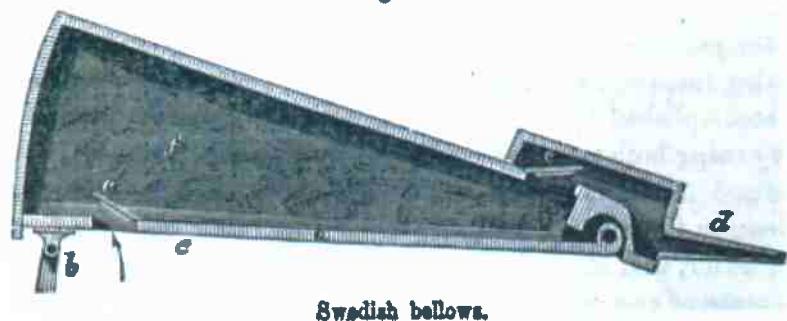
Fonte: (BIRINGUCCIO, 1559)

#### 2.2.3.2 Soprador de Widholm ou Fole Sueco

Este tipo de fole era chamado de soprador de Widholm ou fole sueco e extensivamente usado na Suécia, Rússia, Alemanha e França. Funcionava muito bem, durava bastante e seu custo era baixo (OVERMAN, 1851).

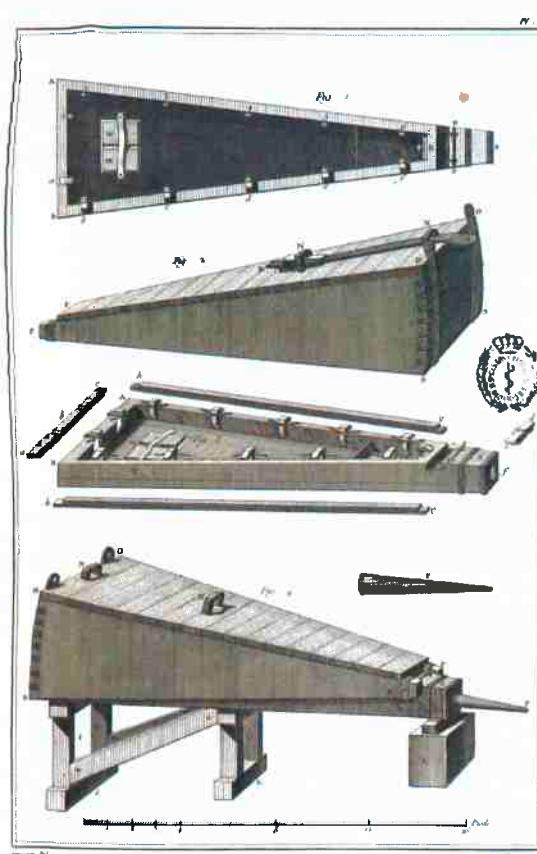
Figura 11 - Fole Sueco

Fig. 131.



Fonte: (OVERMAN, 1851)

Figura 12 - Foles



Fonte: (ALEMBERT, 1765)

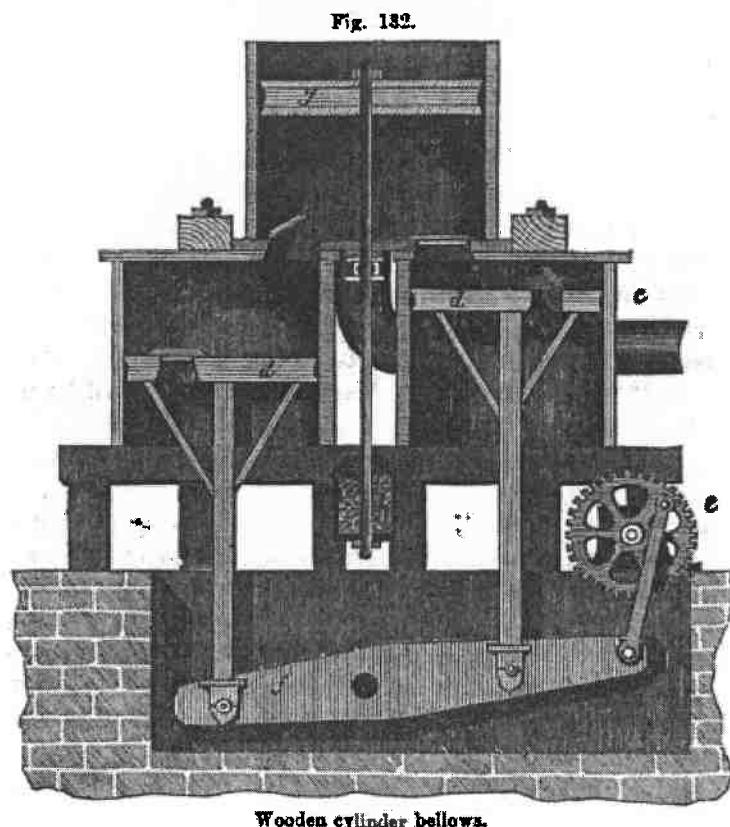
A Figura 11 mostra o seu funcionamento, as letras são: a é a parte móvel ou pistão; b é uma barra de ferro que era conectada à manivela da roda d'água ou máquina a vapor; c são as válvulas e d o bico. A parte superior é fixada em uma estrutura de madeira.

A aparência do fole remete a um modelo simples, embora seja inteiramente feito de madeira. Para funcionamento são acionados de dez a doze vezes por minuto e são necessários dois foles para cada fogo. O corpo tem de seis a sete pés de comprimento e trinta polegadas de altura, apresentando um comprimento de movimentação de doze polegadas. Este tipo de aparato é utilizado em forjas à carvão, por ser simples e barato (OVERMAN, 1851). A figura 12 também mostra este tipo de equipamento. Nota-se pela sua vista superior que o fechamento era reto e pela vista lateral que havia uma curvatura em sua parte traseira para permitir o movimento do foles.

#### 2.2.3.3 *Soprador cilíndrico de madeira*

O soprador cilíndrico de madeira podia ser de várias formas, com formato quadrado ou redondo e os pistões comprimindo do topo à base, da base ao topo ou ambos. Existiam cilindros verticais e horizontais e funcionavam com um, dois ou três câmaras com caixa seca de recebimento, recebimento com água ou sem recebimento. Funcionavam admiravelmente bem, se forem bem construídos, com boa durabilidade (OVERMAN, 1851).

Figura 13 - Soprador cilíndrico de madeira

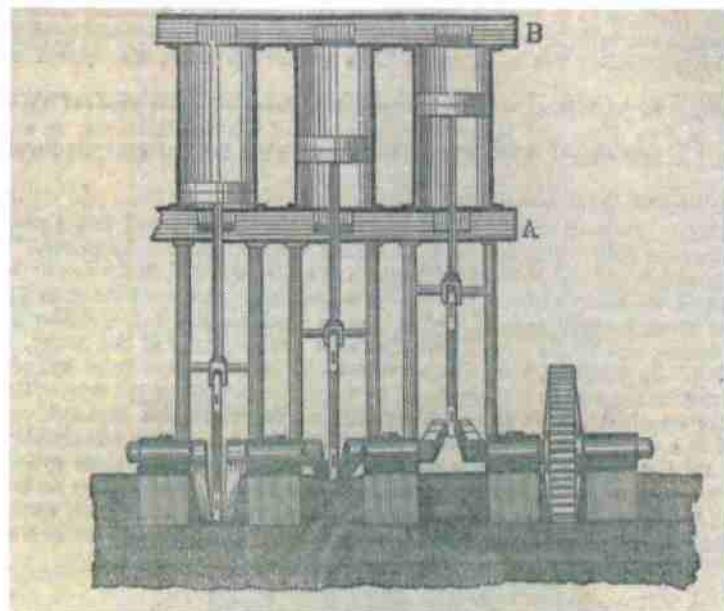


Fonte: (OVERMAN, 1851)

A figura 13 ilustra este tipo de equipamento, onde: (a) mostra os sopradores; (d) são os pistões, movidos alternativamente pela barra (f); que é colocada em movimento pelo volante (e). O volante é movido pela roda d'água ou máquina a vapor. O pistão (g) da caixa de recebimento é conectada á um peso (h); de rochas ou ferro que contrabalança a pressão do soprador, através do movimento de sobe e desce deste pistão. As válvulas são feitas de madeira revestida de couro (OVERMAN, 1851).

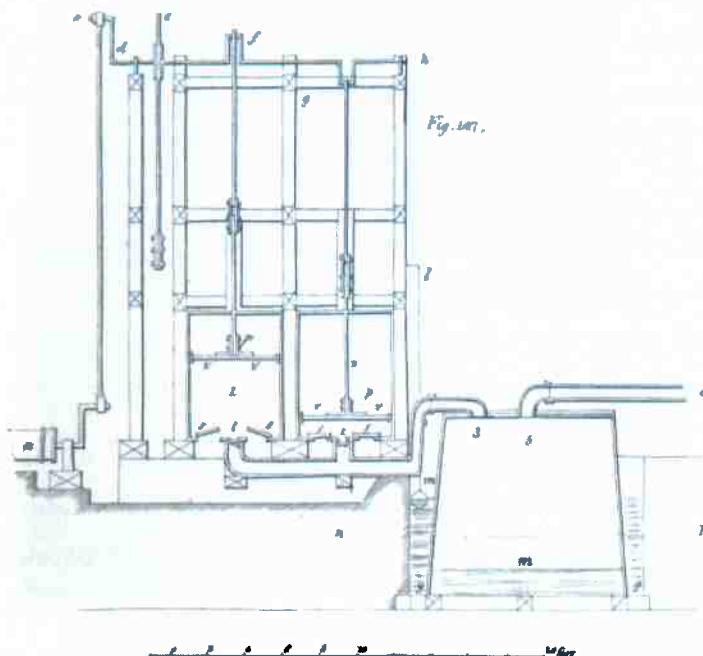
Os cilindros assim como a caixa de recebimento geralmente têm de 4 a 4,5 pés de comprimento e quatro pés de altura, com um movimento de três pés. São feitos de madeira de 1 a 1,5 polegadas de espessura. O interior é revestido com uma camada de cola e plumbago (um tipo de vegetal) que diminui a fricção e garante um ajuste mais apertado ao pistão. É um equipamento muito durável e funciona bem em alto-forno à carvão ou quatro a cinco forjas (do método dos cadinhos). É necessária uma potência de 12 a 16 cavalos-vapor para colocá-la em operação (OVERMAN, 1851).

Figura 14 - Soprador cilíndrico com mecanismo de acionamento por manivelas



Fonte: (OVERMAN, 1851)

Figura 15 - Soprador cilíndrico



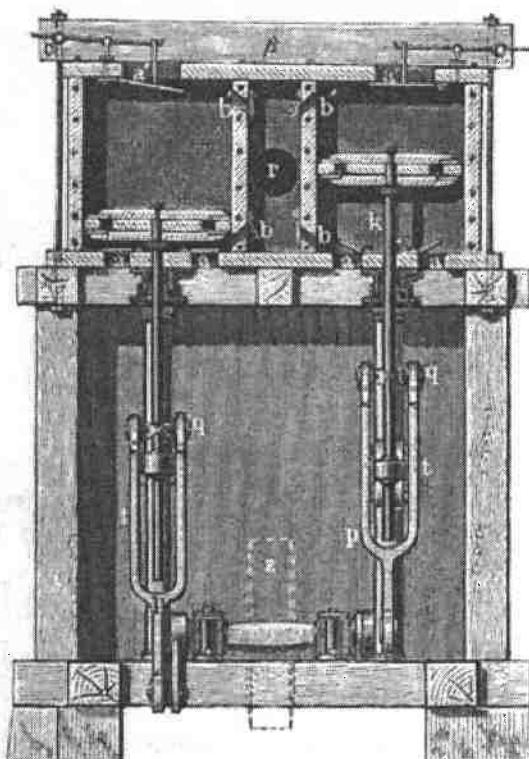
Fonte: (GRAY, 1830)

A figura 15 representa uma seção de um soprador com caixa de regulação. A máquina

possui dois cilindros: p é o pistão, revestido de couro e é feito para mover-se sob a ação de um eixo árvore a, movido sob a ação da roda d'agua; f é uma manivela de cotovelo que move as varas b e c. A caixa de regulação servia para manter o fluxo de ar constante.

O cilindro 1 está representado sendo preenchido com ar, pela abertura das válvulas s e fechamento da válvula t. O cilindro 2 é mostrado descendo e forçando o ar através da válvula t, entrando na tubulação, com a válvula de entrada, s fechada pelo seu próprio peso (GRAY, 1830).

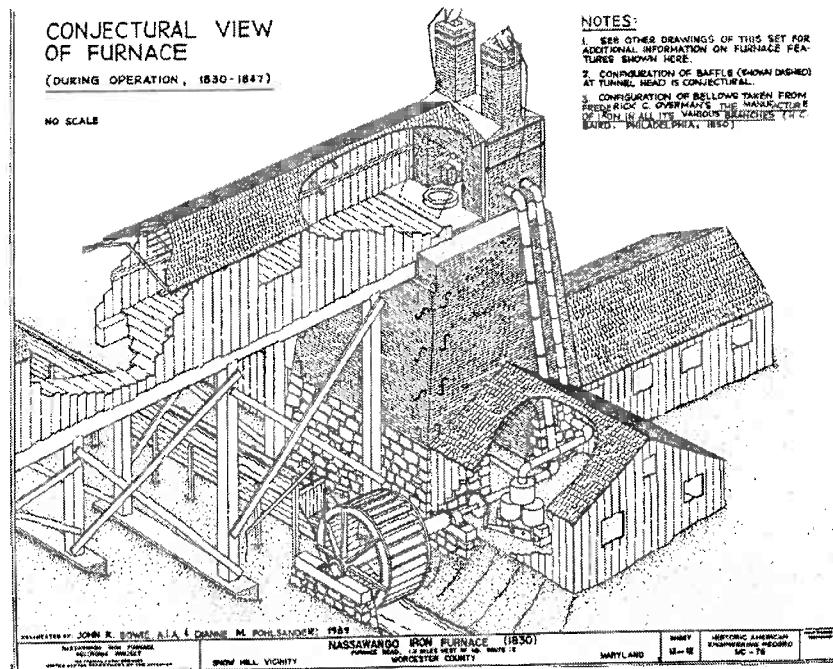
Figura 16 - Soprador com acionamento duplo



Fonte: (PERCY, 1868)

A figura 16 mostra um soprador duplo onde o ar é soprado quando o cilindro abaixa e quando sobe. Este mecanismo duplo era usado para manter o fluxo de ar mais linear, mesmo sem a caixa de regulação.

Figura 17 - Soprador cilíndrico de madeira instalado no alto-forno de Nassawango (Estados Unidos da América)



Fonte: (BOWIE; POHLSANDER, 1989)

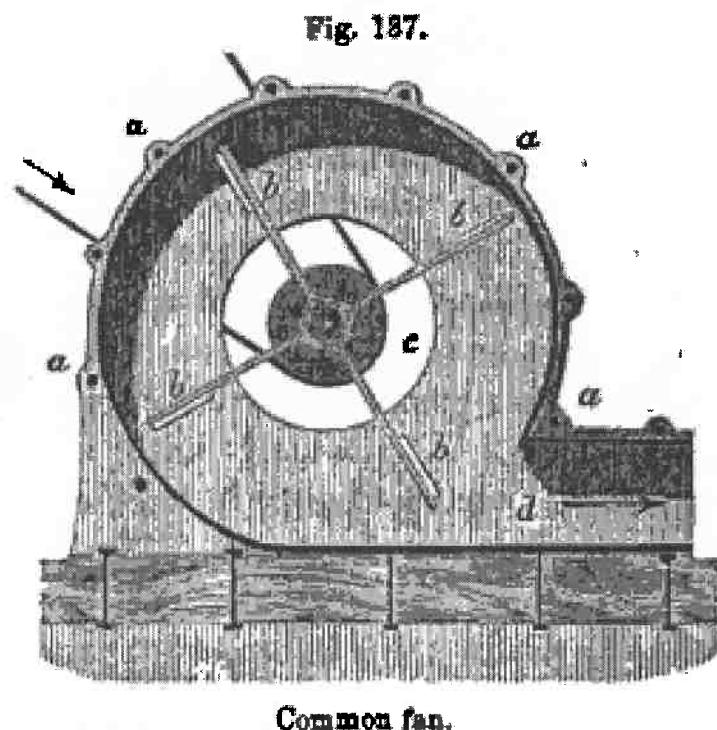
A figura 17 mostra um soprador cilíndrico de madeira instalado no alto-forno de Nassawango, no estado de Maryland nos Estados Unidos da América, construído em 1830.

Para que o alto-forno de Nassawango se tornasse mais rentável, a partir de 1837 foi utilizada a tecnologia "hot blast system" que estava sendo desenvolvida na Inglaterra, na qual o forno era alimentado com ar pré-aquecido oriundo de um trocador de calor instalado na parte superior do forno, que capturava a temperatura dos gases que deixavam o alto-forno. Isto fazia com que a combustão fosse acelerada e diminuísse a quantidade de carvão necessária para produzir uma dada quantidade de ferro, aumentando consideravelmente a produção (VERRILL, 2014).

Mas havia desvantagens: o vento não é constante, as vezes é mais forte que outras vezes e a fricção dos pistões é considerável (OVERMAN, 1851).

#### 2.2.3.4 Ventilador centrífugo

Figura 18 - Ventilador centrífugo



Fonte: (OVERMAN, 1851)

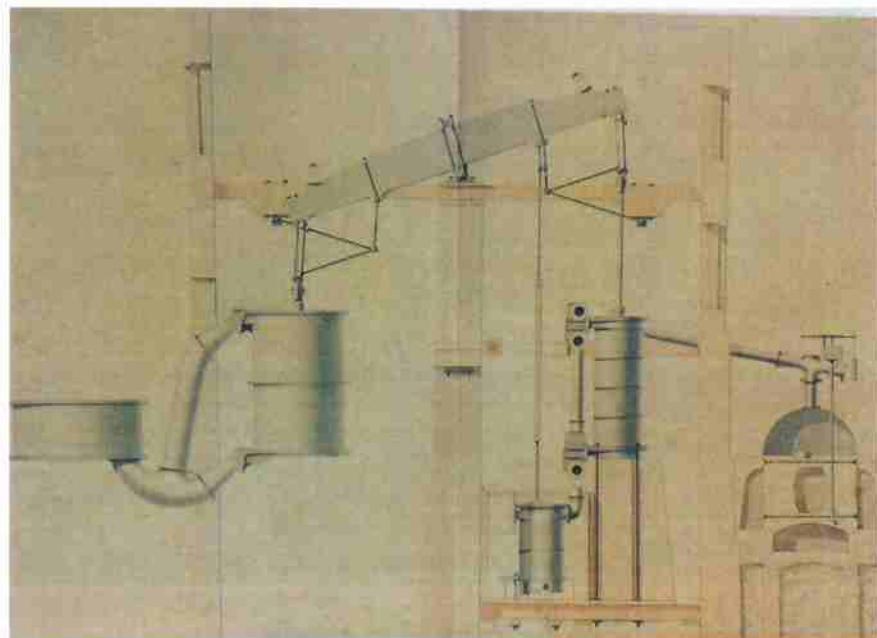
A figura 18 mostra um exemplo deste tipo de equipamento. Consiste em uma carcaça, dividida em duas partes, feita de ferro fundido, que são unidas através de parafusos. Sua largura varia de seis à 20 polegadas. O número de rotações por minuto tem que ser pelo menos 700, para uma pequena forja, ou mais de 1800 para uma maior. Para tal é necessário a instalação de um sistema para aumentar a rotação, com correias de couro ou borracha e polias de diferentes tamanhos.

#### 2.2.3.5 Máquinas sopradoras a Vapor

Na época da construção dos fornos de Varnhagen, a maioria dos alto-fornos em operação no mundo funcionavam com força hidráulica. Na Inglaterra em 1743 em Coalbrookdale foi instalado o primeiro dispositivo a vapor em uma fábrica de ferro, que era uma bomba d'água que retornava água para cima das rodas, para ajudar no suprimento da mesma. A primeira máquina sopradora de ar direta a vapor, foi instalada em 1776 na fábrica de ferro John

Wilksone's Willey, em Shropshire na Inglaterra (WAKELIN, 2006).

Figura 19 - Máquina sopradora a vapor instalada na fábrica de Blaenavon em 1800



Fonte: (WAKELIN, 2006)

A figura 19 mostra o desenho de uma máquina a vapor projetada por Boulton&Watt e foi instalada na fábrica de ferro Blaenavon, no Reino Unido em 1800. O projeto mostra um cilindro de 40 polegadas de diâmetro (1 metro) que aciona uma viga de balanço de 26 pés (7,9m). Ela foi demolida em 1860 (WAKELIN, 2006). A Boulton&Watt foi fundada pelo engenheiro escocês James Watt, considerado o "pai" da máquina a vapor e pelo empresário inglês Matthew Boulton e foi a maior fabricante de máquinas a vapor do século XIX.

Figura 20 - Máquina a vapor instalada na Fábrica de Ferro Grazebrook, em Netherton, Inglaterra em 1817.



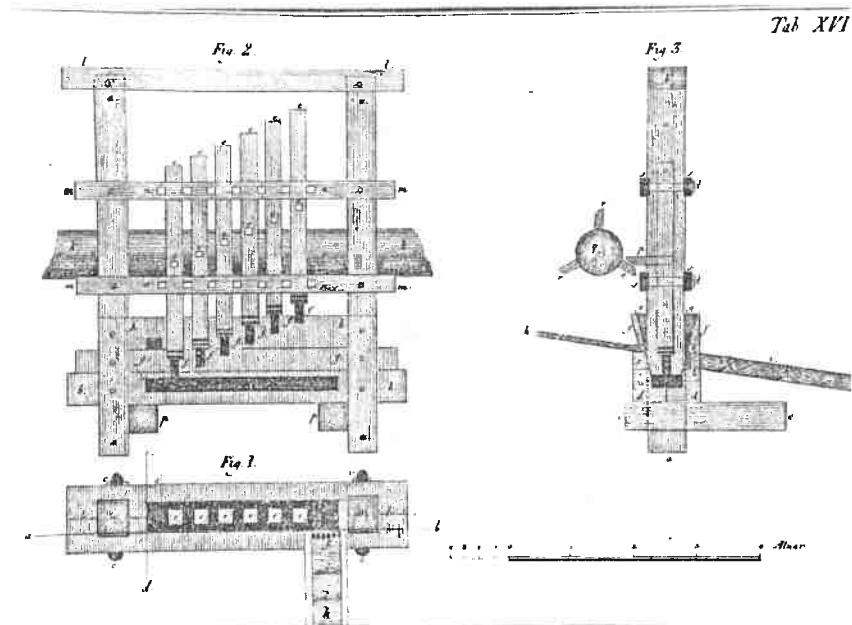
Foto por Elliott Brown em 2009

Um outro exemplo de sopradora projetada pela Boulton&Watt está na figura 20, que mostra uma máquina a vapor instalada na Fábrica de Ferro Grazebrook, em Netherton, Inglaterra em 1817, hoje exposta em Birmingham. Ela era feita de ferro fundido, pesava 10 toneladas, tinha 8 metros de altura e cilindros de 1,1m de diâmetro.

#### 2.2.4 Moinho de Minério

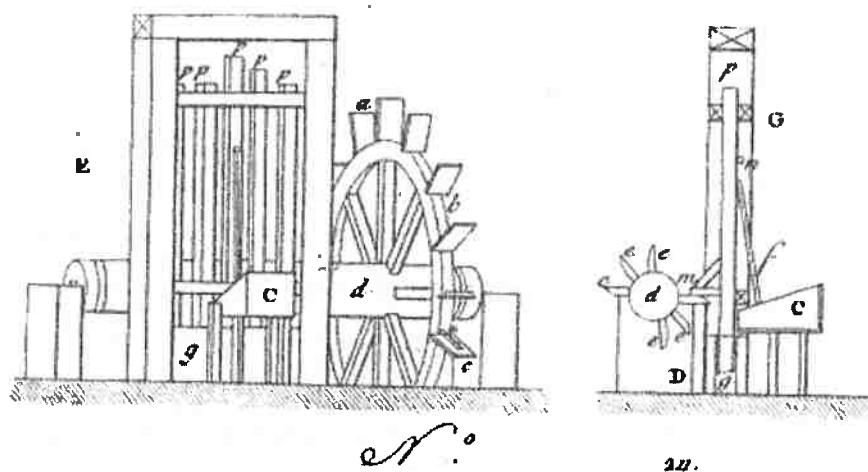
Após o minério ser extraído da mina ele era encaminhado ao moinho para que seu tamanho fosse reduzido para a alimentação do forno. Assim como as máquinas sopradoras, ele comumente era movido à força d'água.

Figura 21 - Moinho de Minério



Fonte: (GARNEY, 1816)

Figura 22 - Moinho de Minério

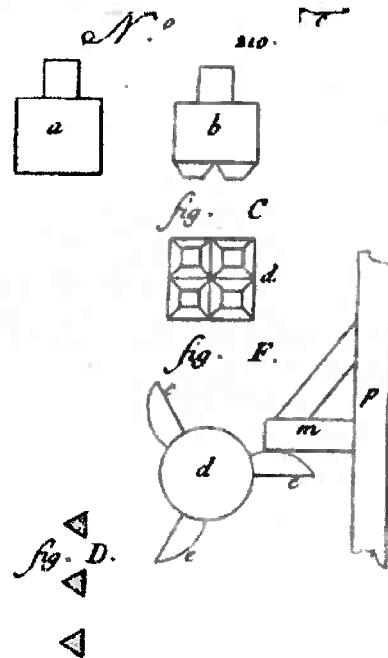


Fonte: (HASSENFRATZ, 1812)

Na figura 22, é apresentado à esquerda uma vista horizontal do moinho de minério e à direita uma secção vertical, onde: a, b, c) pás da roda d'agua; d) eixo da roda; e) cames que movimentam os pilões; m) haletas dos pilões; p) pilões de madeira que são levantados pelo came e que ao cair, quebram os minérios com seu próprio peso; C) caixa na qual é colocado o minério e a partir da qual é despejado na calha; F) alavanca que desativa o funcionamento do

moinho, quando não há minério para quebrar; g) calha na qual o minério triturado; D) grelha que seleciona o tamanho adequado dos pedaços de minério.

Figura 23 - Detalhe das ponteira, do came do moinho de minério e da grelha de seleção



Fonte: (HASSENFRATZ, 1812)

Na figura 23 são apresentados dois tipos de ponteiras de ferro fundido: a) ponteira plana; b e b) ponteira em formato de diamante. Na subfigura D, barras triangulares que formam a grade através da qual atravessa o minério triturado. Subfigura F) parte do eixo e pilão; d) secção vertical do eixo. (HASSENFRATZ, 1812)

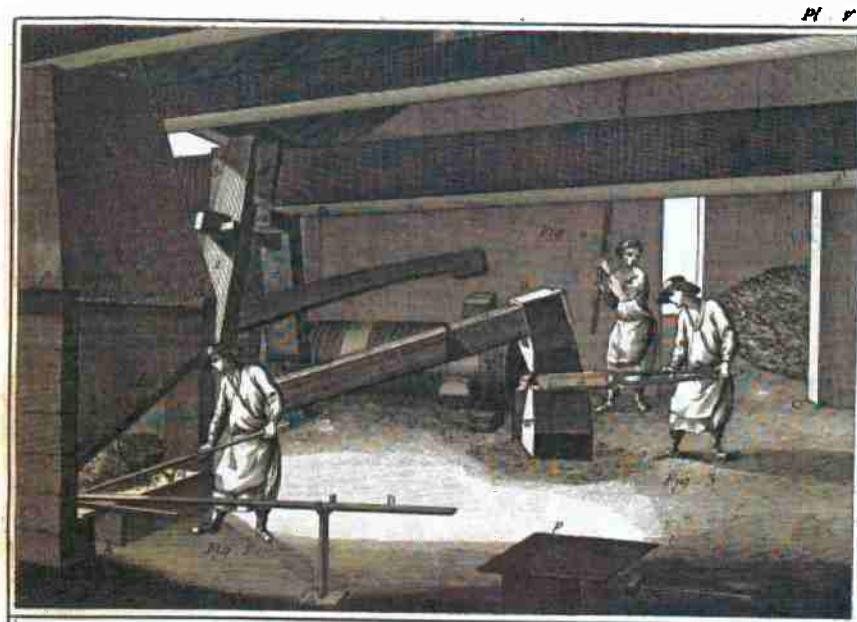
Este tipo de moinho era muito utilizado em Minas Gerais, a partir de 1825, na mineração do ouro para triturar o quartzito aurífero. Por lá, era denominado "Engenho de Eschwege" que levou o nome de seu inventor, o Barão de Eschwege. A fábrica de ferro de Monlevade, fábrica que utilizava o método Italiano de fabricação de ferro no Brasil no início do século XIX, tinha como principal produto fabricado cabeças de ferro desse tipo de moinho para atender a demanda local de cerca de 50 moinhos, cujas cabeças tinham que ser trocadas a cada 90 dias de serviço contínuo (GARCIA, 2017). No Museu do Ouro em Sabará existe um exemplar do Engenho de Eschwege (figura 24).

Figura 24 - Moinho de Eschwege pertencente ao museu do ouro em Sabará-MG



Foto: Divulgação TripAdvisor

Figura 25 - Refino do Ferro



Fonte: (ALEMBERT, 1765)

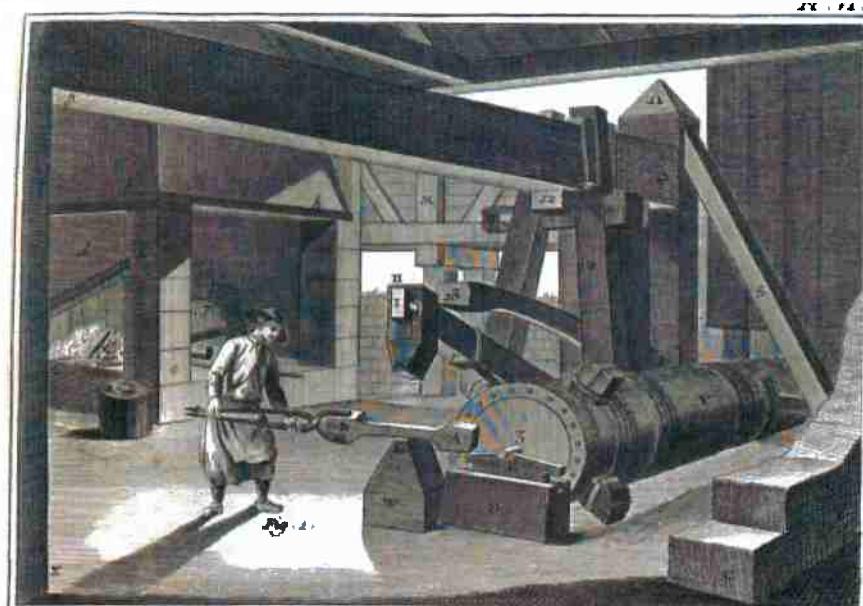
## 2.2.5 Refino e Malho Hidráulico

A produção de ferro batido era o segundo principal produto da indústria do século XVIII. As barras de ferro produzidas no alto-forno precisavam ser trabalhadas no malho hidráulico para tornarem-se maleáveis para serem usadas no forjamento de peças. A forja (Figura 25 - subfigura 1) é alimentada por carvão e com seu suprimento de ar fornecido por foles movidas à roda d'água, similares as do alto-forno mas muito menores. O refino consistia basicamente de bater o ferro, tirando progressivamente as impurezas até que ele alcançasse a maleabilidade desejada (DIDEROT, 1762).

A figura 26 mostra o processo com maiores detalhes. A fabricação do ferro batido exigia de quatro à cinco aquecimentos e forjamentos. O forjador colocava a barra de ferro a ser refinada sobre a bigorna (subfigura W) que recebia os golpes do martelo (subfigura H). Depois de cada batida o martelo era levantado por uma roda d'água e o contra-peso (subfigura 13) mantinha o martelo levantado. Um trabalhador atrás do forjador (Figura 25 subfigura 2) controlava o mecanismo de engrenamento do malho.

Os estabelecimentos usavam geralmente duas forjas, uma para o refino do ferro gusa e outra para o forjamento de objetos com o ferro já batido.

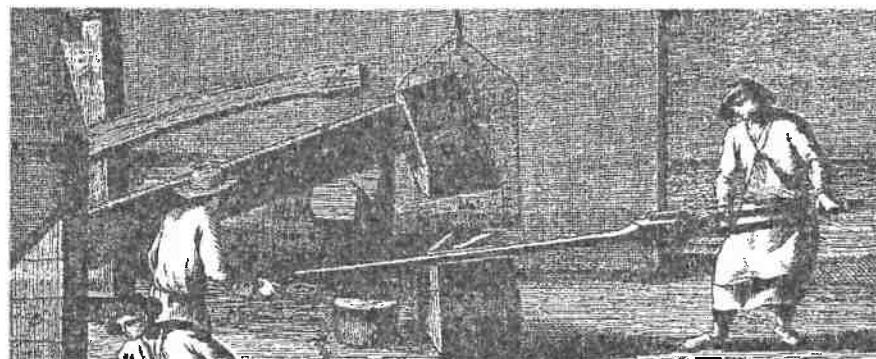
Figura 26 - Malho Hidráulico



Fonte: (ALEMBERT, 1765)

O mecanismo que levanta o martelo é mostrado na figura 26. O eixo árvore (subfigura Y) é amarrado com tiras de ferro e é acionado pela roda d'água fora do recinto.

Figura 27 - Operador preparando para jogar água no momento da martelada



Fonte: (DIDEROT, 1762)

Água era jogada sobre a barra de ferro (figura 27) para ajudar na saída das escórias, o que gerava um som de silvo, quase como um grito, da água transformando-se em vapor. Era colocada uma placa de ferro (subfigura HK) para proteger o eixo do calor.

O espaço do recinto de refino foi comparado por Diderot (1762) ao inferno, não somente pelo calor mas também pelo barulho dos foles, do gemido do eixo árvore, o barulho da queda do martelo e o silvo da água virando vapor.

## 2.2.6 Rodas d'água

As rodas d'água eram a fonte da energia para a movimentação da fábrica, que consistia no aproveitamento da energia cinética e potencial da água transformando-as em energia mecânica.

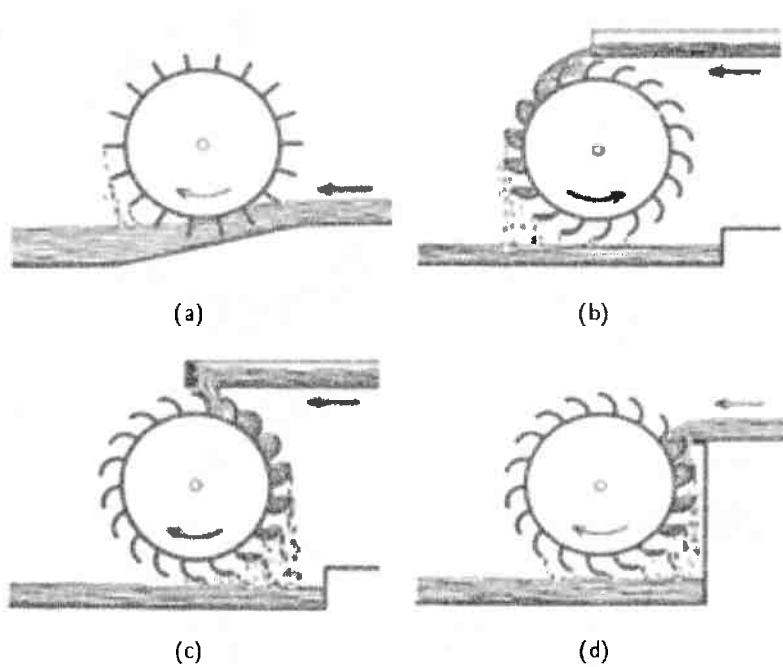
O projeto da roda d'água pode ser feito de diversas formas, algumas na horizontal e algumas na vertical. O tipo mais utilizado eram as verticais, que podiam ser divididas em quatro subtipos, dependendo da posição de entrada de água.

### 2.2.6.1 Alimentação Subaxial

Foi o primeiro tipo desenvolvido consistindo de uma roda vertical de madeira com haletas retas, igualmente espaçadas, e um eixo horizontal que com a força do fluxo de água, rotacionava a roda em uma direção tangencial ao fluxo.

As rodas subaxiais extraiam principalmente a energia cinética, uma vez que aproveitavam a velocidade da água. São usadas há milênios, desde os antigos gregos e egípcios, sendo muito usadas no império romano. Seu aproveitamento era em torno de 20% da energia total. (DONALDSON, 1876)

Figura 28 - Tipos de roda d'água: (a) alimentação subaxial; (b) alimentação sobreaxial; (c) pitchback e (d) alimentação pelo meio



Fonte: <http://www.whitemill.org>

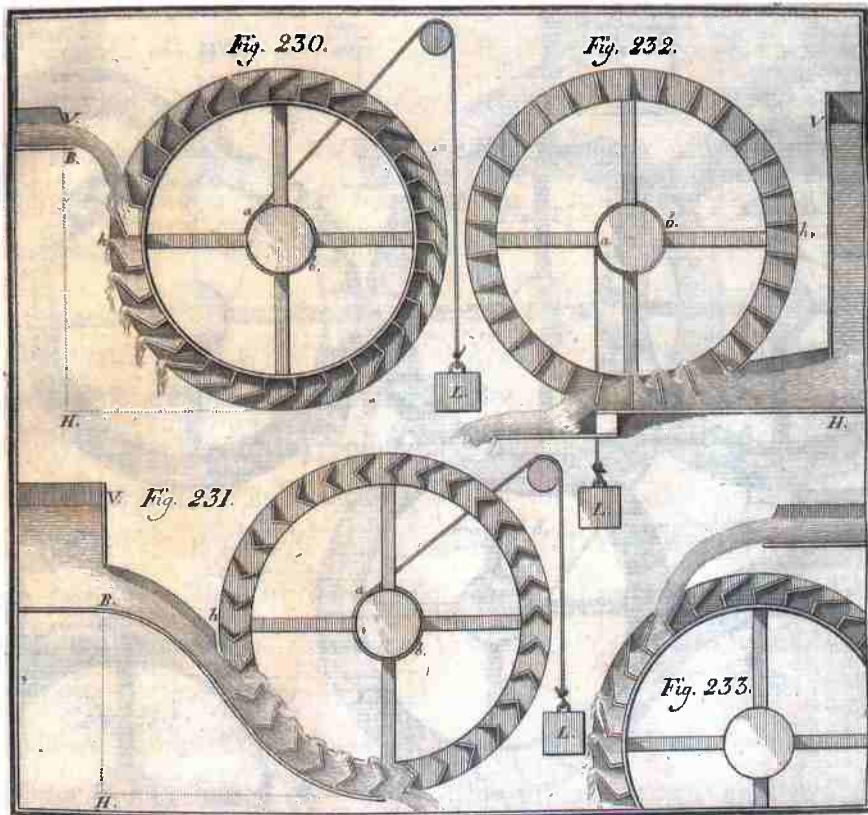
#### 2.2.6.2 Alimentação Sobre Axial

É o tipo mais comum de roda d'água, na qual a água é alimentada pela parte superior, tendo pequenas saliências que enchem-se de água e fazem a roda girar, pela diferença de peso entre um lado e outro da roda. Este tipo de roda extrai principalmente a energia potencial da água e é muito mais eficiente que a subaxial, necessitando de uma queda d'água para operar. A eficiência é entre 40% e 60%. Geralmente são construídas com o maior tamanho possível, para maximizar o braço de alavanca que faz a roda girar. Entretanto, rodas muito grandes adicionam complicações excessivas ao projeto devido ao peso da roda e da água. (DONALDSON, 1876).

#### 2.2.6.3 Alimentação Pitchback

É uma variação da alimentação sobre axial, que além de usar o peso da água para rotacionar a turbina, aproveita o fluxo perdido para gerar um torque extra na roda. Este tipo de roda usa um bocal angular na saída da água, mas ao contrário da sobre axial, a roda gira no sentido contrário ao fluxo de água, já que a alimentação é verticalmente para baixo. A eficiência é

Figura 29 - Perfil das aletas da roda d'água



Fonte: (NORDEWALL, 1794)

mais alta. A desvantagem é que o perfil da haleta deve ser do tipo *pentrough* o que torna a fabricação mais difícil (DONALDSON, 1876) .

#### 2.2.6.4 Alimentação pelo meio

Consiste na alimentação pela metade da roda d'água, e é usada onde a queda d'água é insuficiente para a alimentação superior. A desvantagem é que a água é usada somente em um quarto da roda, ao invés de metade, como na alimentação superior. Para contornar este problema, a largura da roda é maior (DONALDSON, 1876). O perfil das haletas varia muito, conforme vê-se na figura 29.

### 2.3 HISTÓRIA DA FÁBRICA DE FERRO SÃO JOÃO DO IPANEMA

Ao longo das décadas entre 1780 e 1810 a coroa portuguesa elaborou um plano siderúrgico para a implantação da siderurgia moderna nos territórios peninsular e ultramarino. A Fábrica

de Ferro São João do Ipanema foi um destes empreendimentos (LANDGRAF; ARAUJO, 2014).

A fábrica foi criada em 1810, por uma Carta Régia do Rei João VI. Foi criada como uma companhia de capital misto, para que a Coroa compartilhasse com particulares os custos da criação do empreendimento. Para dar início aos trabalhos, foi contratado o sueco Carl Gustav Hedberg, que chegou em 1811 trazendo consigo trabalhadores e maquinário para sua implantação. Hedberg foi o primeiro diretor, ficando no cargo de 1811 até 1814 (SANTOS, 2013).

O período foi marcado por problemas relacionados à baixa produtividade e ao não cumprimento da obrigação assumida por Hedberg de construir pelo menos um alto-forno (LANDGRAF, ARAUJO, 2014). O principal conflito foi com o engenheiro alemão Friedrich Varnhagen, representante dos acionistas, que afirmava que o diretor não tinha conhecimentos suficientes para montar uma fábrica de ferro de grande porte (SANTOS, 2013).

Devido aos problemas, Hedberg foi sucedido por Varnhagen, que deu início à construção de seus altos-fornos gêmeos, que passaram a funcionar em 1818. Ficou na fábrica até 1821, quando da volta de D. João VI para Portugal.

Após a saída de Varnhagen iniciou-se um período de decadência, assumindo a direção o topógrafo militar Rufino José Felizardo, que ficou até sua morte, em 1824. Em seguida, assumiu a diretoria o escrivão Antônio Xavier Ferreira. Após a abdicação de D. Pedro I em 1831, o Estado incorporou a fábrica, que passou a receber recursos do Governo Imperial anualmente. Os antigos acionistas foram indenizados (SANTOS, 2013).

Sucedeu-se um período com vários diretores, sendo o mais importante o Major João Bloem, que ficou à frente da companhia entre 1835 e 1842, e restaurou a fábrica.

Após uma fase de relativa prosperidade com Bloem, a fábrica passou ao declínio e ao abandono e entrou em elevado estado de degradação que durou até 1865. Neste período, devido ao mau estado do empreendimento, decidiu-se por encerrar as atividades em Sorocaba, transferindo grande parte do material e do pessoal para a fábrica do Mato Grosso, que perdeu-se no percurso (SANTOS, 2013).

Por iniciativa do Governo Imperial, que passou a ver a fabricação de ferro estratégica ao país, a fábrica foi reconstruída, sob a direção do capitão de engenheiros Joaquim de Souza Mursa, entre 1865 e 1890 e viveu um período de crescimento e investimento. As reformas introduzidas nos perfis internos dos altos-fornos dobraram a produção diária de ferro gusa. Neste período foi construído o terceiro alto-forno, que nunca entrou em operação (LANDGRAF; ARAUJO, 2014).

Em 1890 o diretor Mursa pediu exoneração para fazer parte do governo provisório instaurado em São Paulo com a proclamação da República. Com a República, ganhou força a possibilidade

de arrendamento ou fechamento da fábrica. Mas a fábrica nunca foi arrendada. A FFI teve suas atividades como empresa siderúrgica encerradas pelo Governo Republicano em 1895 (SANTOS, 2013).

Em 1895 a propriedade foi transferida para o Ministério da Guerra e se transformou em quartel e depósito. Em 1937 a área foi transferida ao Ministério da Agricultura, que realizou ensaios com sementes e máquinas agrícolas. Em 1992, visando a preservação de todo o complexo, a Floresta Nacional de Ipanema foi criada e passou a ser do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) (RODRIGUES, s.d.).

### 2.3.1 Fábrica no Período de Varnhagen

Friedrich Ludwig Wilhelm Varnhagen, engenheiro alemão nascido em 1783, cujo nome em português era Frederico Luis Guilherme de Varnhagen, foi o segundo diretor da FFI, cargo que ocupou de 1815 até 1821, período no qual foram construídos seus altos-fornos gêmeos. Era pai de Francisco Adolfo de Varnhagen conhecido como Visconde de Porto Seguro, considerado um dos fundadores da historiografia brasileira.

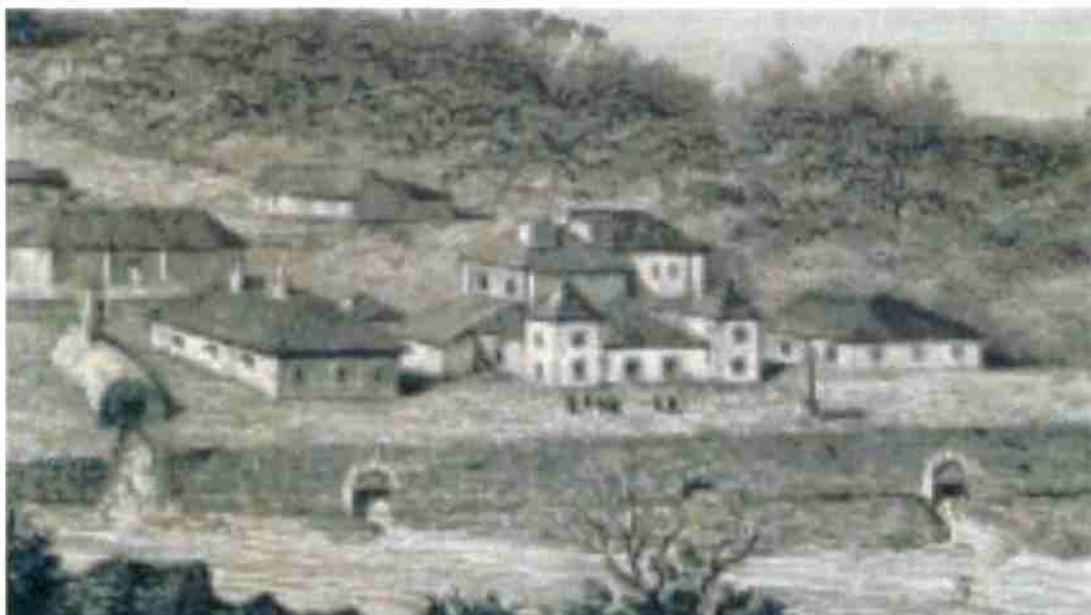
Figura 30 - O Ipanema em 1821



Gravura de Lemaitre (1821)

Existe uma gravura (figura 30) que retrata a FFI em 1821, realizada por Lamaitre, mas cujo

Figura 31 - O Ipanema em 1821 - Ampliação no Edifício dos Alto Fornos



Gravura de Lemaitre (1821)

autor do desenho original é desconhecido.

Figura 32 - Real Fábrica de São João do Ipanema - 21 de julho de 1823



Aquarela de Edmund Pink (1823), Acervo Coleção Bovespa

Em 1823 Ipanema foi visitada pelo viajante inglês Edmund Pink tendo vindo visitar a região açucareira de São Paulo. Ele produziu uma aquarela mostrando a fábrica e um diário de viagem citando-a (Figura 32) (GERBOVIC, 2009).

Há também uma aquarela (Figura 34) desenhada em 1827 por Jean-Baptiste Debret, integrante da Missão Artística Francesa que retratou diversas paisagens do fim do período colonial e início do Primeiro Reinado.

Mas ele não esteve em Ipanema, não sendo muito confiável sua representação. (LAND-



Pintura de Edmund Pink (1823), Acervo Coleção Bovespa

Figura 34 - Ipanema em 1827



Pintura de Debret (1827). Divulgação CPTM

GRAF, 2017, informação verbal <sup>1</sup>).

Existem também as plantas técnicas da FFI, do projeto inicial de Varnhagen que foram

<sup>1</sup>informação fornecida por Landgraf em palestra realizada na Pontifícia Universidade Católica de São Paulo em 2017

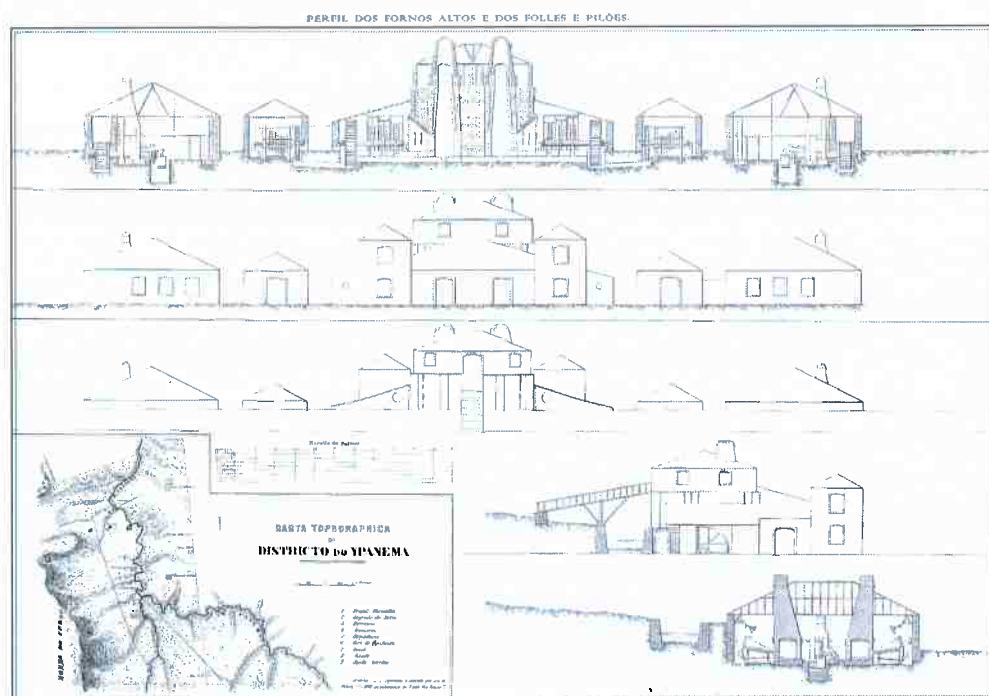
publicadas por Moraes em 1858 no livro "A História do Ypanema", figuras 35 e 36 e por Eschwege em 1833 na versão alemã do livro *Pluto Brasiliensis* (figura 37).

A versão alemã do *Pluto Brasiliensis* também possui uma imagem da vista superior da FFI (figura 38) de provável autoria de Rufino Felizardo. (Araujo, 2018, informação verbal <sup>2</sup>).

Existem também textos que falam da fábrica neste período, como "Memória Economica e Metalurgica sobre a Fábrica de Ferro de Ypanema", de José Bonifácio de Andrada e Silva, escrito em 1820 e os relatos do filho de Varnhagen, o célebre historiador Francisco Adolfo de Varnhagen, conhecido como Visconde de Porto Seguro, nascido na FFI em 1816, no livro "Historia Geral do Brazil" de 1854.

O relato mais interessante para conhecermos a FFI neste período é o inventário detalhado de todos os pertences incluindo edifícios, oficinas, armazéns, escravos, animais, máquinas, ferramentas e materiais realizado em 1821, quando da saída de Varnhagen da direção da fábrica. Muitos trechos deste inventário estão apresentados ao longo deste texto.

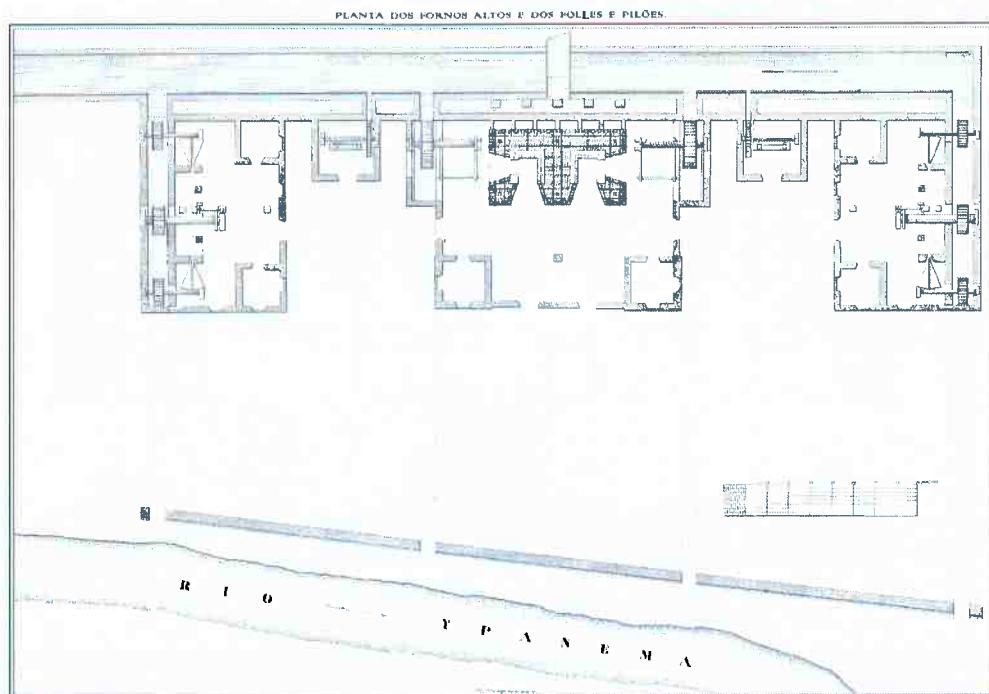
Figura 35 - Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Vista em Corte



Fonte: (MORAES, 1858)

<sup>2</sup>informação fornecida por Araujo, Paulo Eduardo Martins em palestra realizada na Flona de Ipanema sobre a administração Hedberg, em 19/05/2018

Figura 36 - Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Vista Superior



Fonte: (MORAES, 1858)

### 2.3.2 FFI em períodos posteriores

Em um artigo publicado nos Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, Leandro Dupré, em 1885, descreve muitos detalhes da FFI e de sua operação nesta época.

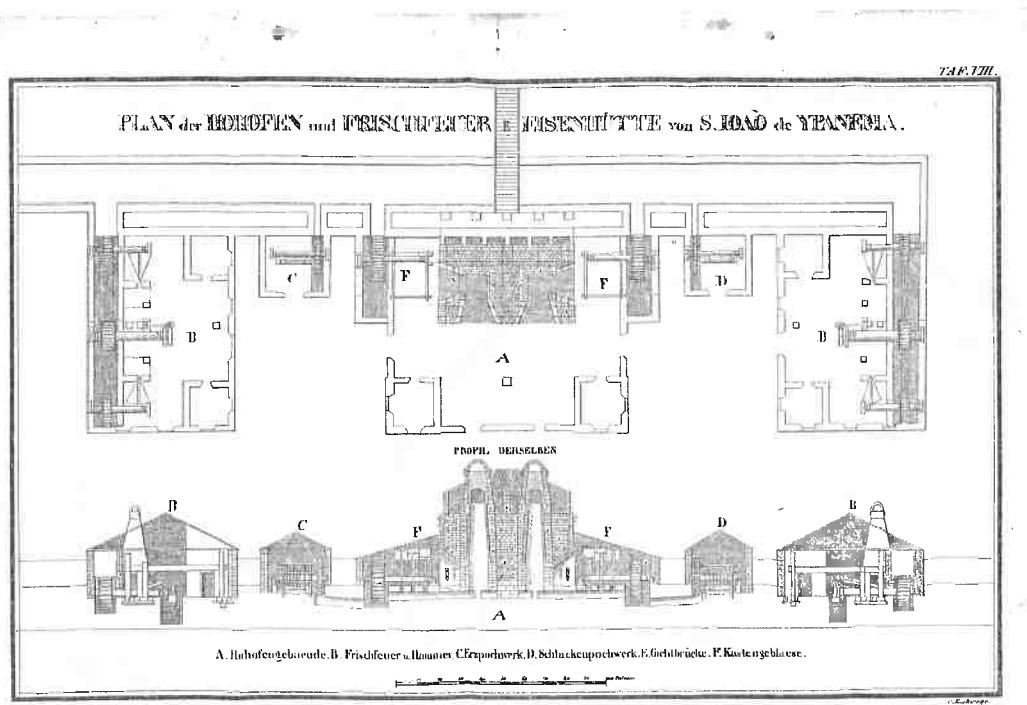
Mesmo sendo bem posterior, ele descreve o forno criado por Varnhagen, que ainda estava em operação.

"A Fabrica possue 2 fornos altos que funcionao alternadamente, enquanto um está em actividade o outro está em reparação e seccamento. A reparação consiste na mudança da camiza refractaria, do buxo para baixo. Só de cinco em cinco annos e que se torna necessário reformala toda. A camiza é feita do gres molle de que já tive occasião de fallar. Esta pedra substitue vantajosamente os tijolos refractarios, chegando muitas vezes a resistir a um trabalho de 12 mezes." (DUPRÉ, 1885, p.69)

Dupré relata também detalhes do funcionamento do forno, como a dame e a timpe, e o processo de retirada das escórias, conforme alguns trechos selecionados.

"Aquecido o forno fecha-se o cadinho com uma chapa fundida (figura 2 Est. III) [neste texto figura 44, página 48] tendo pela parte interna uma pedra refractaria de

Figura 37 - Perfil dos Fornos Altos e dos Foles e Pilões - Encartada na Versão Alemã do Pluto Brasiliensis



Fonte: (ESCHWEGE, 1833)

6 centímetros de espessura. A chapa forma a represa (plaque de dame) do forno. Na parte superior ha tres aberturas curvas, destinadas á sahida das escorias e uma outra na parte inferior por onde corre a fonte. Os antigos fórnos trabalhavão a peito aberto e em vez de chapa havia uma pedra cortada em declive na face superior, para a facil sahida das escorias, e a corrida da fonte fazia-se pelo lado." (DUPRÉ, 1885, p.70)

"As escorias (laitier) tirão-se pelas aberturas da represa com alavancas em forma de gancho (ringard). Quando nenhum incidente vem perturbar a marcha do forno, ellas são bastante líquidas e correm facilmente sem auxilio da alavanca. A frio tem uma bella cor azul mais ou menos carregada, outras com matizes diferentes lembrão a agatha. Se ha, porém, algum desarranjo na marcha, as escorias tornão-se pastosas, negras, sem aspecto vitreo e a limpeza do forno é um trabalho penoso. Algumas vezes aparecem escorias semelhantes á espuma, muito cavernosa e desprendendo emanações de gaz hydrogeneo sulphurado. Esta escoria é muito friável e reduz-se a pó facilmente sob a pressão dos dedos. A corrida da fonte tem logar de manhã, á tarde e á noite." (DUPRÉ, 1885, p.74)

Figura 38 - Vista Superior - Encartada na Versão Alemã do Pluto Brasiliensis de provável autoria de Rufino Felizardo

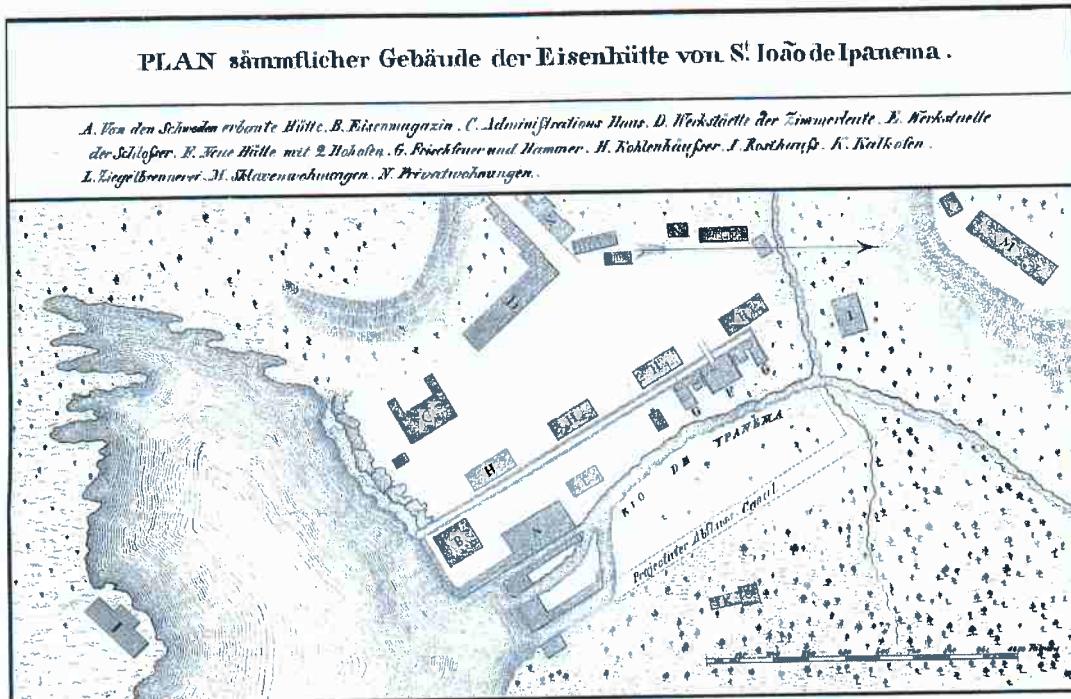


Figura 39 - Ipanema em 1890

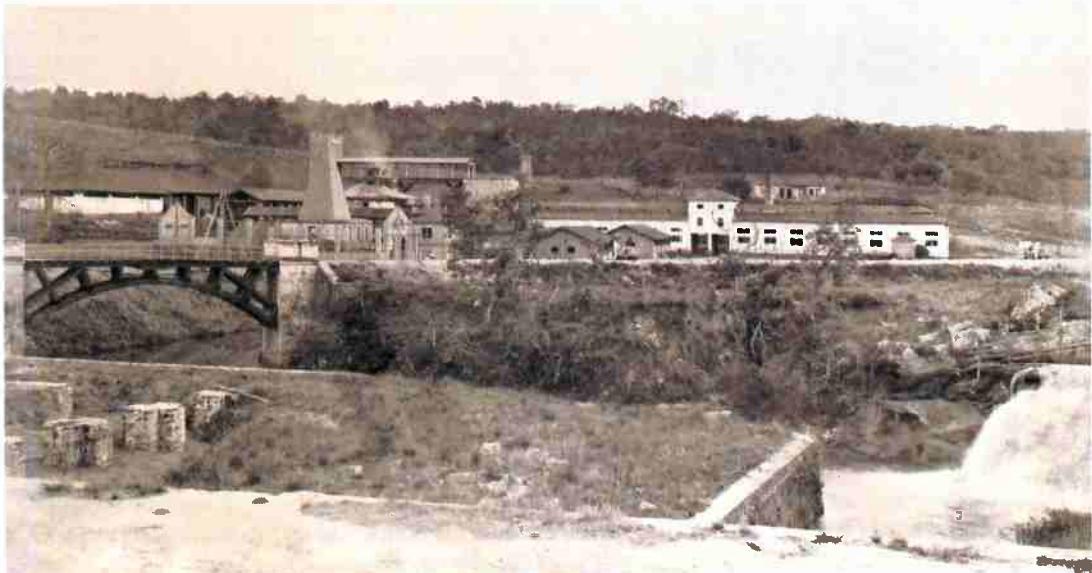


Foto: Fritz Büsch, coleção Gilberto Ferrez - IMS Fotografia

É descrito também um pouco do processo de vazamento do ferro.

"Os lingotes são moldados no chão da officina ao lado da abertura de trabalho; uma bica de ferro revestida internamente com terra de moldação comunica a saída da

Figura 40 - Ipanema em 1890 - Ampliação do Edifício dos Alto Fornos

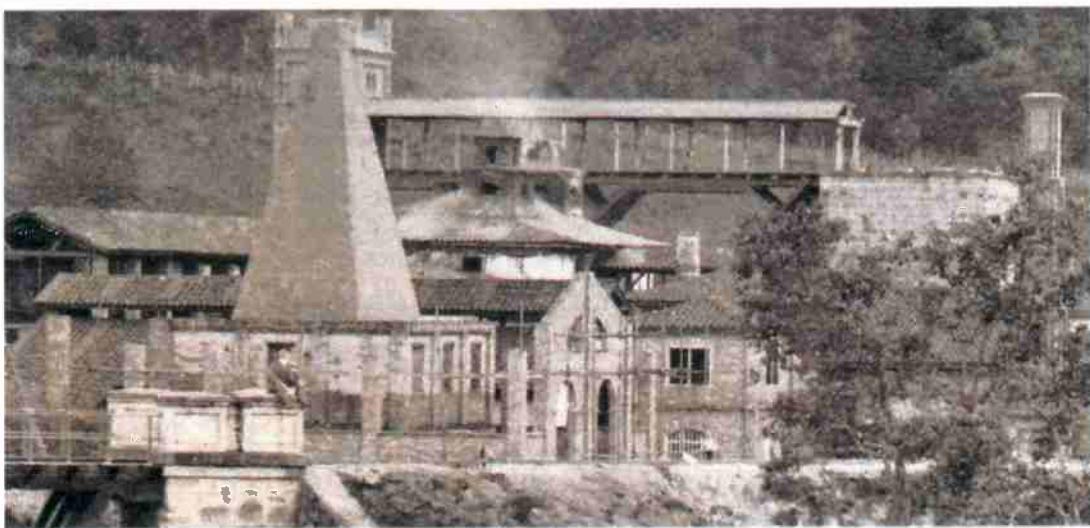


Foto: Fritz Büsch, coleção Gilberto Ferrez - IMS Fotografia

Figura 41 - Ipanema Vista das Oficinas - Década de 1870



Foto: Biblioteca Nacional (s.d.)

fonte na parte inferior da chapa da represa com os moldes.

O operário, com uma alavanca terminada em ponta, fura o tampão de barro e a fonte corre pela bica distribuindo-se nos moldes. Quando todo o molde está cheio um novo tampão de 10 a 12 centímetros de altura, cm forma de cone e que está sobre uma verga de ferro terminada por uma pequena chapa redonda, é adaptado na abertura de corrida tapando-a perfeitamente. O tampão é feito de barro argiloso, azeite e carvão em pó, tudo isto numa massa homogênea. Se a fonte é destinada á fundição de peças differentes, ella é então recebida da bica de ferro em caçambas

Figura 42 - Ipanema Vista das Oficinas - Década de 1870 - Vista dos Prédios Ampliada

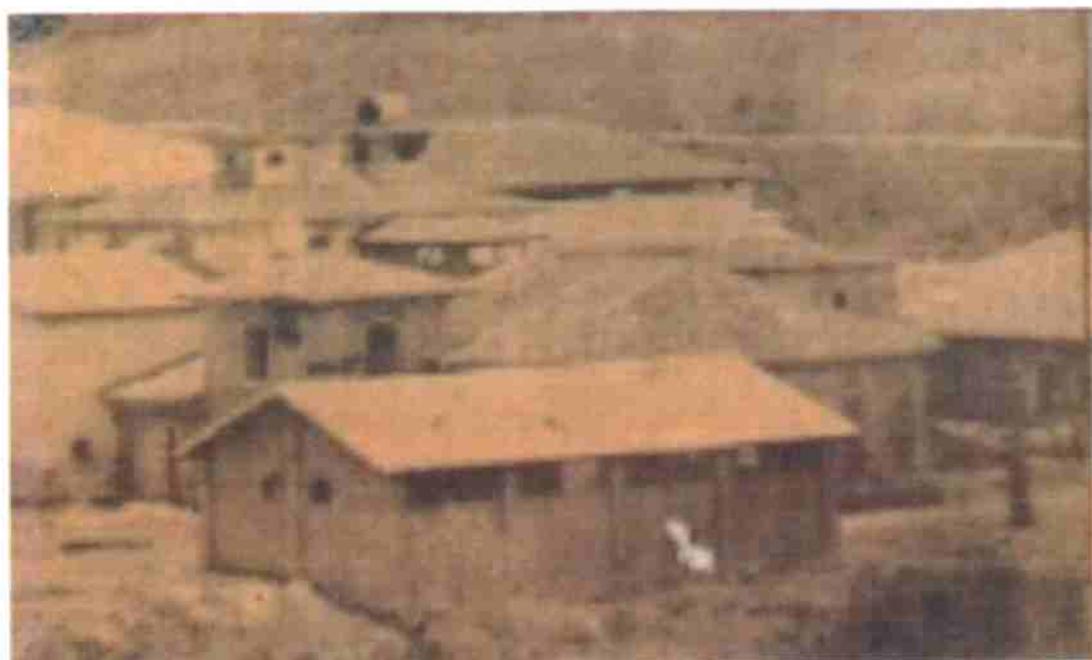


Foto: Biblioteca Nacional

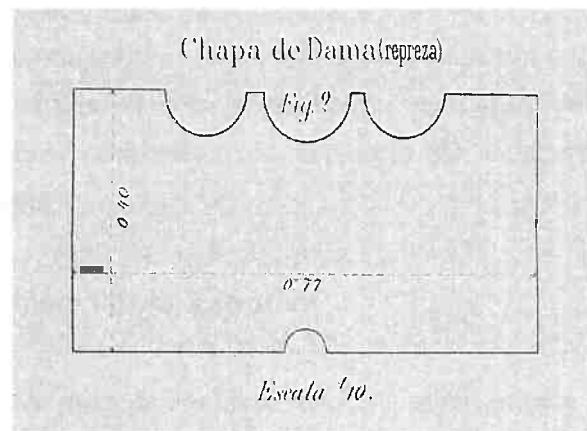
Figura 43 - Ipanema Vista Geral tomada do lado Este - Década de 1870



Foto: Biblioteca Nacional

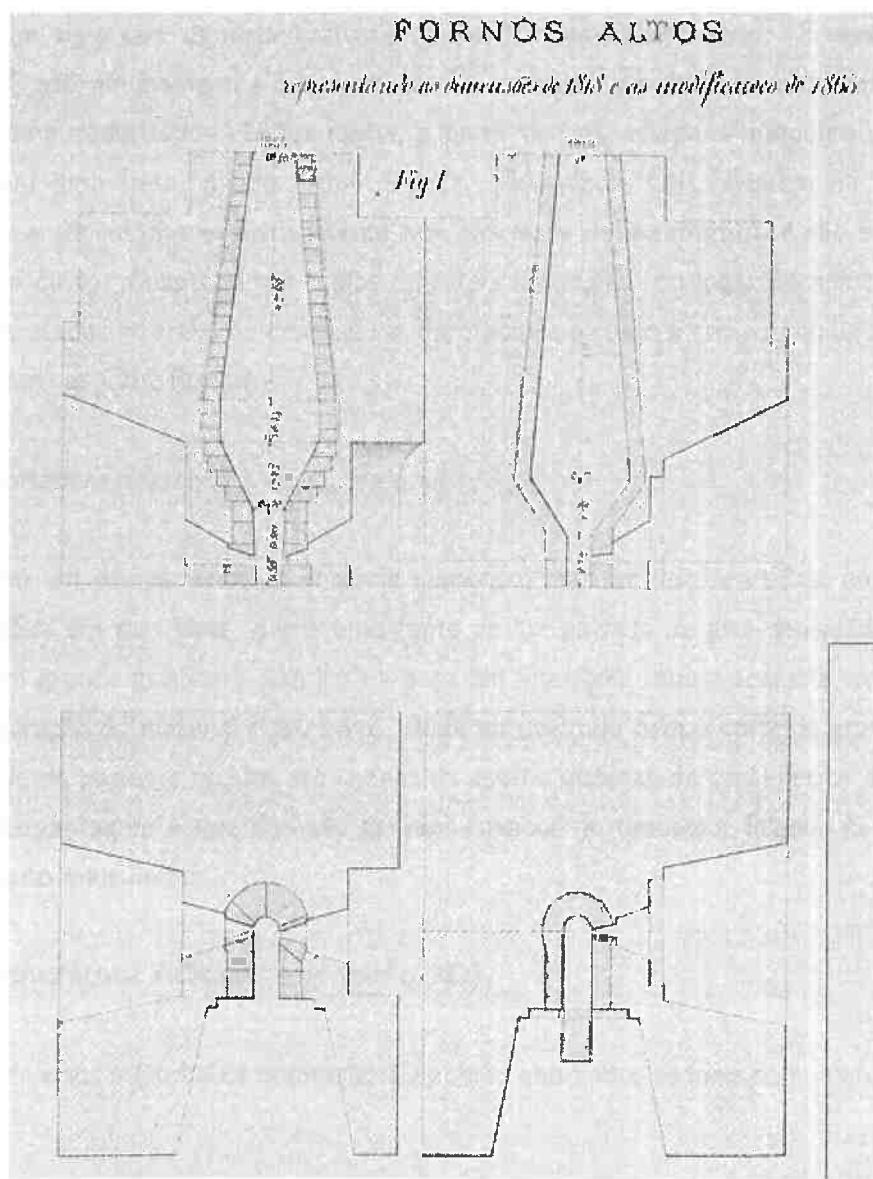
revestidas de barro e conduzida á mão ou em guindaste, até o molde aonde tem de ser vazada." (DUPRÉ, 1885, p.74 e 75)

Figura 44 - Chapa da Dame



Fonte: (DUPRÉ, 1885)

Figura 45 - Fornos Altos



Fonte: (DUPRÉ, 1885)

## 2.4 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

Fabricação digital são processos de fabricação que combinam modelagem computadorizada (CAD - computing-aided design) com processos de manufatura aditiva e subtrativa. Manufatura aditiva é também conhecida como impressão 3D, enquanto manufatura extrativa, conhecida como usinagem.

### 2.4.1 Métodos de manufatura Extrativa

A manufatura extrativa parte de um bloco maciço e seletivamente vai dando forma à peça, removendo material.

#### 2.4.1.1 *Fresadora CNC Router*

CNC é um sigla que significa Controle Numérico Computadorizado. Fresadoras CNC e Router CNC são equipamentos que executam a usinagem de diversos materiais a partir de desenhos computadorizados. Dessa forma, a partir de uma chapa, a máquina vai extraíndo material com uma fresa, dando forma à peça. Fresadoras CNC existem há muitos anos na indústria e são usadas exaustivamente nos processos de manufatura e são equipamentos com elevado custo. Adaptando-se tupias (*routers* em inglês) no lugar do *spindle*, que eram inicialmente usadas no trabalho de madeira, barateou-se o custo e criou-se equipamentos para novas funções: as CNC Router.

#### 2.4.1.2 *Cortadora a laser*

É também um equipamento de controle numérico, mas em vez de utilizar uma fresa para o corte, utiliza um raio laser, que é uma fonte de luz pulsada de alta densidade de energia que gera um grande gradiente térmico na peça em uma área muito pequena, promovendo a fusão, evaporação do material e seu corte. Pode ser utilizada para o corte de grande gama de materiais, desde papéis e tecidos até chapas de aço de dezenas de centímetros de espessura. Uma grande vantagem é que não são gerados cavacos no processo, ficando o ambiente de trabalho muito mais limpo.

### 2.4.2 Manufatura Aditiva (Impressão 3D)

Existem diversos métodos de impressão 3D e serão abordados os mais comumente utilizados.

Figura 46 - Fresadora Router CNC Etruska EK01



Fonte: Acervo Pessoal, 2017

#### 2.4.2.1 *Deposição de Filamento Fundido*

É o processo mais difundido de impressão 3D e é o que geralmente vêm na mente das pessoas quando se fala no assunto.

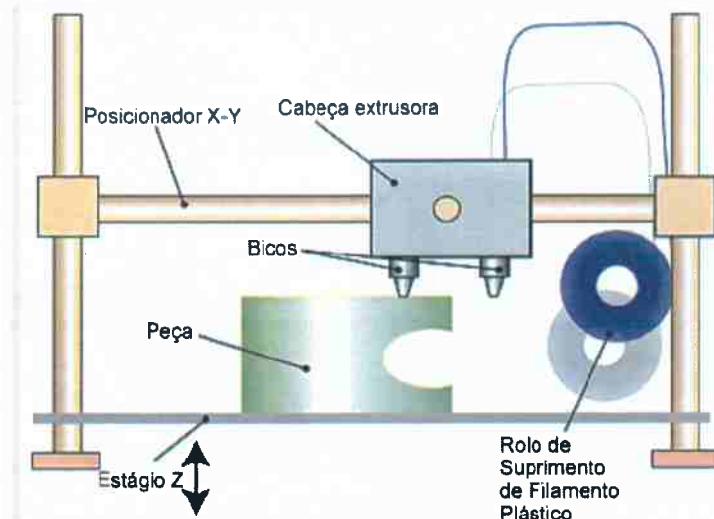
Consiste basicamente de um bocal aquecido, com comando numérico, que deposita material fundido em um substrato, camada à camada. (Figura 47) O material é polimérico (geralmente ABS e PLA) e vêm na forma de filamentos extrudados que são aquecidos e extrudados novamente, dando forma à peça. Geralmente a mesa de impressão é aquecida também, para evitar o desprendimento da peça da mesa ou das camadas. É o método mais barato e popular de impressão 3D, existindo diversos fabricantes pelo mundo.

#### 2.4.2.2 *Estereolitografia e Estereolitografia DLP*

É o processo de impressão de alta definição mais utilizado atualmente, que consiste de um monômero e iniciador fotossensível, que promove a polimerização quando exposto à Luz Ultravioleta (UV). A impressora consiste de uma plataforma de construção que é montada em uma cuba de resina, e a radiação UV seletivamente dá forma à peça.

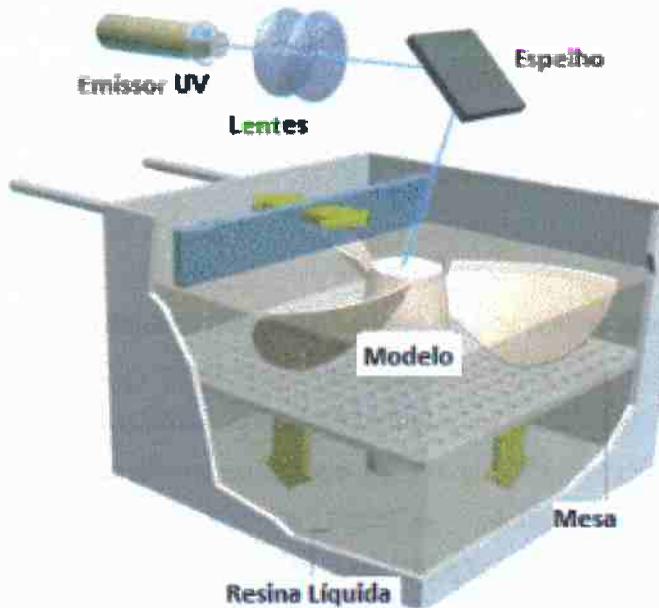
Dependendo da forma como se dá a exposição, podem ser dados diferentes nomes ao processo. Quando a cura se dá por raio laser ultravioleta e o laser é dirigido por espelhos computadorizados (Figura 48) é chamada de Estereolitografia (SLA) (PHAM; GAULT, 1998). É um processo bastante utilizado, fornece peças com ótimo acabamento e detalhes, mas é um

Figura 47 - Deposição de Filamento Fundido



Fonte: (MELLO; GUEDES, 2010)

Figura 48 - Processo de manufatura por estereolitografia

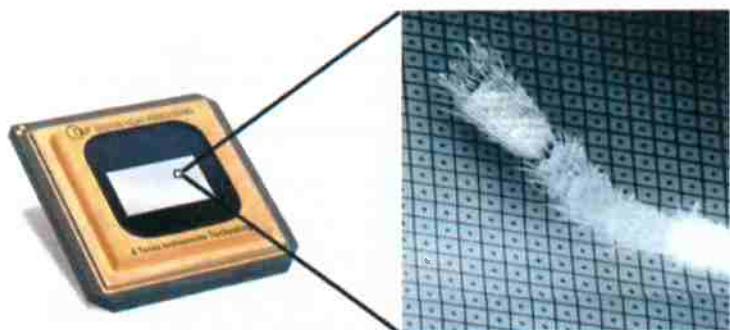


processo lento, já que o laser tem que percorrer toda a camada.

No ano de 1987, a empresa estadunidense Texas Instruments criou a tecnologia Digital Light Processing (DLP) que consiste de uma matriz de milhões de microespelhos miniaturizados, podendo ser controlado o ângulo de reflexão de cada um separadamente (Figura 49). Isto faz com que uma luz incidente sobre o chip seja seletivamente refletida, dando origem à projeção de uma imagem.

Esta tecnologia é utilizada em diversos mercados, como projeções de cinema 4K, projetores domésticos, (Near-Eye Displays), controle de qualidade industriais, entre outros (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.).

Figura 49 - Chip DLP



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, s.d.)

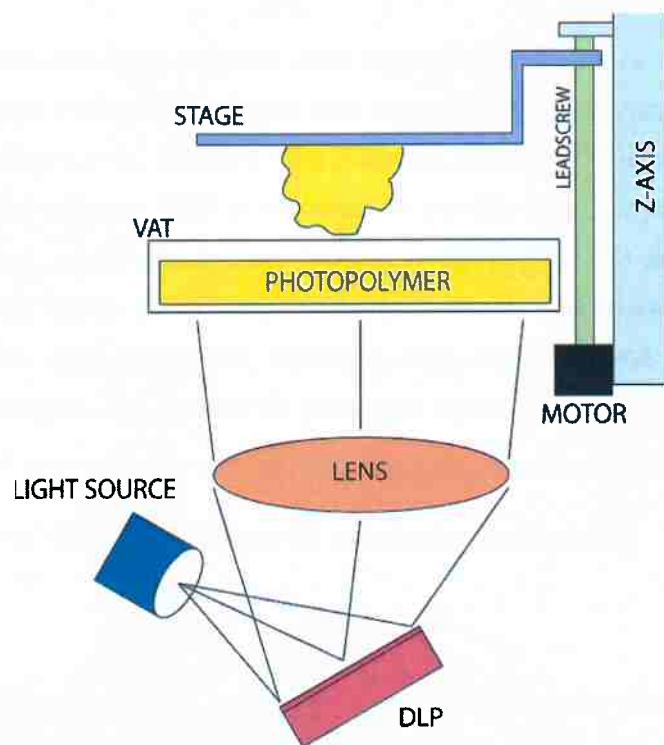
Neste processo, uma fonte de radiação UV oriunda de uma lâmpada de vapor de mercúrio ou LED (que é o processo mais moderno, por possibilitar a utilização de comprimentos de onda específicos) é projetada no chip DLP e o raio refletido é direcionado ao recipiente com resina (Figura 50). Desta forma, uma camada inteira é curada ao mesmo tempo, aumentando a velocidade do processo.

#### 2.4.2.3 Sinterização Seletiva a Laser

Este processo de fabricação deposita camadas finas de pós poliméricos e metálicos, através de um rolo depositor que são posteriormente sinterizadas por um laser. Este processo é repetido muitas vezes, dando forma a peça. Para materiais metálicos, depois da sinterização as partículas não sinterizadas são removidas e a peça inteira é aquecida em uma temperatura muito próxima da temperatura de fusão do metal para minimizar a distorção e melhorar a sinterização e a união entre as camadas (PHAM; GAULT, 1998).

Este processo é utilizado para uma gama muito grande de materiais termoplásticos (em especial a poliamida) e metálicos, como titânio, alumínio, aço, aço inoxidável, bronze, entre outros, além de materiais cerâmicos. Para a impressão em metais usa-se atmosfera inerte para evitar a oxidação dos pós (AGARWALA et al., 1995).

Figura 50 - Estereolitografia DLP



Fonte: (??)

#### 2.4.2.4 Impressora de pós

Camadas de pós são depositadas em um substrato sendo seletivamente unidas por um aglutinante pulverizado por um bocal, semelhante à uma impressora jato de tinta. Quando a impressão é finalizada e peça é separada dos pós não aglutinados e limpa. É possível imprimir em cores com este processo e o material mais utilizado é o gesso (SACHS et al., 1995) .

#### 2.4.2.5 PolyJet™

PolyJet™ é uma tecnologia proprietária da Stratasys™ que também faz uso de fotopolímeros líquidos que endurecem por exposição à radiação ultra-violeta, mas o mecanismo de deposição é diferente: utilizam um cabeçote, parecido com a impressora jato de tinta que deposita a camada de material, que é submetida à luz UV para endurecer. É um processo que produz peças com excelente acabamento mas de custo elevado.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, após a pesquisa bibliográfica, foi essencial a utilização de *softwares* para a criação do modelo para a construção da maquete.

O primeiro *software* que foi utilizado foi o Autodesk Inventor™, escolha pela familiaridade com o mesmo. Este *software CAD* é muito usado em diferentes projetos, em especial para engenharia mecânica, possuindo diversas funções nesse sentido. O fluxo de trabalho nele consiste na criação de esboço em 2D, seguida da realização de uma operação espacial com este (extrusão, revolução, corte, translação, transição, etc), criando figuras espaciais, bem como novos planos na imagem, que servem de base para novos esboços, sendo assim o desenho formado.

Figura 51 - Desenhos 2D posicionados ortogonalmente



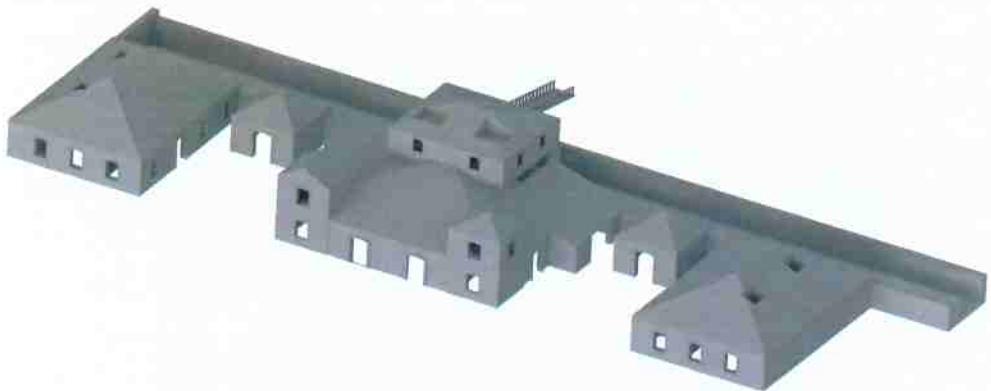
Dessa forma, inicialmente a planta baixa e as vistas laterais foram desenhadas em 2D e posicionadas ortogonalmente (Figura 51). Muitos esboços e operações depois, foi realizada a primeira modelagem da fábrica (Figura 52) .

Como as plantas estão com escala em palmos - unidade de medida que tem variação de acordo com a região que foi feita, foi utilizado como escala para o desenho o tamanho real das ruínas do alto-forno e toda a planta foi redimensionada de acordo com suas medidas.

O *software* não se mostrou adequado para as dimensões do modelamento, já que é mais utilizado para criação de peças pequenas com muitos detalhes e não desenhos de edifícios onde existem vários elementos repetidos (como janelas, portas, etc).

Na Engenharia Civil e Arquitetura tem surgido uma tendência de uso de *software BIM* que são um novo paradigma na área, os quais são paramétricos: são criadas as características dos elementos com vários parâmetros que posteriormente são chamadas no projeto. Dessa forma, para elementos repetidos como janelas, são criadas e posicionadas apenas uma vez, ao invés

Figura 52 - Modelagem no Inventor™



de terem que ser modeladas cada vez que forem utilizadas como na modelagem anterior.

Há ainda os *software* de modelagem artística, os quais parte-se de uma massa conceitual inicial, que é deformada para a criação dos desenhos. É como se fosse uma massa de modelar computadorizada que vai-se puxando, arredondando, cortando, estampando e chega-se ao modelo final.

*Softwares* de modelamento disponíveis no mercado:

- Softwares de desenho técnico: NX, Inventor™, SolidWorks™, SolidEdge™, OneShape
- Softwares de desenhos para arquitetura com paradigma BIM: ArchiCad™, Revit™, Civil3D
- Software para modelamento artístico e animação: 3DSMax™, Maya™, Blender,
- Software para modelamento de personagens e texturas: Mudbox™, Zbrush™

Dentre os *softwares* disponíveis no mercado foram selecionados os que melhor se adequassem ao trabalho e fornecessem licença gratuita de estudante ou período de teste. Mostrou-se necessário a utilização de mais de um tipo de *softwares*. Assim foram utilizados os seguintes:

Para a criação do modelo arquitetônico e terreno foi utilizado o Revit™ para o modelamento das máquinas, fornos e objetos: Inventor™.

### 3.1 ALTO FORNO

O personagem principal da fábrica. Suas ruínas nos dias atuais podem ser vistas na foto 53 e 54. Podemos ver abaixo sua descrição no inventário da fábrica.

Figura 53 - Vista frontal do alto-forno

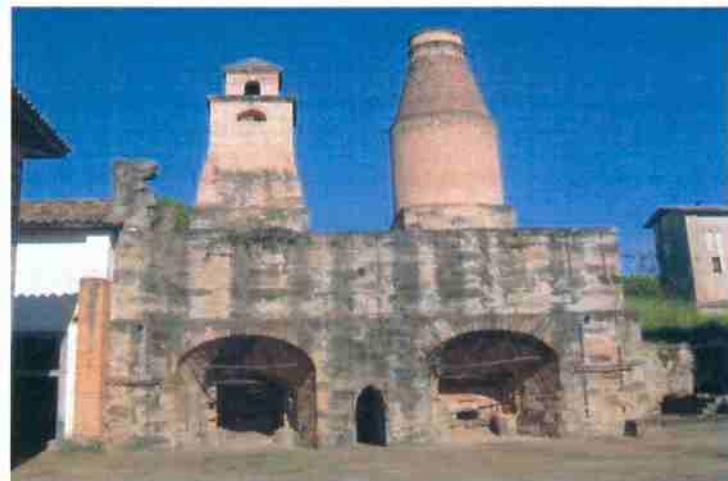


Foto: Divulgação TripAdvisor

Figura 54 - Vista traseira do Alto Forno

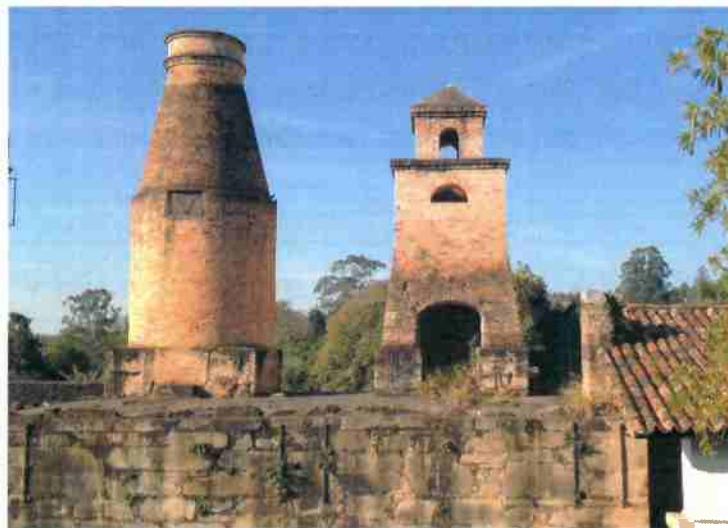


Foto de Fernando Landgraf, 2017, arquivo pessoal

"(...) existem dois fornos altos construidos tanto no exterior, como no interior, de pedra de cantaria, e estes fornos em suas bases unidos formão hum retângulo de sessenta e seis palmos de comprido, e de trinta e quatro de fundo, com as

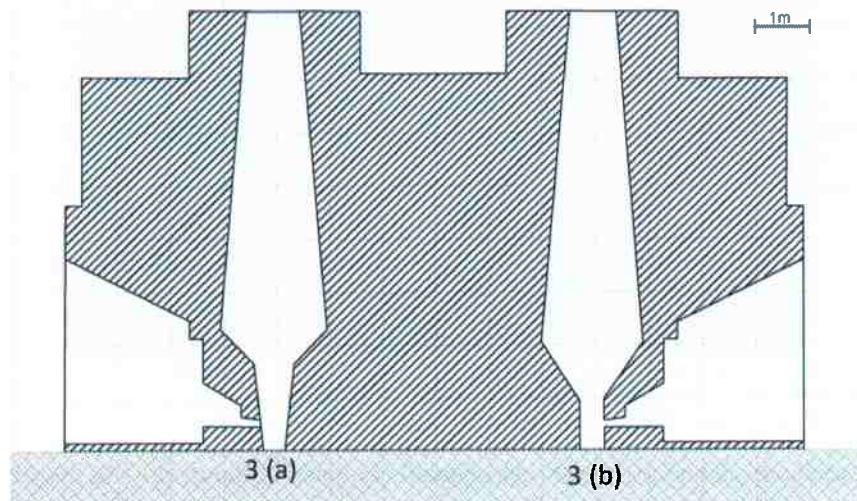
competentes ancoras de ferro batido nas paredes para a necessaria segurança com quarenta e quatro palmos dos alicerces athé á boca, e no interior do forno no maior tem de diametro doze palmos, e no menor de onze, e huma das bôcas dos fornos tem cinco palmos de diametro, e a outra quatro palmos, e todos se achaõ com as competentes obragem, ou cadilhos promptos em estado de servir, ao lado de cada forno se acha huma Maquina de Vento (...) Em cima da massa dos fornos, e-puchado sobre pilares de tijolos, e cal, se acha a casa da carga dos fornos, com paredes de pedra lavrada, e cal, e (...) e dentro desta casa de carga se acha construido sobre cada bôca dos fornos as suas chaminés feitas de tijolos, e cal, na parte exterior da mesma casa se acha hum sino de ferro fundido que serve de assignalar as cargas que entraõ nos fornos, e ao lado destes existem os tabuleiros para a mistura do mineral, e as bôcas das fornalhas se achaõ garnecidas com chapas de ferro fundido" (MORAES, 1858).

### 3.1.1 Chaminés

A primeira coisa que observa-se é o formato diferente das chaminés em relação às plantas. Teriam sido construídas de maneira diferente da planta ou foram reformas posteriores? Observando-se a foto de 1870 ( figura 43 - página 47) observa-se que as chaminés estão no formato antigo. Mas observando-se a foto de 1890 ( figura 40 - página 46) observa-se que o chaminé da esquerda já está modificado e somente o da direita o formato antigo. No desenho do Pink (figura 32 - página 40), observa-se o formato parecido com as plantas. Dessa forma foram desenhadas as chaminés de acordo com as plantas e não o que hoje existe.

### 3.1.2 Perfil do forno

Figura 55 - Perfis dos altos-fornos de Ipanema: (a) o AF desenhado a partir dos dados de Varnhagen no livro de Eschwege e (b) o AF desenhado por Dupré



Fonte: (LANDGRAF et al., 2017)

Uma característica muito importante é o perfil do forno (também chamado de vazio interior). Landgraf et al. (2017) mostram a importância do perfil do forno e detalham a mudança dos perfis ao longo dos anos. O perfil era refeito a cada campanha, sendo modificado de forma empírica buscando o aumento da produtividade. Foi usado no modelo o perfil descrito por Varnhagen no livro *Pluto Brasiliensis* (figura 55).

### 3.1.3 Entrada de carregamento do forno

Na parte superior há a entrada da boca do forno, onde eram colocados os insumos. No desenho original, Figura 57 (a) a abertura é acima do nível do piso, o que leva a imaginar que deveria existir uma rampa isso, o que deveria dificultar o trabalho. Nas ruínas atuais, a porta de entrada é estendida, como na figura 54.

Na confecção do modelo, foi rebaixada a porta de carregamento para que ficasse no nível do piso.

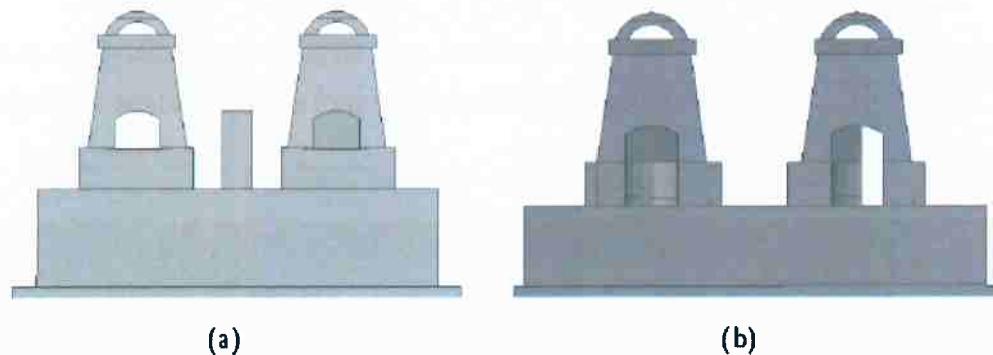
No inventário de 1822 é citado que as bocas das fornalhas se acham guarnevidas com chapas de ferro fundido, mas, para não poluir o modelo, não foram colocadas.

Figura 56 - Entrada do Vazio Interior



Foto: Fernando Landgraf

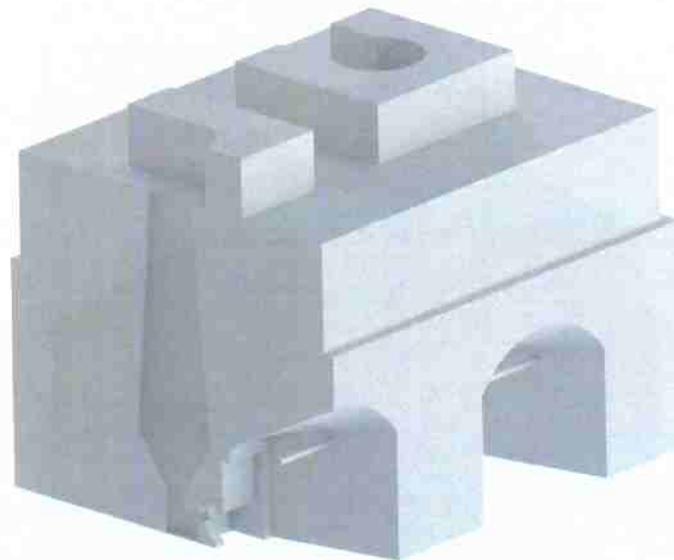
Figura 57 - Aberturas do forno. (a) Desenho das plantas (b) Desenho modificado



### 3.1.4 Abertura Inferior do Forno - Dame e Timpe

Dupre (1885) descreve em seu artigo 'Memoria sobre a Fabrica de Ferro S. João de Ipanema' a dame no período de Varnhagen, na qual o forno era de 'peito aberto'. Na figura 8 (página 20) temos um esquemático desta parte do forno e com base nele foi desenhada esta parte no modelo.

Figura 58 - Corte do Forno



### 3.1.5 Acabamentos

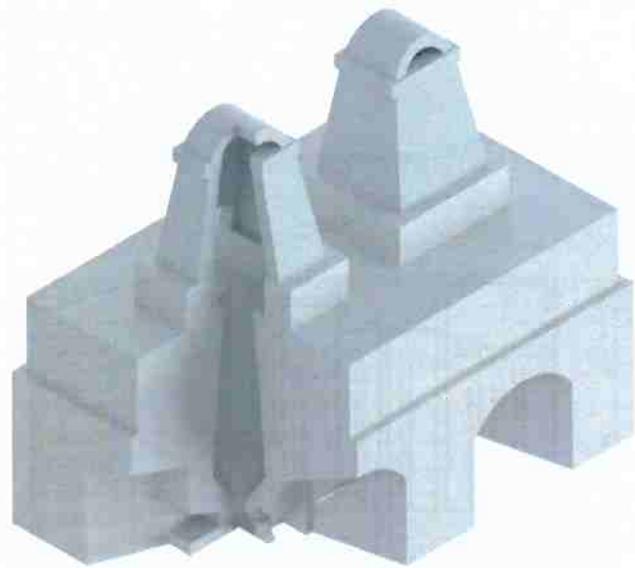
Foram adicionadas as âncoras de ferro batido nas paredes e uma textura de tijolos e pedras para simular o acabamento do forno como pode ser visto na figura 60.

Figura 59 - Detalhe do alto-forno (arcobotante?)



Foto: Olya Yang 2015

Figura 60 - Modelagem do alto-forno

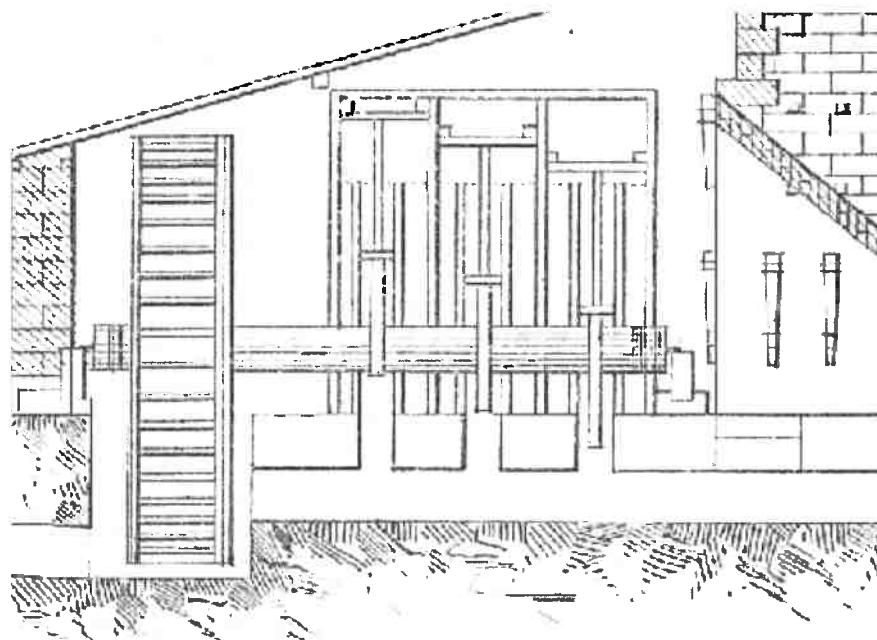


Fonte: autoria própria

## 3.2 MODELAGEM DAS MÁQUINAS

### 3.2.1 Máquina Insufladora

Figura 61 - Máquina sopradora - Vista Frontal



Fonte: (MORAES, 1858)

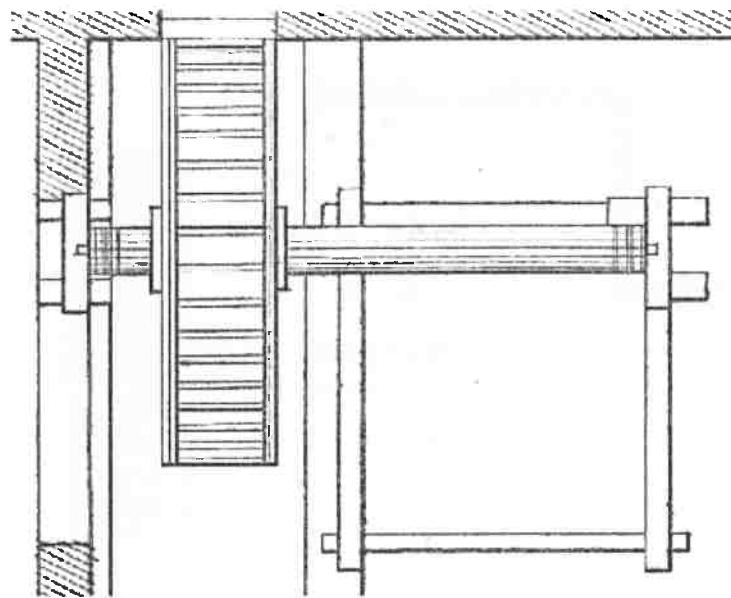
Temos citações sobre ela no inventário da fábrica bem como no livro "Pluto Brasiliensis", cujos trechos seguem:

(...)A casa da fundição tem dois fornos altos, e cada um seu jogo de folles de três caixas de madeira, tocado por uma roda d'agua de 24 palmos de diâmetro (...) (MORAES, 1858).

"A máquina soprante é de caixões, muito bem feita. Comprime o ar debaixo para cima, o que certamente produz mais vento do que seria necessário a altos fornos muito maiores." (ESCHWEGE, 1833, p.386)

"Os três foles, em conjunto, possuem 120 pés cúbicos de capacidade". "O vento entra no algaraviz por um conduto único. Esse conduto tem, na extremidade, o mesmo diâmetro que o algaraviz, de que dista de seis a oito polegadas. É ligado a este por um manguito de couro, que se pode ajustar à vontade". (ESCHWEGE, 1833, p.395)

Figura 62 - Máquina sopradora - Vista superior



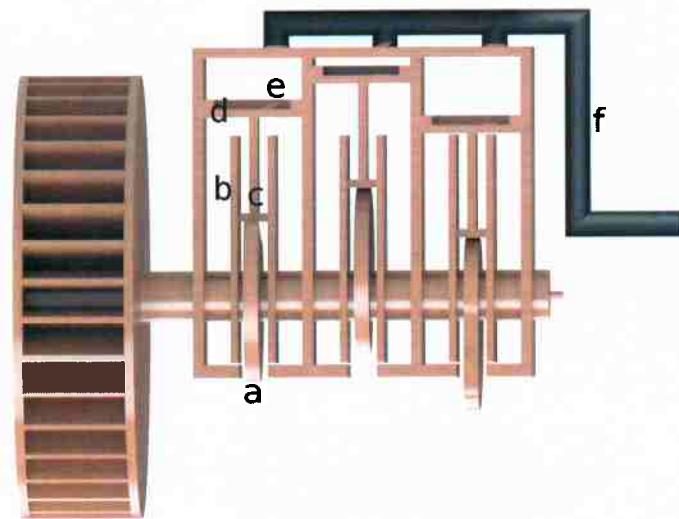
Fonte: (MORAES, 1858)

Podemos imaginar a máquina insufladora como três caixas retangulares verticais acionadas por um mecanismo de came.

As principais diferenças entre as máquinas insufladoras mostradas na figura 13 (página 24) e 15 (página 25) são o mecanismo de acionamento e a posição das válvulas. A figura 13 mostra o acionamento com mecanismo de gangorra e a válvula de entrada de ar fica no pistão da caixa. A figura 15 mostra como mecanismo de acionamento parecido com uma árvore de manivelas de um motor a combustão e a válvula de ar fica na parte inferior da caixa.

Comparando com a figura 61 (página 62), podemos imaginar a máquina insufladora com caixas como a figura 13 mas com um mecanismo de acionamento diferente, como se fossem cames seguidores.

Figura 63 - Máquina sopradora - Versão 1

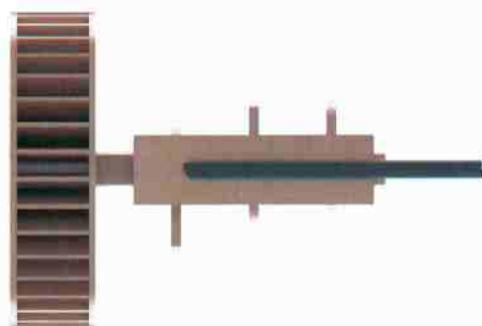


Fonte: autoria própria

Dessa forma, a máquina poderia ser desenhada como na figura 63). Nela, a letra **a** representa o came; o **b** a guia do came; **c** o seguidor do came; **d** o pistão; **e** a válvula e **f** o tubo de saída de ar.

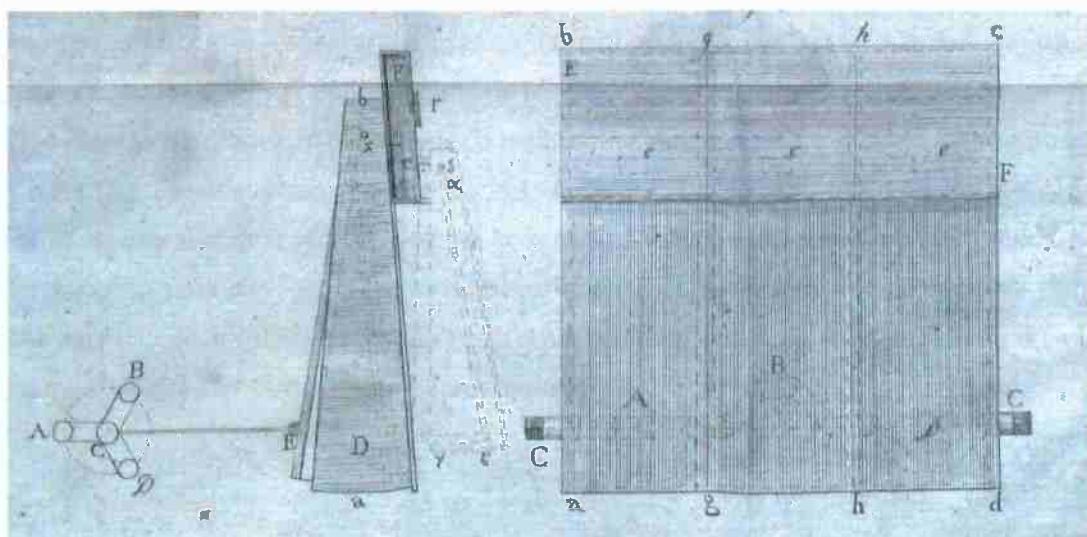
Mas se a máquina fosse desta maneira, se observássemos de cima, o eixo da roda deveria estar exatamente no meio do equipamento (figura 64 folha 65), mas na vista superior, figura 62 (folha 63) ele está em uma das extremidades.

Figura 64 - Máquina sopradora - Versão 1 - Vista superior



Fonte: autoria própria

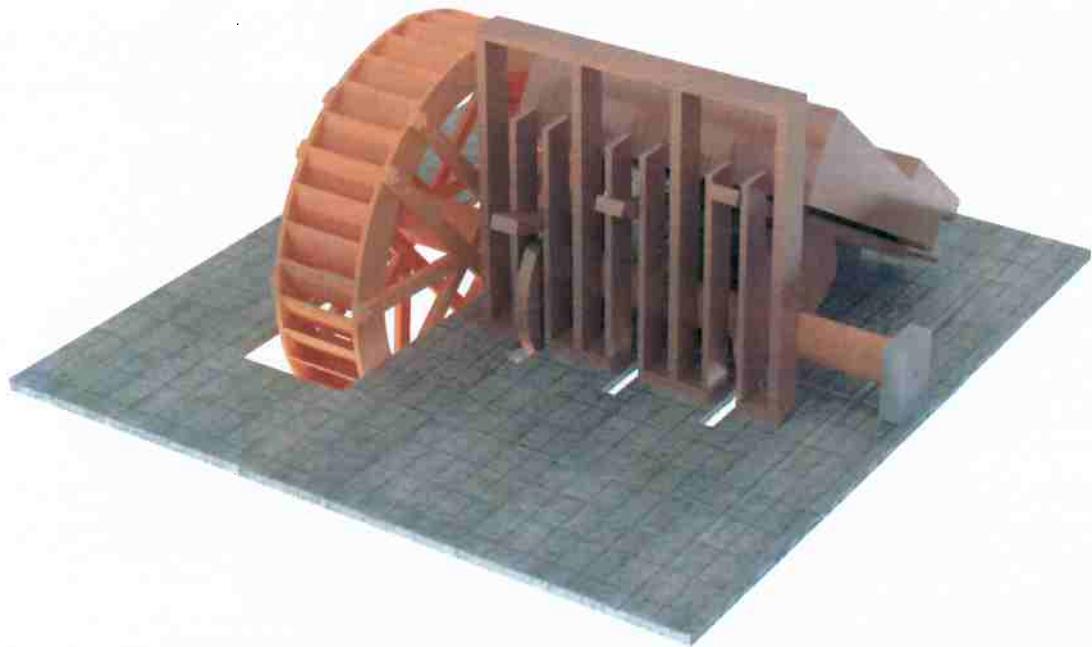
Figura 65 - Máquina sopradora de caixões horizontal



Fonte: (AKERRéN, 1805)

Em um dos livros da biblioteca que existia na FFI, "Svenska Blåsverkens Historia", existe o desenho de um foles triplo (figura 65) que pode indicar uma outra maneira de ver este equipamento.

Figura 66 - Máquina sopradora - Versão 2



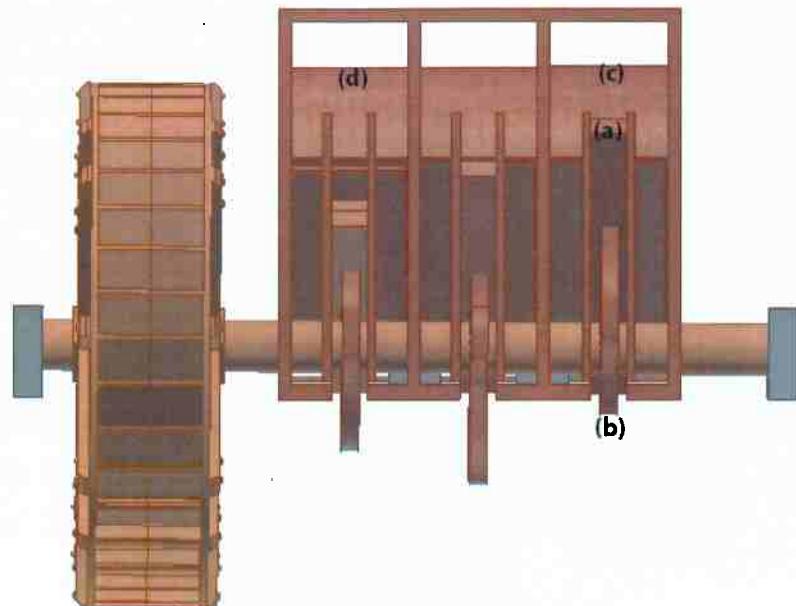
Fonte: autoria própria

Podemos imaginar uma máquina com o sistema de caixas horizontais como os da figura 65 (folha 65), mas com o mecanismo de cames da figura 63 (página 64), o que poderia justificar as vistas superior e frontal dos desenhos de Moraes (1858).

Nas plantas da fábrica não é mostrado nenhum mecanismo de contrapeso para a abertura dos foles. Para justificar sua ausência pode-se imaginar a parte inferior do soprador composta de uma viga de madeira pesada, que faz com que os foles abram-se com o seu próprio peso. O fechamento seria da mesma forma do desenho anterior, utilizando-se o sistema de cames.

Um exemplo de um soprador de foles sem o contrapeso pode ser visto na figura 69 do museu de campo "Rural Life Centre" em Tilford, Inglaterra.

Figura 67 - Máquina sopradora - Versão 2 - Vista Frontal



Fonte: autoria própria

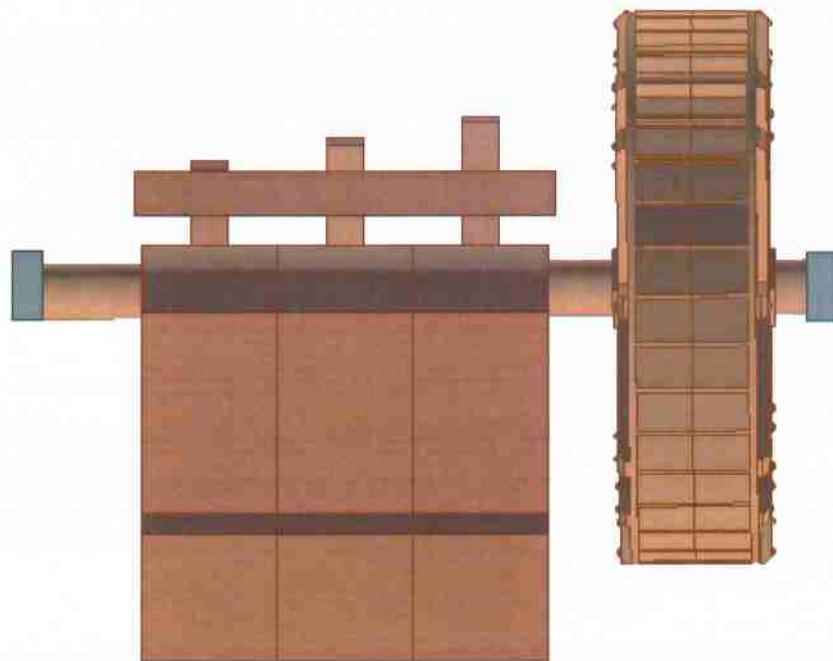
Figura 69 - Sopradora de foles do "Rural Life Centre" em Tilford, Inglaterra



Foto por Helen Pearce em 2014

A figura 66 mostra uma possível representação desta maneira citada. Na figura 67 vemos este mesmo desenho mas com vista frontal. Nela vemos a viga de madeira (a) que suporta o fechamento do fole; (b) o mecanismo de cames; (c) o foles fechado; (d) o foles aberto. É importante notar que a viga de madeira que serve como contrapeso não é fixa ao êmbolo do

Figura 68 - Máquina sopradora - Tipo 2 - Vista Superior



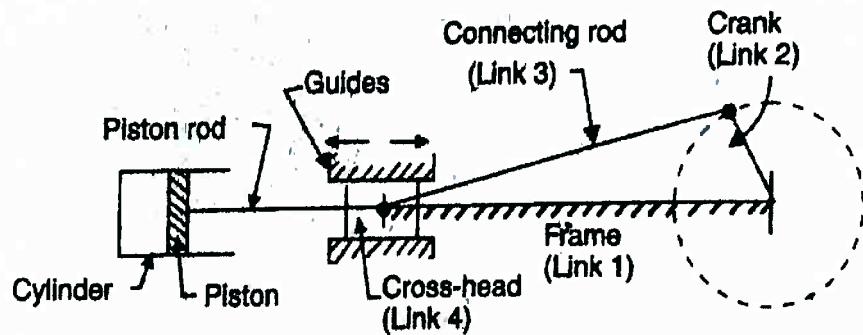
Fonte: autoria própria

fole, mas há um espaço de separação para ele possa fechar adequadamente.

Araújo (2018, comunicação pessoal<sup>3</sup>) acredita que o mecanismo de acionamento não era por cames mas por manivelas. Ele alerta que no inventário da fábrica antiga de Hedberg, há a citação de "manivela tripla de ferro fundido" que movimentava um jogo de três foles unidos. Na descrição da máquina sopradora do alto-forno é citado "hum jogo de tres folles feitos de madeira de cabriuva com suas respectivas ferragens", podendo-se supor que a referência às "respectivas ferragens" está relacionado ao sistema de manivelas.

<sup>3</sup>Comunicação pessoal de Paulo Eduardo Martins Araujo, em 02 de fevereiro de 2018 recebida por correio eletrônico.

Figura 70 - Esquemático de mecanismo de conversão de movimento circular em linear com manivelas



Na figura 70 vemos o esquemático do mecanismo de conversão de movimento circular em linear através de manivelas. É um sistema parecido com bielas de um motor a combustão moderno, com a diferença que no motor o sistema de guias é o próprio corpo da câmara de compressão e no esquemático há um sistema de guias e um pistão separados.

Figura 71 - Soprador manual tipo "Fuigo"

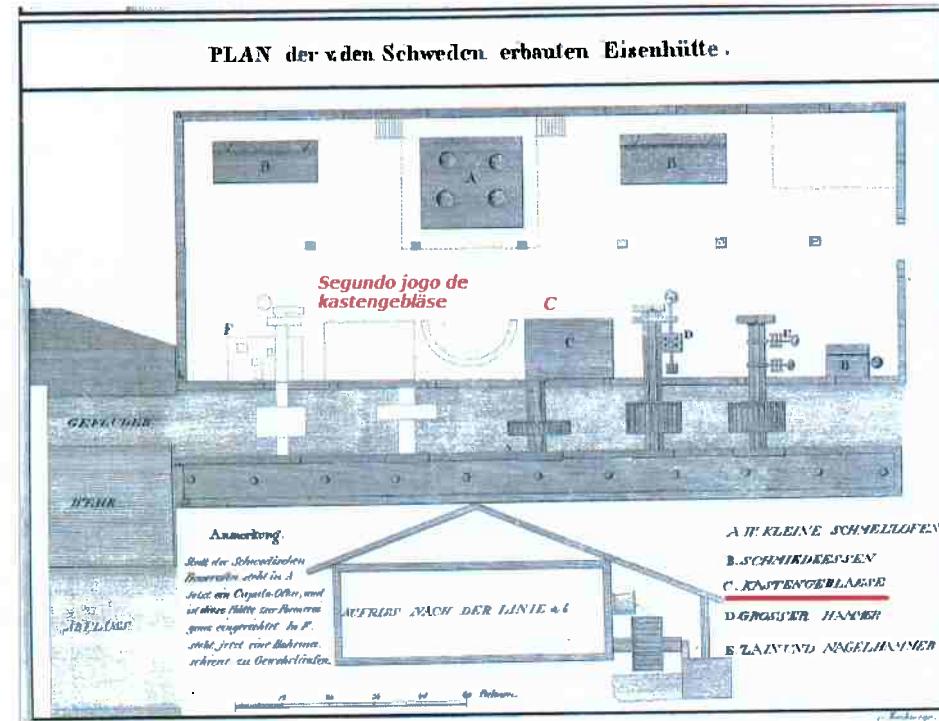


Foto: divulgação do website "Crossed Heart Forge"(2015)

Araújo (2018, comunicação pessoal) também sustenta que o sistema de foles da FFI era do tipo pistão, tanto a máquina sopradora de Varnhagen quanto a de Hedberg. Em relação à de Hedberg observa que na planta da fábrica antiga de Hedberg (figura 72) há a inscrição em alemão "kastengebläse", que significa caixa de vento ou fole-pistão. Cita também sopradores manuais japoneses do tipo "Fuigo" (figura 71). Encontram-se muitos vídeos na internet

com estes foles manuais pois é usado na produção artesanal de Katanas, tradicional espada japonesa.

Figura 72 - Planta da fábrica antiga de Hedberg com a inscrição "kastengebläse"

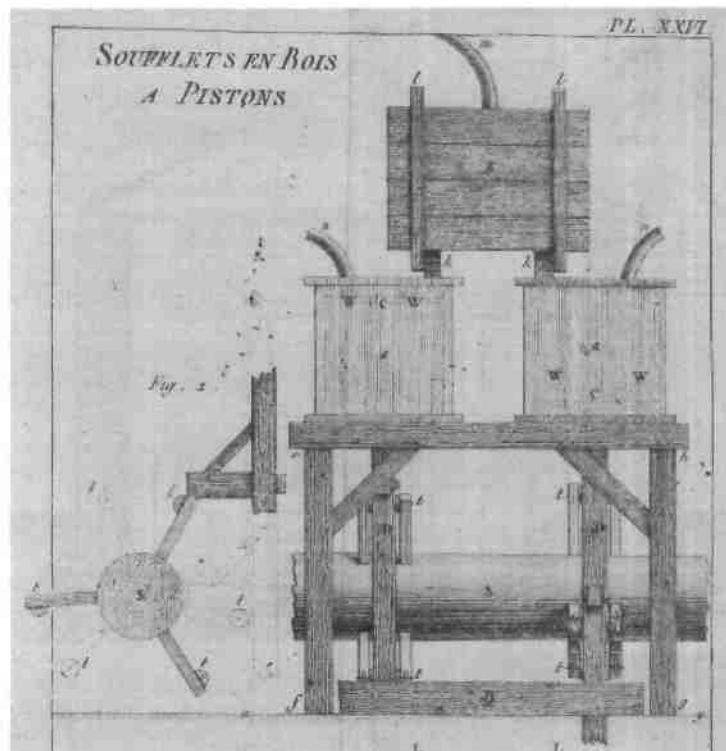


Fonte: (ESCHWEGE, 1833)

A figura de 73 está no Journal des Mines, número XXXVIII, de 1798, no qual o autor explica que o melhor tipo de soprador é o de cilindro de ferro fundido. Na falta deste optar-se pela madeira. As vantagens, relativamente aos foles trapezoidais são ganho em cubagem e facilidade de manutenção SUART (1798, *apud* ARAUJO, 2018, comunicação pessoal).

É interessante notar que o sistema de açãoamento da figura de 73 não é nenhum dos já citados, mas um mecanismo de roletes, muito parecido com o açãoamento dos foles da figura 69. Dessa forma, ainda resta dúvida sobre qual a forma da sopradora que existia na FFI no período de Varnhagen, que necessita ser esclarecida.

Figura 73 - Sopradores de pistões de madeira com acionamento por roletes



Fonte: (SUART, 1798)

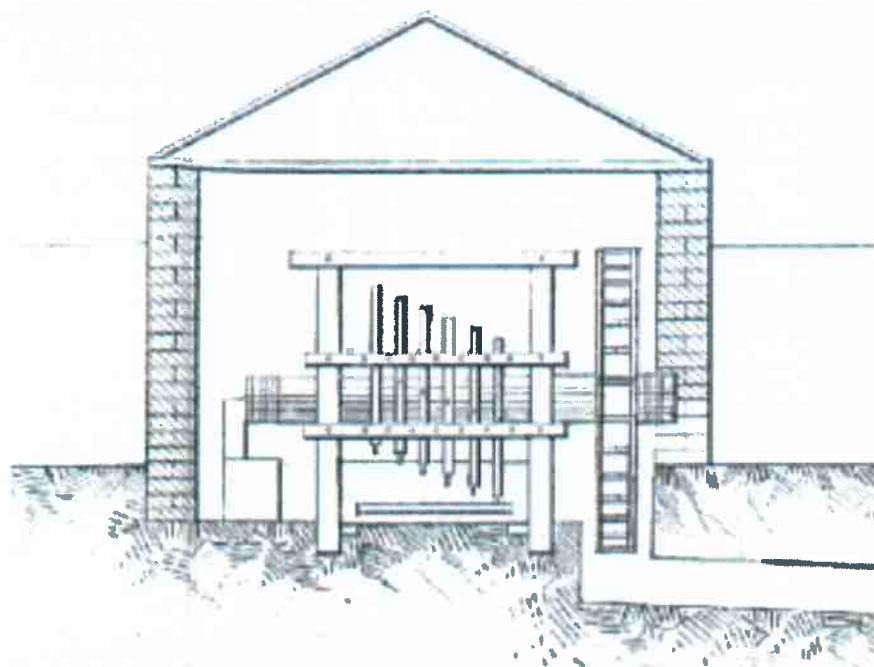
Para a confecção da maquete optou-se pelo desenho dos caixões trapezoidais (figura 66 e 67) pela melhor semelhança com as plantas superior e frontal da fábrica e por existir um desenho bastante parecido na biblioteca de Ipanema, apesar da possibilidade de não ter sido este o modelo empregado.

### 3.2.2 Moinho

(...) duas maquinas de socar ou pisar mineral, cada huma das quaes contém hum eixo de madeira com quatro rodetes de ferro fundido para suspender ou tocar as quatro maõs, que piza o mineral: Estas maquinas saõ movidas por duas rodas de madeira com dezoito palmos de diametro, e quatro de largura, e saõ tocadas por agua na altura media, e o coixo em que trabalhaõ os piloens, saõ formados de pranchoens de ferro fundido(...) (MORAES, 1858)

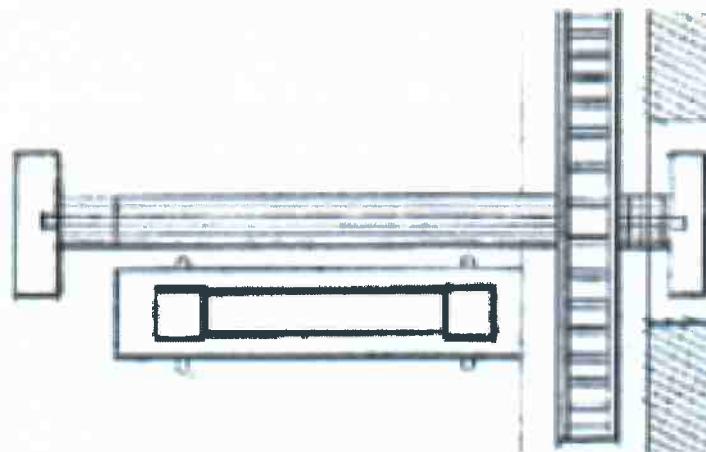
A representação dos moinhos nas plantas (figuras 76 e 75) ao contrário da sopradora, não gera muitas dúvidas de como deveria ser. A maior dúvida é a quantidade de pilões: no inventário são citados quatro e no desenho estão representados seis.

Figura 74 - Moinho de Minério



Fonte: (MORAES, 1858)

Figura 75 - Moinho de Minério - vista superior

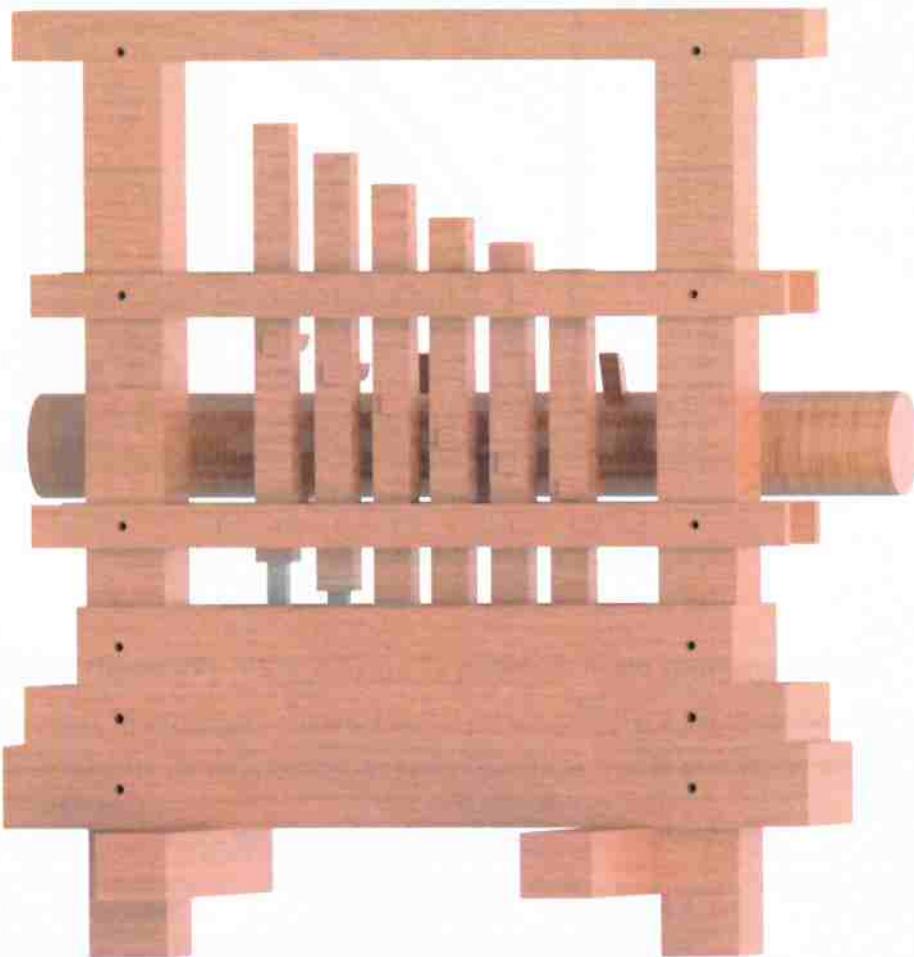


Fonte: (MORAES, 1858)

No livro "Garney's Handledning uti svenska masmästeriet" que existia antigamente na fábrica, segundo Landgraf (2014), há a imagem de um moinho de seis pilões (figura 21, folha 31). Nota-se que a figura 21 é muito parecida com a representação da planta (figura 74).

Observando-se a figura 74 observa-se que os pilões não estão com a sapata de ferro fundido que triturava o minério (figura 23, folha 32), que mesmo sendo substituída constantemente,

Figura 76 - Moinho de minério desenhado



Fonte: autoria própria

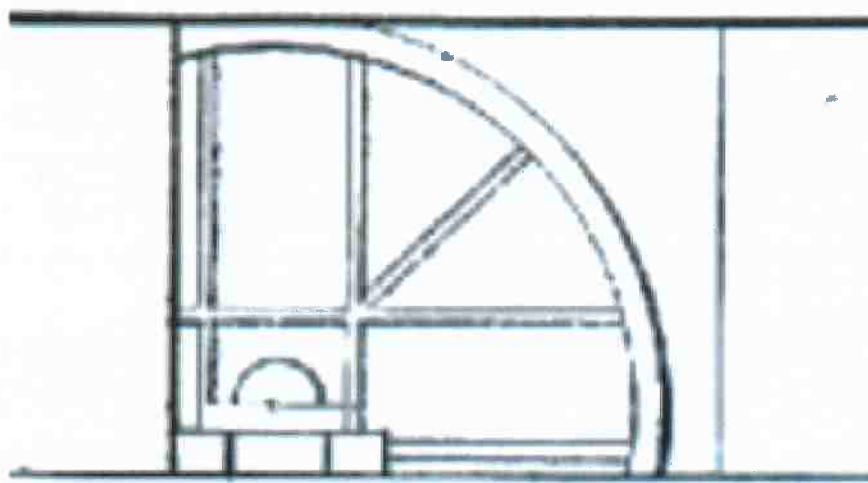
é interessante que seja mostrada na maquete.

### 3.2.3 Rodas D'água

Pelas plantas da fábrica, observa-se que as máquinas do refino tinham alimentação sobreaxial e a sopradora tinha alimentação pelo meio, já que o nível de água no canal está muito superior ao nível desta roda.

Existem muitos desenhos diferentes para as rodas. Um exemplo é a figura 29 (página 37). Como não temos outras informações além do diâmetro e largura, usamos a representação

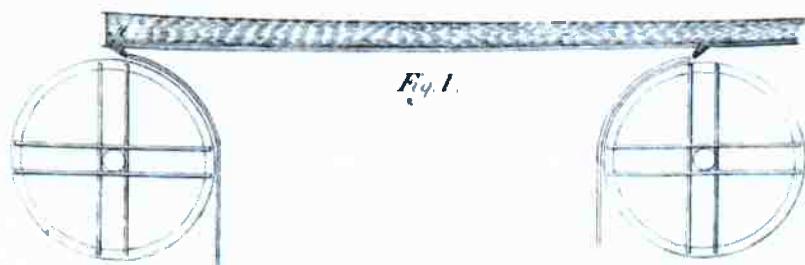
Figura 77 - no subsidios



Fonte: (MORAES, 1858)

de roda que está nas plantas (figura 77). Aliás, a figura 77 parece-se muito com uma gravura do livro "Garney's Omarbetad Masmästeri" (figura 78) da antiga biblioteca de Ipanema, na qual aparece a estrutura de suporte da roda com duas barras paralelas que se cruzam no meio

Figura 78 - no Garney

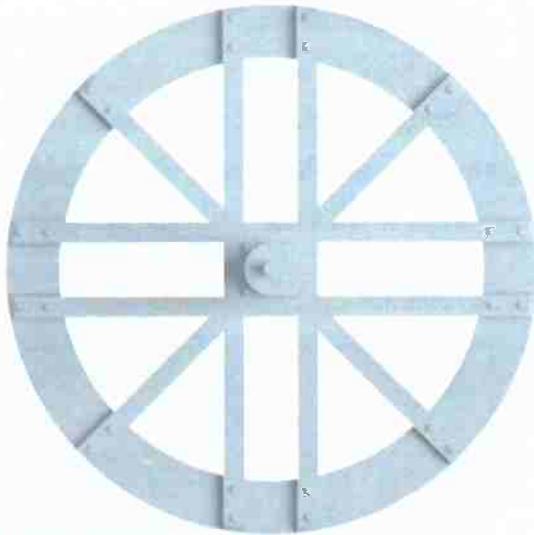


Fonte: (GARNEY, 1816)

### 3.2.4 Malho

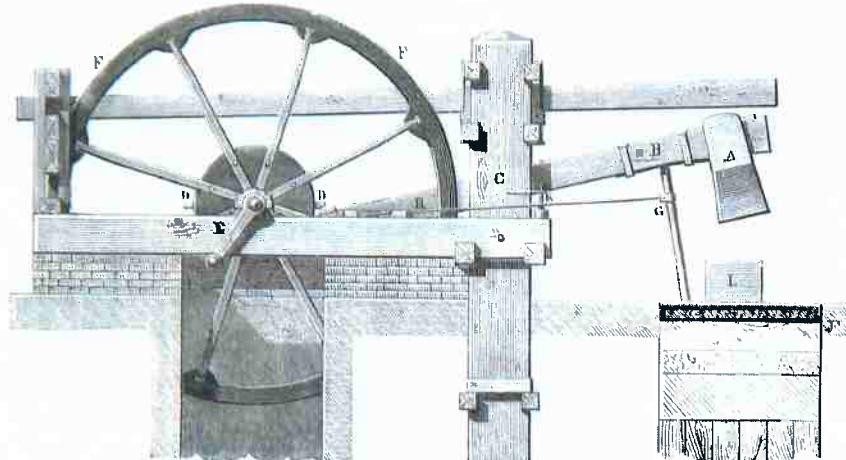
(...) No meio de cada forja de refino se acha hum malho grande debater ferro em barra, com armação de madeira, cujos malhos são movidos por huma roda de agua que tem quinze palmos de diametro e cinco de largo (...) (MORAES, 1858).

Figura 79 - Roda d'água desenhada



Fonte: autoria própria

Figura 80 - Malho a vapor

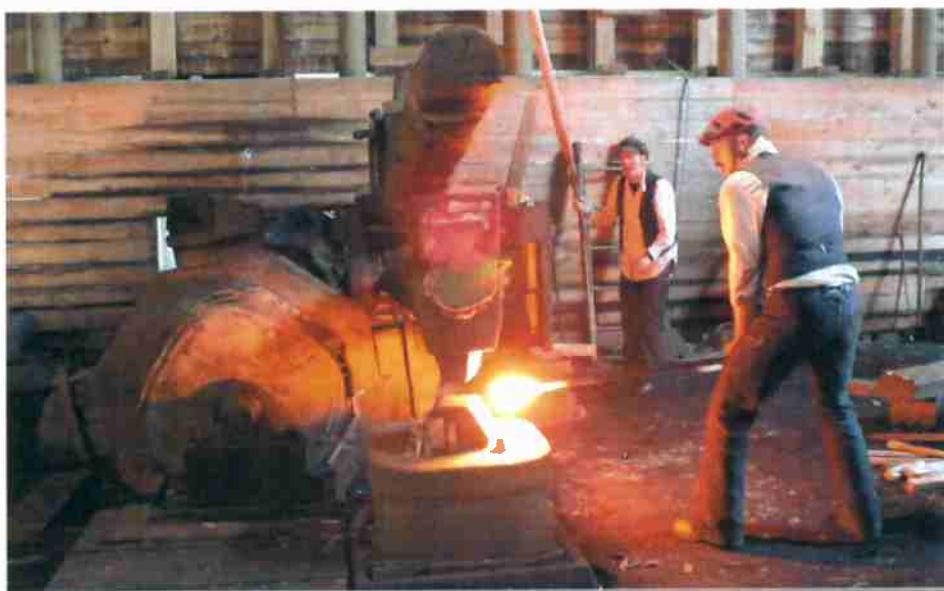


Fonte: (DELAUNAY, 1864)

Na figura 80 vemos um esquemático do malho, com seu martelo (A) pesando até 1700 kgs, fixada em seu suporte (B) através de uma cunha. Os cames D fixos em um eixo árvore horizontal vem sucessivamente, de acordo com a rotação da árvore, apoiar-se sobre a base do cabo B, elevando o martelo, que eleva-se e cai novamente, em movimento contínuo. Esta ilustração é de um malho movido a vapor, no qual a máquina atua sobre a manivela E. Por ser a vapor, há um volante de inércia (F), cuja função em máquinas movidas à água é feita

por um o eixo árvore bem grosso. O mecanismo GH é que faz com que seja possível parar o malho sem desligar a marcha da máquina a vapor. Em malhos hidráulicos há uma alavanca que fecha a entrada de água para a roda, fazendo esta função. Há uma grande viga de madeira apoiada sobre o suporte C que serve como se fosse uma mola, armazenando energia elástica, aumentando o impacto da queda do martelo na bigorna. Esta mola elástica podia ser composta de uma viga de madeira ou de duas, conforme as plantas de Ipanema na figura 82. Esse sistema duplo também pode ser visto na figura 81.

Figura 81 - Malho hidráulico em funcionamento na Suécia



Fonte: Evento do Museu do Trabalho Arbetets - Suécia

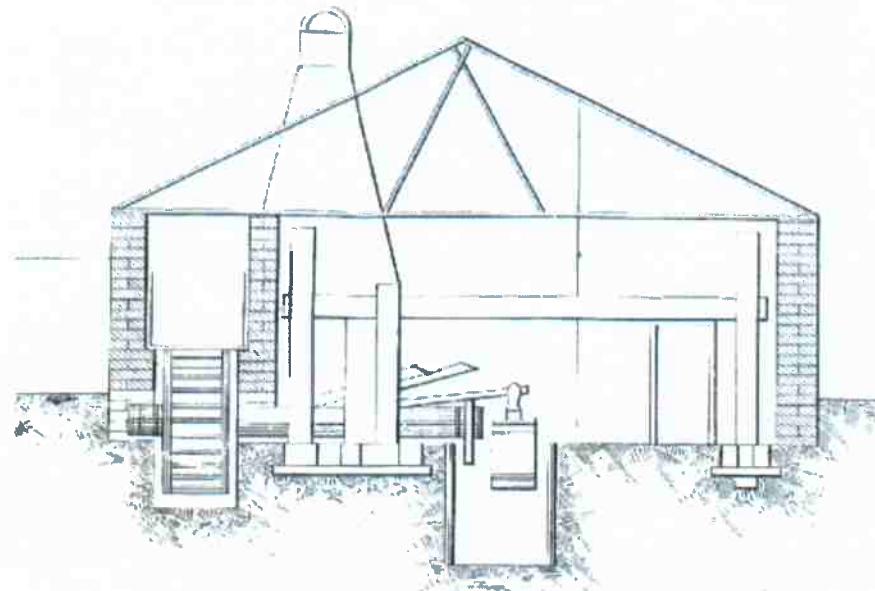
Na figura 81 podemos ver um malho hidráulico funcionando, em um evento do Museu do trabalho Arbetets em Norrköping, Suécia. O evento ocorreu em Häfla Hammarsmedja, também na Suécia.

### 3.2.5 Fole Sueco e fornos de refino

(...) Em cada huma das sobreditas casas se achaõ duas forjas de retino, e cada forja com huma maquina de folles unidos, movido cada jogo de folles por huma roda de quinze palmos de altura e tres de largo. (...) (MORAES, 1858)

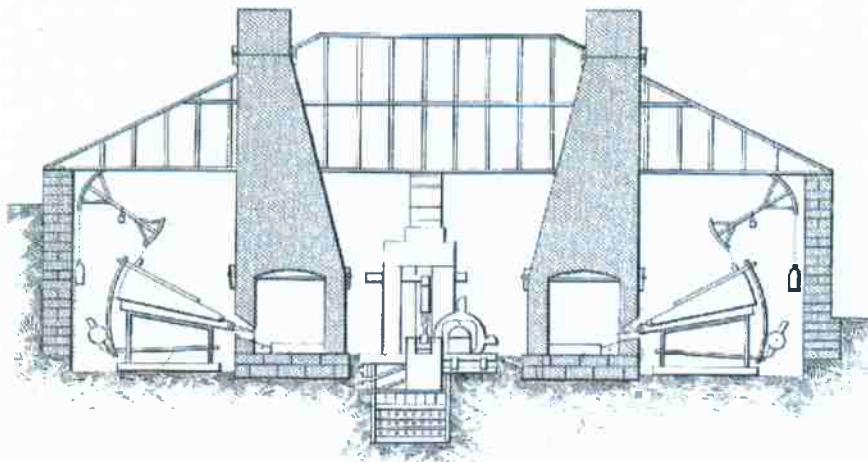
O forno de refino foi modelado baseado na plantas do corte transversal (figura 83). A figura 85 que mostra a vista superior dá a impressão de que os foles eram duplos, mas como existe somente um contrapeso, provavelmente a divisória dos foles é uma madeira em sua parte superior, que pode ser vista na figura 87.

Figura 82 - Corte do Refino mostrando o malho



Fonte: (MORAES, 1858)

Figura 83 - Corte transversal do refino mostrando o malho e fornos de refino



Fonte: (MORAES, 1858)

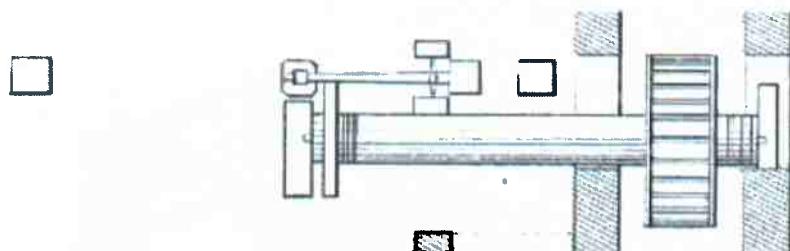
### 3.3 MODELAGEM DOS EDIFÍCIOS

#### 3.3.1 Casa de Fundição

(...)

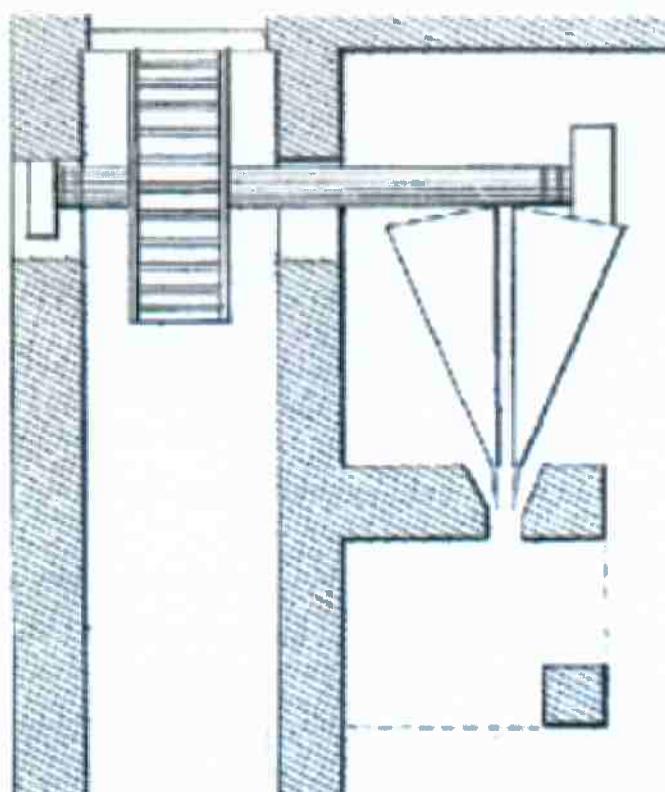
Huma Casa de pedra lavrada, com esquinas de cantaria, e cal, coberta de telha,

Figura 84 - Malho - vista superior



Fonte: (MORAES, 1858)

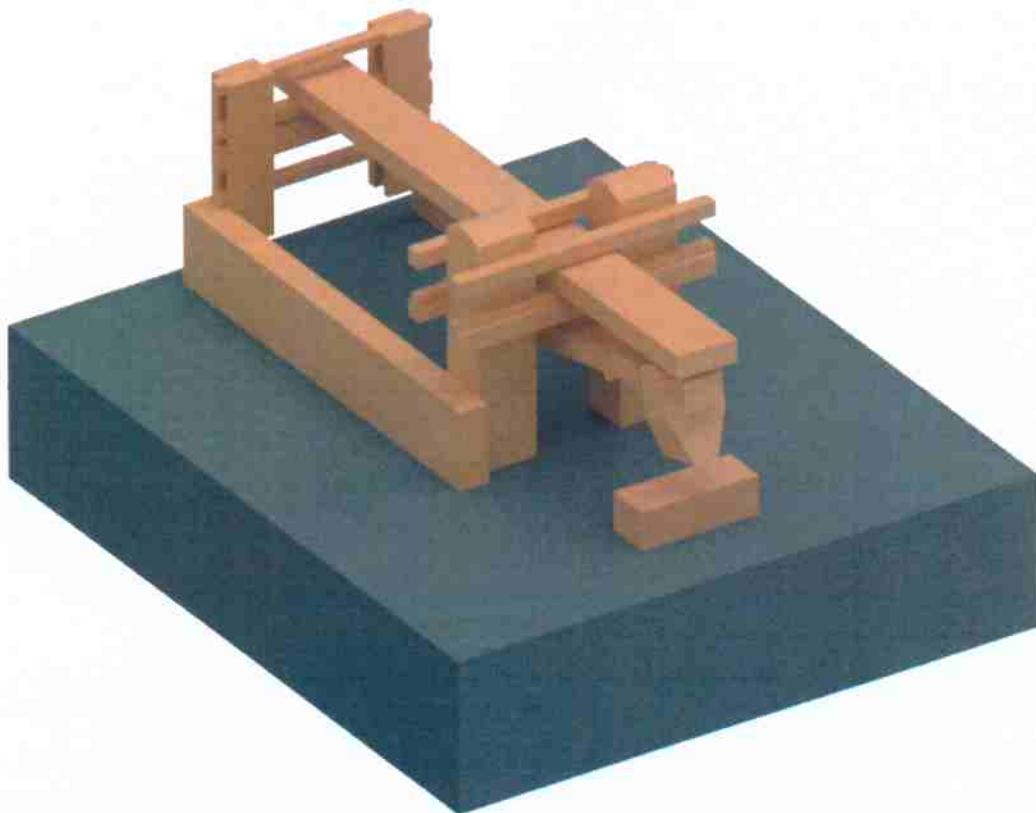
Figura 85 - Forno de refino e sopradora - vista superior



Fonte: (MORAES, 1858)

com cento e dezoito palmos de frente, e de largo cento e quatro palmos e meio, com dois angulos em frente e em cada hum, hum torreão que tem dois quartos, hum sobre o outro, em cada torreao com differentes Officinas de moldar, e tornear: Dentro deste Edificio existem dois fornos altos construidos tanto no exterior, como no interior, de pedra de cantaria, e estes fornos em suas bases unidos formao hum retangulo de sessenta e seis palmos de comprido, e de trinta e quatro de fundo, com as competentes ancoras de ferro batido nas paredes para a necessaria segurança com

Figura 86 - Malho desenhado



Fonte: autoria própria

quarenta e quatro palmos dos alicerces athé á boca, e no interior do forno no maior tem de diametro doze palmos, e no menor de onze, e huma das bôcas dos fornos tem cinco palmos de diametro, e a outra quatro palmos, e todos se achaõ com as competentes obragem, ou cadilhos promptos em estado de servir, ao lado de cada forno se acha huma Maquina de Vento, ou folles, constando cada huma, de hum jogo de tres folles feitos de madeira de cabriuva com suas respectivas ferragens; e cada jogo contém cento e vinte pés cubicos de vento, e postos em movimentos por huma roda em cada jogo, e estas rodas tem vinte e quatro palmos de diametro, e cinco de largura. sendo tocadas pela agua de altura media. Os infernos das rodas são cortados em rochas nativas, e delles conduz de cada hum, hum canal subterraneo feito de pedra e cal, coberto de abobada a agua que toca as rodas ao rio Ypanema: Em frente dos dois fornos altos tem hum guindaste de armaçaõ de madeira de Cabriuva; e rodas de ferro fundido com os competentes aparelhos, que serve de levantar das formas as peças fundidas, assim como de levar o ferro fundido para as formas: Esta casa de fundição da parte de baixo contém dois portoens, hum

Figura 87 - Fole de refino



Fonte: autoria própria

em frente do outro, e suas respectivas ferragens, e em frente de cada forno dois portoens grandes de grades de madeira com suas ferragens. Em cima da massa dos fornos, e-puchado sobre pilares de tijolos, e cal, se acha a casa da carga dos fornos, com paredes de pedra lavrada, e cal, e oito janellas, e hum portaõ na entrada, e para o portaõ conduz huma ponte de madeira com maçame de cal, e de ambos os lados engradamento de ferro batido, e dentro desta casa de carga se acha construido sobre cada bôca dos fornos as suas chaminés feitas de tijolos, e cal, na parte exterior da mesma casa se acha hum sino de ferro fundido que serve de assignalar as cargas que entraõ nos fornos, e ao lado destes existem os tabuleiros para a mistura do mineral, e as bôcas das fornalhas se achaõ garnecidas com chapas de ferro fundido. Por baixo do puxado a cima referido existe huma varanda assoalhada que serve de despejo do mineral pisado. (MORAES, 1858)

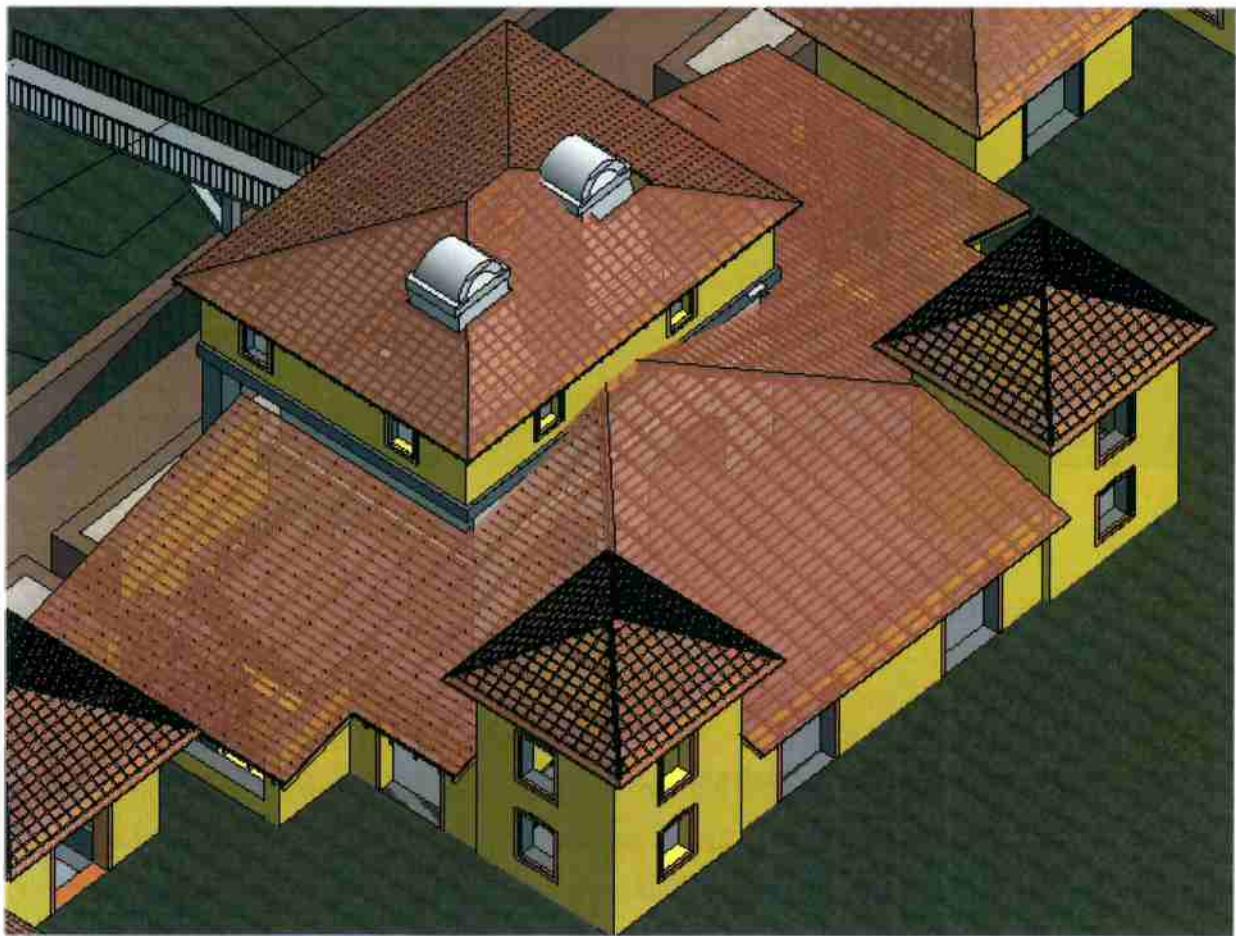
Foi realizado um desenho baseado na descrição do inventário e das plantas, que pode ser encontrado na figura 89.

Figura 88 - Forno de refino



Fonte: autoria própria

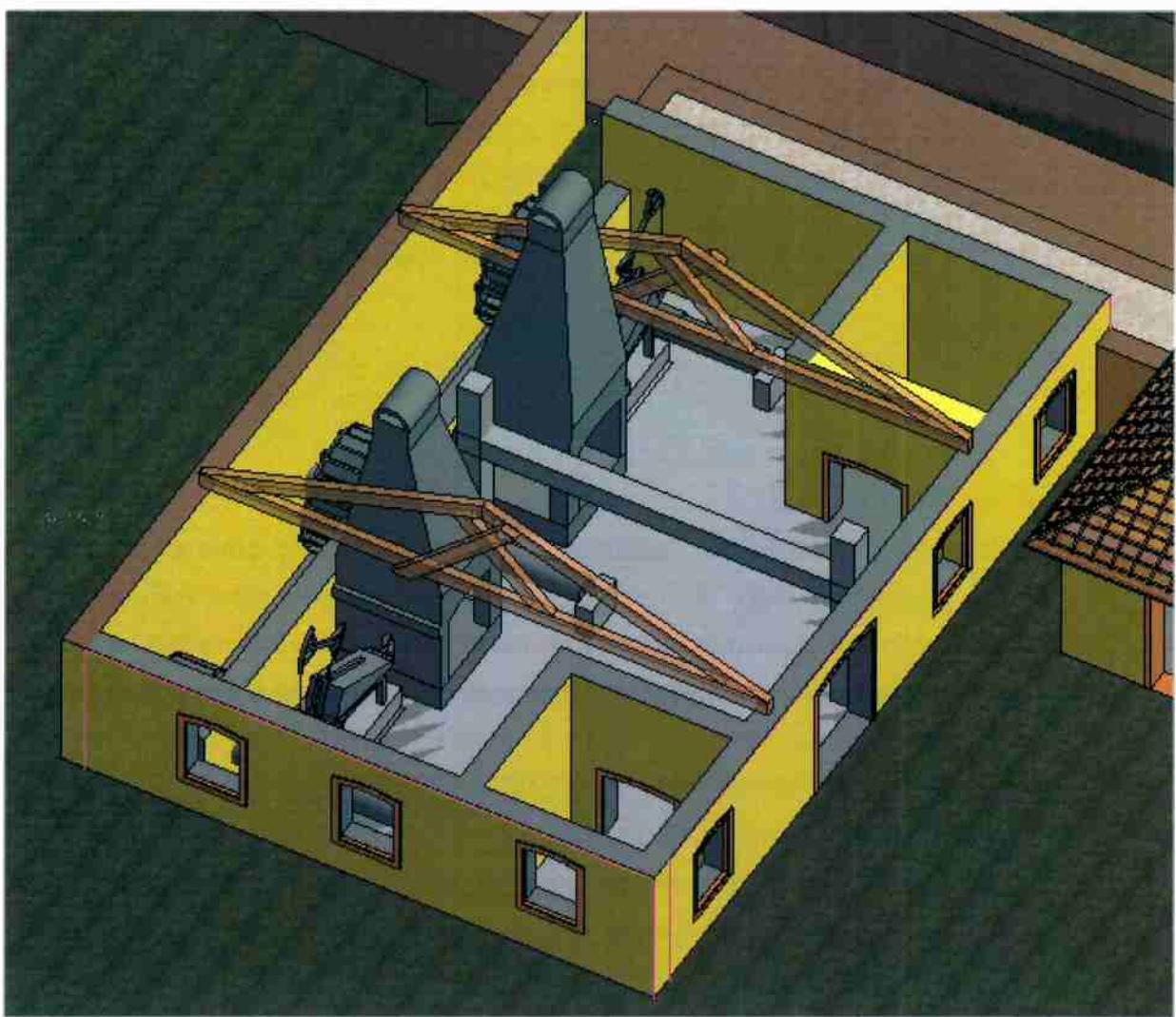
Figura 89 - Casa de fundição



Fonte: autoria própria

### 3.3.2 Casa de Refino

Figura 90 - Casa de refino



Fonte: autoria própria

(...)

A cada lado das casas de piloens a cima referidas, se acha huma casa que tem de frente sessenta e oito palmos, e de fundo cento e quatro, construidas de pedra lavrada, e cal, cobertas de telhas, com hum portaõ, e tres janellas na frente, e tres de hum lado, e em dois dos cantos de cada huma destas casas se achaõ huns torrioens que em cada bum contém dois quartos hum sobre o outro com suas portas, e competentes ferragens que serve de guardar o ferro fabricado e ferramentas: Em

cada huma das sobreditas casas se achaõ duas forjas de retino, e cada forja com huma maquina de folles unidos, movido cada jogo de folles por huma roda de quinze palmos de altura e tres de largo. No meio de cada forja de refino se acha hum malho grande debater ferro em barra, com armaçaõ de maneira, cujos malhos saõ movidos por huma roda de agua que tem quinze palmos de diametro, e cinco de largo. As tres rodas declaradas em cada casa trabalhaõ com agoa por cima que vem de hum caixaõ formado sobre arcosde tijollos, e cal, e no canto de huma das casas existe huma gorita da sentinella (...) (MORAES, 1858).

Foi realizado um desenho baseado na descrição do inventário e das plantas, que pode ser encontrado na figura 90.

### 3.3.3 Casa dos Pilões

CASAS DE PILOENS.

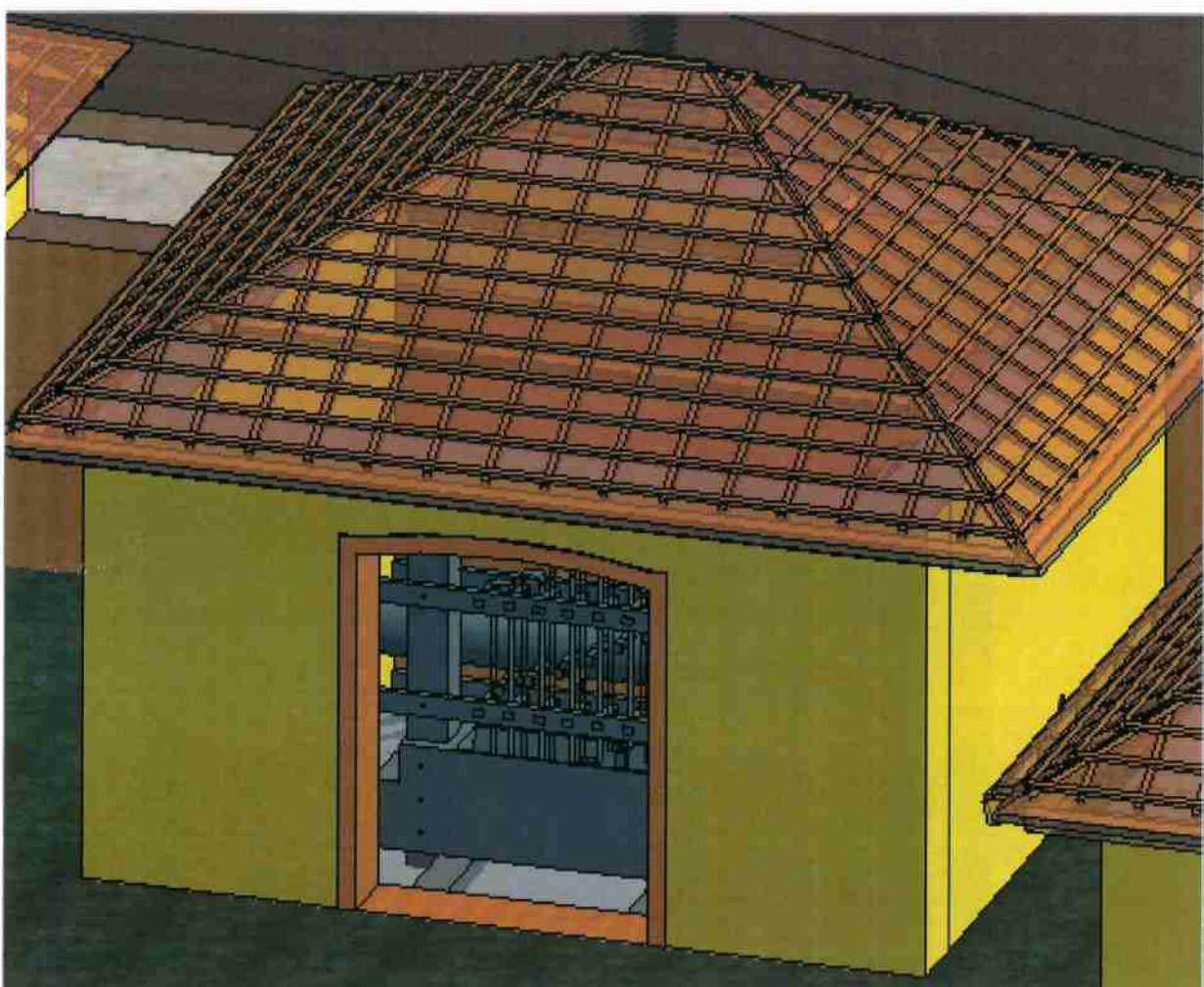
De bum e outro lado da referida casa de fundiçaõ existem duas pequenas casas, construidas sobre pilares de tijollos, e cal, cobertas de telhas, engradadas de madeira exteriormente: Dentro destas casas se achaõ duas maquinas de so'car ou pisar mineral, cada huma das quaes contém hum eixo de madeira com quatro rodetes de ferro fundido para suspender ou tocar as quatro mãos, que piza o mineral. Estas maquinas são movidas por duas rodas de madeira com dezoito palmos de diametro, e quatro de largura, e são tocadas por agua na altura media, e o coixo em que trabalhaõ os piloens, saõ formados de pranchoens de ferro fundido. Os infernos das rodas saõ cortados em rocha viva, e os seus esgotos saõ nos canaes das rodas da fundiçaõ, e a par de cada casa existe huma escada de madeira com seus corrimoens. (MORAES, 1858)

### 3.3.4 Canal

"CANAL.

Hum Canal que conduz a agua da parte do Açude formado de madeira, que vai juntar com a agua que corre pelo alveo do rio abaixo da Casa da Officina, o qual tem de comprimenlo duzentos e oito palmos athé formar o angulo, e de largura cincuenta palmos e meio, formado sobre o lado esquierdo com hum paredão de pedra e cal, que tem de largura, dezasete palmos e meio, e pelo lado direito pela respectiva rocha nativa.

Figura 91 - Casa dos pilões



Fonte: autoria própria

OUTRO.

Hum Canal que conduz a agua da parte do tanque para as maquinas da Fabrica de fundição, e seus annexos, o qual tem a sua entrada ao lado direito do Armazem formado de pedra de cantaria em parte de sua extenção, e em parte de rocha natural, cujo Canal tem de comprimento mil trezentos e trinta palmos em linha recta, de largo vinte, e de fundo doze, e sobre elle urna ponte de hum arco de pedra de cantaria com grades de ferro forjado, e quatro postamentos de pedra de cantaria, quatro vazos de ferro fundido em cima e quatro frades de ferro fundido junto aos ditos vazos, e na continuacao do mesmo Canal existem duas pontes de ferro fundido que declarou o Administrador, e Guarda Armazem terem de pezo duzentas arrobas e treze libras com seu corrimao e balaustres de ferro batido de ambos os lados, isto hé huma, e a

outra sem elle, tendo o Canal na entrada huma e cluza, e com portas". (MORAES, 1858)

### 3.3.5 Monumento

Figura 92 - Coroa usada na aclamação de Dom João VI



Foto: Divulgação - Palácio Nacional da Ajuda

"Na frente dos edifícios da Fabrica nova se acha huma praça formada por hum Caes ao longo do rio Ypanema, de pedra lavrada, e cal, e no centro desta praça se acha hum monumento em forma de columna dorica, toda de ferro fundido, dedicada a Sua Magestade Fidelissima o Senhor Joaõ Dom Sexto, como Protector das Artes, cuja columnna tem de altura incluindo a corôa fundida vinte e sete palmos athé o seu arremate, tudo com o pezo (segundo constou) cento setenta e cinco arrobas e dezasete libras além do fundamento."

(MORAES, 1858)

"O vento foi bastante forte, dando os foles de 6,5 a sete golpes por minuto. Em meados da semana, as cargas diminuíram, a fim de obter ferro melhor, destinado a certas obras de moldagem, entre as quais a de uma coroa, panelas, etc. Como

Figura 93 - Coroa de ferro fundida na FFI



Foto: Acervo on-line do Museu Paulista da USP

o algaraviz de cobre se estragasse um pouco no nariz, derretendo-se, foi retirado e substituído por outro, com 2 3/4 de polegadas de largura, por 1 3/4 de altura, no nariz. Foi assentado com pequena inclinação".

(ESCHWEGE, 1833, p.403)

"Hoje, fundi uma coroa de ferro, de 1/2 centner de peso e, também, numerosas esferas. Não esperava que tudo corresse tão bem". (ESCHWEGE, 1833, p.389 em carta de Varnhagen)

Para imaginarmos como era o monumento ao Rei, temos que conhecer a icônica coroa de João VI. Há uma imagem dela na figura 92. Desde João IV que os reis de Portugal não são coroados, mas sim aclamados, pois segundo a tradição é a "verdadeira Rainha de Portugal" Nossa Senhora da Imaculada Conceição (WIKIPEDIA, s.d.). A coroa voltou a Portugal junto com o Rei João VI em 1821.

Há no museu do Ipiranga, em São Paulo, uma coroa de ferro fundida na FFI (figura 93). Não se tem maiores detalhes sobre sua história, mas provavelmente foi fundida no período de Varnhagen. Ela foi usada para o modelo do monumento.

Na figura 94 podemos ver uma possibilidade de como poderia ser o monumento, baseando-se nas descrições encontradas. Ele aparece nos desenhos do Pink e do Debret, mas por ser muito pequena em relação aos edifícios não dá para observar detalhes.

Figura 94 - Monumento - imagem provisória



Fonte: autoria própria

### 3.4 CONSTRUÇÃO DA MAQUETE

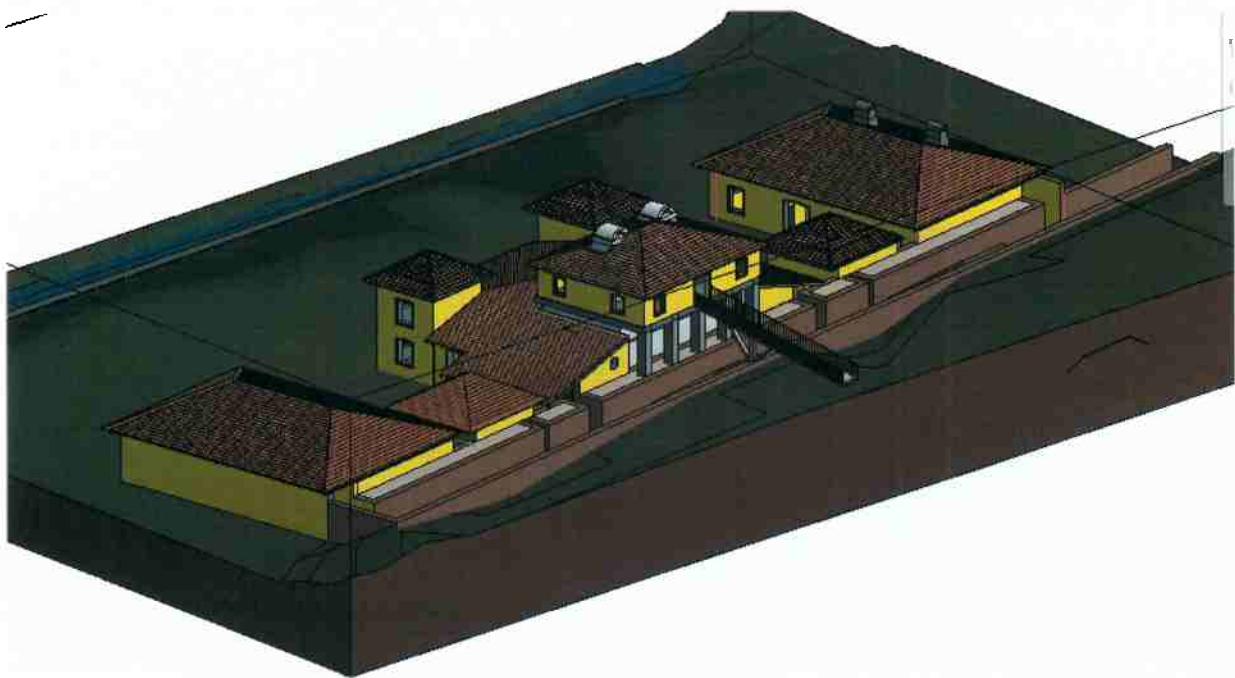
#### 3.4.1 Escolha da Escala

Observa-se em modelos arquitetônicos escalas entre 1:25 e 1:200. Inicialmente pensou-se em utilizar a escala 1:50, que possibilitaria visualização melhor dos detalhes. Mas pelo alto custo de sua fabricação, foi escolhida a escala 1:100, que tendo metade do tamanho possui um volume 8 vezes menor.

#### 3.4.2 Preparação do modelo para a manufatura

Após o modelo finalizado, como existem muitos detalhes internos nos edifícios, é interessante mostrá-los ao público. Pode-se efetuar estes cortes de diversas maneiras, dependendo do foco

Figura 95 - Aspecto geral do modelo



na exibição. Por se tratar de uma fábrica que possui um eixo de simetria, pensou-se em dividir a maquete ao meio, metade com o telhado normal e metade com o telhado removido. Desta forma é possível visualizar as máquinas e fornos em seu interior. Para o edifício da fundição que é único, pensou-se deixa-lo sem o telhado, para ser possível ver o interior.

É interessante mostrar o interior do alto-forno, para o observador ter noção de seu funcionamento. Optou-se pelo corte de 1/4 do forno, pois mostrou-se um corte que mostra bem os detalhes internos tanto das ventaneiras quanto do fechamento do forno, bem como remove pouco material, não perdendo sua aparência. Dessa forma, foram feitos os cortes no modelo conforme figura 96.

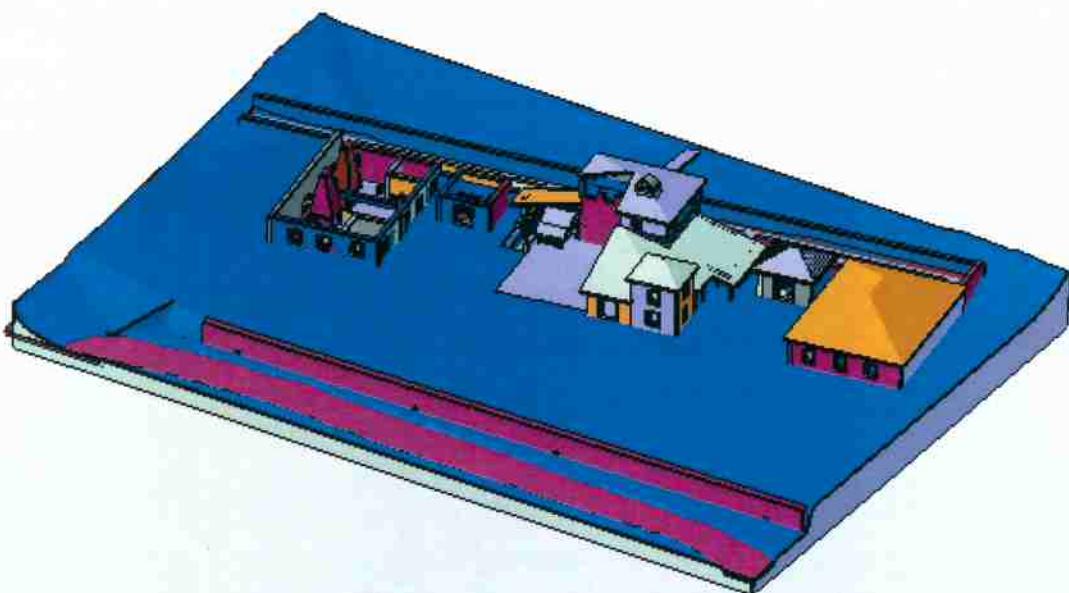
### 3.4.3 Divisão das peças em Manufatura Aditiva e subtrativa

Como o modelo tem vários detalhes logo pensa-se na utilização de impressão 3D para construí-lo. Mas devido ao grande tamanho é necessário dividi-lo em partes menores.

Existem diversas tecnologias de impressão 3D, mas para termos práticos, no nosso país existem cinco métodos principais, que são:

- Filamento fundido
- Sinterização Seletiva a Laser

Figura 96 - Modelo da maquete com cortes



Fonte: autoria própria

- Impressão em gesso.
- PolyJet™
- resinas curáveis (Estereolitografia)

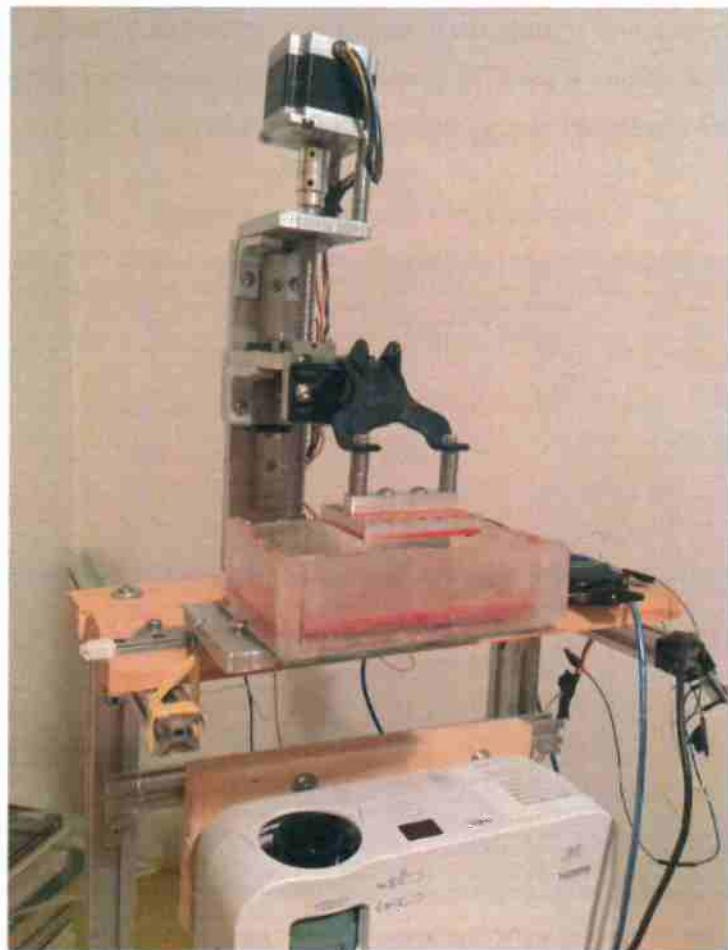
O primeiro método que pensou-se em usar é o filamento fundido, já que existem várias impressoras disponíveis e o custo de material é baixo. Se a escala fosse em 1:50, poderia ser um bom método já que os detalhes seriam grandes e facilmente imprimíveis. Mas para a escala 1:100 não é adequada, pois os detalhes são muito pequenos, com exceção do alto-forno, que possui tamanho bem maior.

Um método que é existe no mercado é a sinterização a laser, principalmente de nylon. Mas é um método bastante caro, muito útil em peças funcionais com muitos detalhes, em prototipagem industrial que exigem resistência mecânica, mas não no neste caso.

O terceiro método, impressão em gesso foi cogitado também, mas os fornecedores de serviços que o fazem não nos recomendaram, na escala que seria feita a maquete. Recomendaram o sistema PolyJet™, que se trata de impressão com fotopolímero líquido curável que é depositado por um sistema de impressão parecido com impressoras jato de tinta. A qualidade é muito alta, permitindo detalhes com perfeição. Mas devido ao grande volume de peças que seriam necessárias, não foi escolhido.

A última forma de impressão disponível mostrava a melhor relação custo x benefício para a função que propomos, já que permite detalhes bem como o custo não é tão elevado quanto o Polyjet™. Existe a estereolitografia DLP e SLA e ambas seriam adequadas ao projeto.

Figura 97 - Protótipo de impressora estereolitográfica DLP usada



Fonte: Acervo pessoal, 2018

A impressão 3D popularizou-se devido à existência de comunidades *maker* e projetos *open-source*, que permitiram ao próprio usuário fabricar o seu equipamento, a um custo de uma fração do valor do equipamento. Isso aconteceu inicialmente para impressoras de filamento fundido, depois para as SLA/DLP e vêm ocorrendo para as de sinterização a laser. Para a fabricação de sua própria impressora DLP, o maior custo é o projetor DLP. Idealmente deve-se usar projetores *full-HD* para otimizar a qualidade, mas qualquer projetor DLP com as devidas modificações pode ser utilizado. O custo de um projetor usado em bom estado é de cerca de 10% o custo de mercado para a impressão de todas as máquinas, fornos e detalhes. Por se tratar de um trabalho acadêmico, onde não é necessária uma precisão extrema, onde deseja-se minimizar o custo e maximizar-se o aprendizado, optou-se pela construção de uma impressora

DLP. Por fugir totalmente ao escopo do proposta deste trabalho, não será descrito aqui sua construção e detalhes de funcionamento. Foi usado um projetor NEC-VE282, fuso de esferas de 12mm, recipiente feito em acrílico, revestido com PDMS. A eletrônica usada foi um Raspberry Pi 3, rodando sistema operacional Rapsberian com o software NanoDLP instalado. Pode-se ver uma imagem da impressora na figura 97.

Como modelo é grande e ao mesmo tempo possui detalhes, o solo e os edifícios serão feitos por usinagem e será usado o protótipo da impressora 3D para a impressão dos detalhes, como máquinas, fornos e rodas. O alto-forno será impresso usando tecnologia FDM.

Figura 98 - IUsinagem de PVC expandido



Fonte: Acervo pessoal, 2018

### 3.4.4 Peças usinadas

Para o solo e as paredes dos edifícios foram confeccionados de chapas de PVC expandido. Foram utilizadas chapas de 10mm para o terreno da maquete, chapas de 6mm para as paredes dos edifícios e chapas de 2mm para os telhados e detalhes. Para a realização do corte foram exportadas as projeções em 2D das peças cortadas. Foi usado o software Cut2D para gerar os percursos de ferramenta. A ferramenta usada nos cortes foi a router Etruska EK01. Pode-se ver na figura 98 fotos desse processo e nas figuras 99, 100 e 101 o resultado final, com as peças já coladas.

Figura 99 - Peças usinadas



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 100 - Peças usinadas



Fonte: Acervo pessoal, 2018

### 3.4.5 Impressão 3D

O alto-forno foi impresso por processo FDM em uma impressora RepRap Prusa, conforme figura 102.

Para a impressão 3D por processo SLA é necessário adicionar suportes em algumas regiões do modelo para permitir que a impressão aconteça com êxito. Para sua colocação foi usado o *software* Meshmixer. Uma foto desta etapa pode ser vista na figura 103. O *software* de impressão foi o NanoDLP, *software* que faz o fatiamento das camadas. A resina usada foi VM-300 da MakertechLabs e a resina WaxCast da MakerJuice.

Figura 101 - Peças usinadas - detalhe do edifício da fundição



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 102 - Impressão 3D por processo FDM

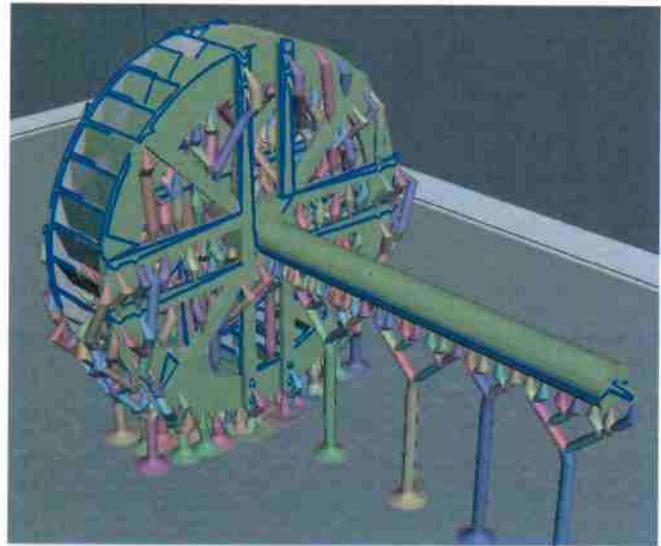


Fonte: Acervo pessoal, 2018

Imagens das peças impressas por SLA podem ser visualizadas nas figuras 104 e 105.

Tanto as peças impressas quanto as peças usinadas foram pintadas em cor cinza, e pode-se visualizar a maquete finalizada nas imagens 106, 107, 108 e 109.

Figura 103 - Modelo da roda da sopradora com suportes para impressão



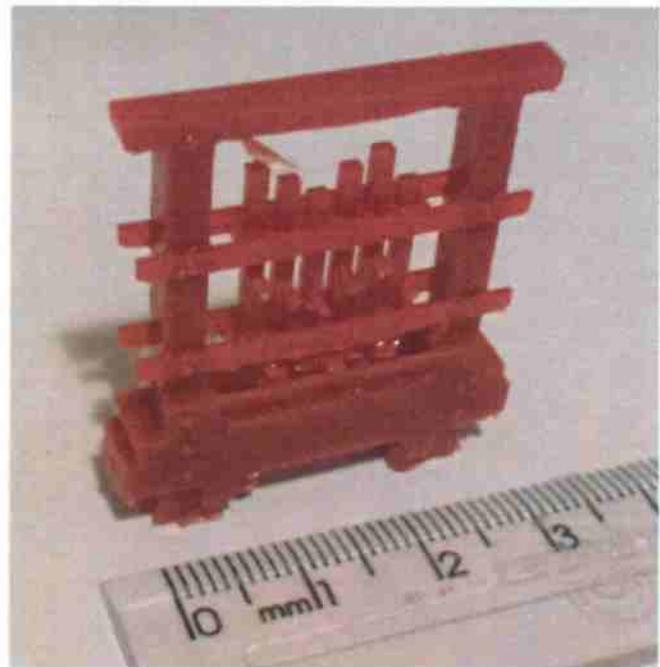
Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 104 - Impressão SLA



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 105 - Impressão do moinho em escala 1:100, por processo SLA



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 106 - Detalhe do edifício do refino na maquete finalizada



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 107 - Detalhe do monumento na maquete finalizada



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 108 - Maquete finalizada



Fonte: Acervo pessoal, 2018

Figura 109 - Maquete finalizada



Fonte: Acervo pessoal, 2018

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou a apresentação do método de produção do ferro no início da primeira revolução industrial, insumo fundamental para que ela ocorresse. Para tal, foi discorrido sobre os métodos de produção de ferro com um enfoque especial para o alto forno da época, máquinas sopradoras bem como equipamentos de moagem de minério e refino do ferro.

A análise de documentos e livros sobre o período assim como visitas ao local possibilitaram a modelagem virtual de uma versão da fábrica neste período. A modelagem levou em consideração diversos fatores, como: topografia do terreno, descrição de autores sobre as diferentes gestões e descrição sobre diferentes maquinários antigos. A modelagem virtual unida com tecnologias de manufatura extrativa e aditiva possibilitaram a confecção do modelo físico da fabrica, obtendo-se dessa maneira uma versão em realidade virtual e uma maquete física.

O objetivo geral desse trabalho foi concluído com a apresentação da FFI de maneira virtual e física. Dessa forma podemos visualizar um pouco melhor a história industrial, neste ano que completa 200 anos da primeira corrida de ferro guza da FFI, que na vanguarda da época possuía toda uma tecnologia siderúrgica comparada às melhores fábricas do mundo.

## Referências

- AGARWALA, M. et al. Direct selective laser sintering of metals. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald, v. 1, n. 1, p. 26–36, mar 1995. DOI: 10.1108/13552549510078113.
- AKERRÉN, O. **Svenska Blåsverkens Historia: Från År 1786**. [S.l.]: Delém, 1805.
- ALEMBERT, J. L. R. d'. **Recueil de planches, sur les sciences, les arts libéraux, et les arts méchaniques, avec leur explication**. Paris: Troisieme Livraison, 1765.
- APPLETON, D. **Appleton's Dictionary of Machines, Mechanics, Engine-work, and Engineering, Volume II**. [S.l.]: D. Appleton, 1852. Fls. 79 e 80.
- BIRINGUCCIO, V. **De La Pirotechnia**. [S.l.: s.n.], 1559.
- BOUCHU, E.-J. Forges. in: **Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, volume 7**, páginas 135-168, 1757.
- BOWIE, J.; POHLSANDER, D. Nassawango iron furnace recording project. disponível em: <http://eaiainfo.org/wp-content/uploads/2014/08/Furnace-Town-National-Engineering-Landmark.pdf>, 1989.
- DELAUNAY, M. **Curso elemental de mecánica teórica y aplicada**. [S.l.: s.n.], 1864.
- DIDEROT, D. **Recueil de planches, sur les sciences, les arts liberaux, et les arts mechaniques**. [S.l.]: Chez Briasson, 1762.
- DONALDSON, W. **Principles of Construction and Efficiency of Water-wheels**. Londres: E. & F.N. Spon, 1876.
- DUPRÉ, L. Memoria sobre a fabrica de ferro s. joão de ipanema. **Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto - 4 edição**, 1885.
- DURFEE, W. F. The development of american industries since columbus. **The Popular Science Monthly**, 1890.
- ESCHWEGE, W. L. von. **Pluto Brasiliensis**. [S.l.: s.n.], 1833. Tradução de Domicio de Figueiredo Murta.
- FERRAND, P. A indústria do ferro no brazil. **Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto - 4 edição**, 1885.

GARCIA, F. F. O principal produto da fábrica de ferro monlevade. disponível em: <http://monlewood.blogspot.com.br/2017/>, 2017.

GARNEY, J. C. **Garney's omarbetad Masmästeri**. [S.l.]: Garney's omarbetad Masmästeri, 1816.

GERBOVIC, T. **O Olhar Estrangeiro em São Paulo até meados de 1800: relatos de viajantes ingleses e norte-americanos**. 2009. Dissertação (Mestrado) — USP.

GRAY, A. L. P. **The Chemistry of the Arts: Being a Practical Display of the Arts and Manufactures which Depend on Chemical Principles, Volume 2**. [S.l.]: Carey & Lea, 1830.

HASSENFRATZ, J.-H. **La sidérotechnie ou L'art de traiter les minérais de fer**. [S.l.: s.n.], 1812. Volume 1.

LANDGRAF, F. J. G.; ARAUJO, P. E. M. A arquitetura do alto-forno e a biblioteca perdida de ipanema: técnica e conhecimento no brasil joanino. **14º Seminário Nacional da História da Ciência e Tecnologia**, 2014.

LANDGRAF, F. J. G. et al. Evolução do perfil interno dos altos fornos brasileiros do século xix. **47º Seminário da Redução de Minério de Ferro da ABM Week**, outubro 2017.

MELLO, C. H. P.; GUEDES, F. N. Análise da qualidade superficial e dimensional em peças produzidas por modelagem por deposição de material fundido (fdm). **Revista Produção Online**, 2010.

MORAES, F. A. P. de. **Subsídios para A História do Ypanema**. [S.l.]: Lisboa : Imprensa Nacional, 1858.

NORDEWALL, S. R. **Afhandling rörande mechaniquen med tillämpning i synnerhet til bruk och bergwerk**. [S.l.]: J. A. Carlbohm, 1794.

OVERMAN, F. **The Manufacture of Iron, in all its various branches**. [S.l.]: Philadelphia : H. C. Baird, 1851.

PERCY, J. **Die Metallurgie: Gewinnung und Verarbeitung der Metalle und ihrer Legirungen, in praktischer und theoretischer, besonders chemischer Beziehung, Volume 2, Edição 2**. [S.l.]: F. Vieweg und Sohn, 1868.

PHAM, D.; GAULT, R. A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier BV, v. 38, n. 10-11, p. 1257–1287, oct 1998. DOI: 10.1016/s0890-6955(97)00137-5.

RODRIGUES, H. A. Visite a floresta nacional de ipanema. website da Prefeitura Municipal de Iperó, <http://www.ipero.sp.gov.br/floresta-nacional-de-ipanema/>, acessado em 05/06/2018.

SACHS, E. et al. Production of injection moulding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. **Proceedings 53rd Annual Conference ANTEC**, v. 1, p. 997–1003, Maio 1995.

SANTOS, N. P. dos. **A Fábrica de Ferro São João de Ipanema: Economia e Política nas últimas décadas do Segundo Reinado ( 1860 - 1889 )**. [S.I.: s.n.], 2013.

SPONG, M. **Household Cyclopedia of 1881**. [S.I.]: Thomas Kelly, 1881. Folha 609.

SUART, G. Sur les soufflets à piston. **Journal des Mines**, número **XXXVIII**, p. 105–115, 1798.

TEXAS INSTRUMENTS. **Explore DLP technology**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lsds/ti/dlp-technology/dlp-technology-home.page>>. Acesso em: 30 maio 2016.

VERRILL, J. Nassawango hot blast furnace. disponível em: <http://eaiainfo.org/2014/08/21/nassawango-hot-blast-furnace-snow-hill-md/>, 2014.

WAKELIN, P. **Blaenavon Ironworks and World Heritage Landscape**. [S.I.]: Cadw Welsh Government, 2006.