



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 108

**DOS MINERAIS AOS MATERIAIS DE ARQUITETURA E
PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO: EDIFÍCIOS E
ORNAMENTOS METÁLICOS DOS SÉCULOS XIX E XX EM
BELÉM DO PARÁ**

Tese apresentada por:

FLÁVIA OLEGÁRIO PALÁCIOS

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

Palácios, Flávia Olegário, 1986-

Dos minerais aos materiais de arquitetura e processos de degradação: edifícios e ornamentos metálicos dos séculos XIX e XX em Belém do Pará / Flávia Olegário Palácios. – 2015.

xvii, 95 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Rômulo Simões Angélica

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Arquitetura industrial – Belém (PA). 2. Ligas de ferro - Belém (PA). 3. Intemperismo - Belém (PA). 4. Processos de fabricação - Belém (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 720.98115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica



**DOS MINERAIS AOS MATERIAIS DE ARQUITETURA E
PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO: EDIFÍCIOS E
ORNAMENTOS METÁLICOS DOS SÉCULOS XIX E XX EM
BELÉM DO PARÁ**

TESE APRESENTADA POR

FLÁVIA OLEGÁRIO PALÁCIOS

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

Data de Aprovação: 16 / 06 / 2015

Banca Examinadora:

Prof. RÔMULO SIMÕES ANGÉLICA
(Orientador-UFPA)

Prof. MARCONDES LIMA DA COSTA
(Membro-UFPA)

Prof. ROBERTO DE FREITAS NEVES
(Membro-UFPA)

Prof. JOSÉ CARLOS DE ARAUJO CARDOSO FILHO
(Membro-UFPA)

Prof.ª VANDA PORPINO LEMOS
(Membro-UFPA)

Aos meus queridos avós,
Neide Colares Palácios e Oswaldo do Rosário Olegário
(*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João e Kátia, pelo amor incondicional. Obrigada por me apoiarem em todas as minhas empreitadas profissionais e investirem em mim, e sempre estarem disponíveis para consolar nos momentos difíceis. Agradeço por sempre incentivarem à me profissionalizar na língua inglesa: foi elemento decisivo no desenvolvimento da tese. Sem dúvida, são os melhores pais do mundo.

Ao meu querido orientador, Rômulo Angélica, por acreditar na nossa pesquisa, ainda que fosse fora de sua área de interesse. Agradeço por todos os ensinamentos, paciência, intermináveis correções, e por aceitar (com muitas reticências) todos os meus planos, ainda que me desviassem um pouco dos caminhos do doutorado. Obrigada por me ensinar a ser pesquisadora.

À Deus, por toda a força. Sou muito grata.

Ao meu irmão, João, pelo enorme carinho e apoio durante esses quatro anos de doutorado, e toda a vida. Obrigada pelos dias de distração, pelo companheirismo, e por compartilhar momentos de felicidade com sua linda família.

À minha eterna professora e amiga do peito, Thais Sanjad, pela constante presença nessa caminhada. Agradeço imensamente o apoio nas pesquisas, artigos, concursos, e por me incluir em todos os planos do LACORE.

Aos meus amigos LACOREtos, que sempre me proporcionaram momentos de grande alegria e parceria. Obrigada por ficarem muitas horas no sol quente me ajudando a serrar manualmente minhas amostras de ferro. Agradecimento especial à “velha guarda”: Stephanie, Mayra, Pâmela, Renata, Alexandre, Carol e Rose por sempre me acompanharem em todos os momentos dessa caminhada.

Aos meus amigos do Curso de Museologia - ICA, em especial Sue e Hugo, que me acolheram como parte da família. Agradeço por compreenderem minha ausência durante os meses finais do doutorado, e por me ajudarem nos momentos difíceis da vida de docente.

À minha família e amigos por todo o apoio, sempre. Com a presença constante de vocês tudo fica mais fácil. Agradecimento especial às amigas Verena, Aline, Manuella e Marcella pelo imenso companheirismo.

Aos colegas do LCM, em especial Kelly, André e Manu, pela ajuda nos ensaios de Difractometria de Raios-X.

À todos os professores do PPGG pelos ensinamentos e por disponibilizarem os laboratórios para diversos ensaios laboratoriais. Obrigada também aos membros da

coordenação do PPGG, em especial a Cleida, por sempre quebrar um galho, puxar orelha, e curtir boas risadas.

Aos membros do LabMEV, pelo auxílio durante as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Aos órgãos de preservação do patrimônio histórico, IPHAN e DEPHAC, por autorizarem a retirada de amostras dos edifícios e ornamentos abordados nesta pesquisa.

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa de doutorado.

“[...] Mas, esses edifícios, uma das glórias de nosso país, preservados da ruína, permanecerão ainda de pé durante séculos, para testemunhar a devoção de alguns homens mais ligados a perpetuar esta glória que seus interesses particulares.”

Eugène Viollet-Le-Duc

RESUMO

O uso do ferro na arquitetura intensificou-se a partir da segunda metade do século XVIII na Europa, e sua influência estendeu-se a vários países em crescimento, como o Brasil. Belém (PA) foi uma das cidades que recebeu maior número de edifícios e ornamentos importados nos séculos XIX e XX, provenientes especialmente da Inglaterra, França, Bélgica e Portugal. Atualmente, Belém possui o maior número de representantes do patrimônio arquitetônico em ferro remanescente do país. Apesar de serem testemunhos relevantes de técnicas construtivas, alguns desses edifícios foram desmontados, e permanecem no aguardo de ações de restauro. Além disso, os estudos acerca dessas construções, atualmente, são mais voltados para as características históricas gerais e visuais, sem destaque para o entendimento dos materiais de construção, gerando processos restaurativos empíricos. O conhecimento sobre esses materiais são importantes para o entendimento aprofundado de tipos de ligas metálicas utilizadas, bem como diferentes tipos de fabricação e intemperismo atuantes, visando futuros processos restaurativos com bases científicas. O objetivo principal desse trabalho consiste em compreender os metais em sua diversidade na arquitetura de ferro e sua fabricação, bem como processos de degradação de edifícios e ornamentos metálicos dos séculos XIX e XX em Belém. Dessa forma, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: a) caracterização física, mineralógica e química de ligas e patologias; b) identificação dos diferentes tipos de ligas e formas de produção; c) traçar a evolução da metalurgia importada para a Amazônia. Os exemplares da arquitetura de ferro escolhidos para a pesquisa foram o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, o antigo chalé de ferro da Imprensa Oficial do Estado do Pará, e os ornamentos dos túmulos e mausoléus do Cemitério Nossa Senhora da Soledade, em função de sua representatividade frente à procedência e variedade de peças. Os métodos utilizados foram a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para a caracterização física e análise química pontual; e Difractometria de Raios-X (DRX) na identificação mineralógica. Os resultados, apresentados na forma de três artigos, indicaram: 1) ligas de ferro compostas majoritariamente por ferrita; 2) variações texturais indicando quatro classificações para o grupo de edifícios: ferro fundido nodular; ferro fundido cinzento tipo E; ferro forjado e ferro fundido cinzento tipo B; 3) três classificações de ferro cinzento para os ornamentos de diversas proveniências, dentre A, B e D; 4) predominância da corrosão como produto da alteração intempérica, constituída principalmente por goethita e hematita; 4) camadas de tinta remanescentes, formadas por zinco metálico, e alterações representadas por zincita e hidrozincita. A partir dos resultados desta pesquisa foi possível identificar os processos de

fabricação da arquitetura de ferro, e enriquecer com informações físicas, químicas e mineralógicas a história desta modalidade arquitetônica, bem como subsidiar futuras ações restaurativas.

Palavras-chave: Arquitetura de ferro. Ligas metálicas. Produtos de intemperismo. Processos de fabricação históricos.

ABSTRACT

The use of iron in architecture was intensified during the second half of the XVIII century in Europe, and its influence spread over many countries in growth, such as Brazil. Belém (PA) was one of the cities that received the larger amount of building and ornaments imported, especially from England, France, Belgium and Portugal, during the XIX e XX centuries. Currently, Belém holds the largest number of iron architecture heritage remnants in the country. Despite of having great importance in construction techniques, many of these buildings were disassembled and remain on the wait for restoration processes. Also, studies about these constructions only focus on historical and visual discussion, with no understanding of construction materials, causing empirical restoration processes. The knowledge about these materials is important to the detailed study of historical metal alloys, and different fabrication techniques, as well as weathering action, aiming future restoration processes with scientific bases. The main objective of this research is to understand the historical metals, their diversity in iron architecture and fabrication processes, and also weathering action in iron buildings and ornaments from the XIX and XX centuries in Belém. Thus, the following specific objectives were established: a) physical, chemical and mineralogical characterization of alloys and pathologies; b) identification of different kinds of alloys, in order understand the production types; c) determination of metallurgy evolution imported to the Amazon. The materials chosen for this research came from three different sites, due to their representativeness and diversity of pieces and origin: Mercado de Ferro do Ver-o-Peso building; the former *chalet* from the State's Press; and the ornaments from tombs and mausoleums of the Soledade Cemetery. The methods used were Scanning Electron Microscopy (SEM) for physical characterization and punctual chemical analysis; and X-Ray Diffractometry (XRD) for mineralogical analysis. The results were presented in three scientific papers indicating: 1) iron alloys mostly composed by ferrite; 2) textural variations exhibiting four types for the building group: nodular cast iron, gray cast iron type E, wrought iron and gray cast iron type B; 3) three classification of gray cast iron for the ornamental group of diverse origins, among A, B and D; 4) corrosion as main weathering action, and products constituted by goethite and hematite; 4) remnant paint coats, formed by metallic zinc, and its products of alteration represented by zincite and hidrozinicite. Through the results

of this research it was possible to indicate the evolution of processes in iron architecture production, and enrich this research area with scientific information, as subsidence for future restorative processes.

Keywords: Iron architecture. Metal alloys. Weathering products. Historical fabrication processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reservatório Paes de Carvalho durante a sua montagem em 1907 (A); após a sua inauguração em 1908 (B); e durante a década de 70, quando já compartilhava sua imponência com construções modernas (C)	2
Figura 2 - Antigo chalé de ferro da IOEPA quando montado em 1978 (A) e desmontado em 2007 (B).	3
Figura 3 - Organograma dos objetivos gerais e específicos da tese.....	5
Figura 4 - Anúncio de ornamentos metálicos produzidos pela <i>Guillot-PelletierFils et Cie</i> , em revista francesa (A); Coreto da praça Batista Campos (B).	10
Figura 5 - Guarda-corpos das varandas do Palacete Faciola (A), Casa do Governador (B) e Palacete Pinho (C)	11
Figura 6 - Reservatório de São Brás (A) e Reservatório Paes de Carvalho (B).	12
Figura 7 - Área do Ver-o-Peso com a construção do Mercado de Ferro (A); Mercado de Ferro do Ver-o-Peso (B).	13
Figura 8 - Chalés de ferro da UFPA (A) e do Bosque Rodrigues Alves (B).	14
Figura 9 - Antigo chalé de ferro da IOEPA, em 1978.....	14
Figura 10 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA depositadas no Bosque Rodrigues Alves no fim da década de oitenta do século XX.	15
Figura 11 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA armazenadas no galpão de Engenharia Hidráulica (A e B); peças depositadas no exterior do galpão (C).	16
Figura 12 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA armazenadas no setor de transportes da UFPA após o remanejamento.	16
Figura 13 - Diagrama de equilíbrio ferro-carbono	17
Figura 14 - Utilização de fornos rudimentares na China antiga, com uso de carvão	19
Figura 15 - Ferro fundido cinzento tipo A (A), tipo B (B), tipo C (C), tipo D (D), tipo E (E) e ferro fundido nodular (F).	20
Figura 16 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA expostas à constante precipitações (A), e expostas à ambiente de elevada umidade (B).	23
Figura 17 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA em contato direto com o solo (A, B e C).	23
Figura 18 - Chapa do antigo antigo chalé de ferro da IOEPA, com esbranquiçamento (A); coluna com perda de brilho e alteração de coloração (B); estrutura com empolamento e destacamento da camada de revestimento (C)	24
Figura 19 - Peças de vedação do antigo chalé de ferro da IOEPA com diminuição de espessura (A); perda de partes (B); e fratura (C).	24
Figura 20 - Esquema dos critérios de seleção do elenco da tese.....	25
Figura 21 - Indicação das áreas utilizadas para amostragem do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso.	27

Figura 22 - Locais de retirada das amostras VP.EP1 (a), VP.EP4 (B), e VP.EJ1 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de estruturas.	27
Figura 23 - Locais de retirada das amostras VP.OT1 (a), VP.T1 (B), e VP.T2 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de telhas.	28
Figura 24 - Locais de retirada das amostras VP.OG1 (A), VP.C1 (B), e VP.P1 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de ornamentos.	28
Figura 25 - Mapeamento do Cemitério da Soledade com a marcação dos portões metálicos em azul, e gradis em vermelho	30
Figura 26 - Portões de mausoléus selecionados do Cemitério da Soledade.....	31
Figura 27 - Gradis de túmulos selecionados do Cemitério da Soledade.	31
Figura 28 - Amostras preparadas para o MEV (A), embutidas em resina de poliéster; Amostra pulverizada para ensaio de DRX (B).....	33
Figura 29 - Evolução das ligas de ferro Tipo B nas diferentes amostras de ornamentos nos exemplares da pesquisa.	84
Figura 30 - Evolução das ligas de ferro forjado nos diferentes exemplares da pesquisa.	85
Figura 31 - Evolução das ligas de ferro laminado nos diferentes exemplares da pesquisa.....	86
Figura 32 - Imagem esquemática dos produtos de corrosão nos edifícios.....	86
Figura 33 - Imagem esquemática representativa de produtos do intemperismo da tinta, apresentando textura em camadas.	87
Figura 34 - Imagem esquemática indicando a presença de camada de corrosão entre o metal sem alteração intempérica e a camada de tinta.	87
Figura 35 - Linha do tempo esquemática da arquitetura de ferro em Belém	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Identificação dos objetos de estudo, com a especificações do tipo de estrutura arquitetônica e procedência.	26
Tabela 2: Tabela descritiva das amostras do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso.	27
Tabela 3: Tabela descritiva das amostras do chalé desmontado.	29

LISTA DE SIGLAS

CDP – Companhia das Docas do Pará

DPHAC – Departamento do Patrimônio Histórico, Artístico e Cultural do Estado do Pará

IOEPA – Imprensa Oficial do Estado do Pará

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional

LabMEV – Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura

LCM – Laboratório de Caracterização Mineral

LACORE – Laboratório de Conservação, Restauração e Reabilitação

NUMA – Núcleo de Meio Ambiente

SECULT – Secretaria de Estado de Cultura do Pará

UFPA – Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 LEVANTAMENTO DO PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 CONTEXTO HISTÓRICO: A INSERÇÃO DO FERRO NA ARQUITETURA.....	6
2.1.1 A influência europeia na arquitetura de ferro em Belém: dos ornamentos às estruturas complexas	9
2.1.3 Transformações e permanências da arquitetura de ferro belenense: desmontagem e esquecimento	14
2.2 FERRO FUNDIDO	17
2.2.1 Características gerais.....	17
2.2.2 Produção: matéria-prima e técnicas	18
2.2.3 Microestrutura	20
2.2.4 Componentes químicos e mineralógicos constituintes.....	21
2.3 PROCESSOS E PRODUTOS DE INTEMPERISMO NA ARQUITETURA DE FERRO.....	21
2.3.1 Meios corrosivos: atmosfera, água, e solos.....	22
2.3.2 Anomalias em edifícios e ornamentos metálicos	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 ESCOLHA DO ELENCO: CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO.....	25
3.2 AMOSTRAGEM.....	26
3.2.1 Mercado de Ferro do Ver-o-Peso	26
3.2.2 Chalé desmontado	28
3.2.3 Ornamentos do Cemitério da Soledade	29
3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ARTIGO 01: <i>THE METAL ALLOYS FROM THE XIX CENTURY AND WEATHERING ACTION IN THE MERCADO DE FERRO DO VER-O-PESO BUILDING, NORTHERN BRAZIL: IDENTIFICATION WITH THE USAGE OF LABORATORY ANALYSIS</i>	35
4.2 ARTIGO 02: <i>THE DISASSEMBLED IRON CHALET FROM THE XIX CENTURY AMAZON: CHARACTERIZATION OF HISTORICAL METAL ALLOYS AND CORROSION PROCESSES</i>	45
4.3 ARTIGO 03: <i>THE METAL ORNAMENTS AT THE SOLEDADE CEMETERY: THE DIVERSITY OF IRON ALLOYS IN MORTUARY ARCHITECTURE FROM XIX CENTURY IN NORTHERN BRAZIL</i> ..	64
5. CONCLUSÕES	82
5.1 VARIEDADE NAS FORMAS DE PRODUÇÃO E A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE FERRO EM RELAÇÃO À ARQUITETURA	82
5.2 EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO	83
5.3 IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INTEMPERISMO	86
5.4 RELAÇÕES TEMPORAIS DOS EDIFÍCIOS E ORNAMENTOS	87
REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

1.1 LEVANTAMENTO DO PROBLEMA

O uso de elementos construtivos confeccionados em metais é bastante antigo. Seu emprego mais comum era em reforços de construções, tirantes e peças para consolidar paredes, caracterizando-os como material secundário ou de apoio nas construções até o século XVIII (Silva, 1987; Kuhl, 1998).

As técnicas para utilização dos metais já existiam desde as civilizações clássicas, mas só foram desenvolvidas mais intensamente no Ocidente a partir da Revolução Industrial, permitindo aumentar a quantidade e a qualidade da produção dos produtos finais, diminuindo ainda mais o custo da produção.

Tais elementos metálicos, especialmente o ferro, desempenharam papel importante em numerosos setores no contexto pós-Revolução Industrial, como na construção civil; na produção de variados maquinários, aumentando o desempenho produtivo; e no desenvolvimento do transporte ferroviário, compondo trilhos, locomotivas e vagões; entre outros.

Em especial no contexto da construção civil, o emprego dos metais foi bastante variado, desde a fabricação de ornamentos até grandes estruturas. Sua intensidade evoluiu até mesmo para a confecção de edifícios inteiramente metálicos, surgindo a tipologia arquitetônica conhecida como “arquitetura do ferro” (Kuhl, 1998), importada da Europa para diversos países, como o Brasil.

Estas construções chegaram no país para suprir a demanda das grandes transformações pelas quais diversas cidades estavam passando, já que tais edifícios eram de fácil transporte e montagem. Entretanto, representou pequena proporção na grande quantidade de edificações feitas na época, mas nem por isso de pouco valor.

Uma das capitais brasileira mais influenciadas, pela arquitetura em questão foi Belém (PA), durante o Ciclo da Borracha (séculos XIX e XX). Foram importados todos os tipos de bens arquitetônicos, dentre diversos exemplares de ornamentos, estruturas, mobiliários urbanos e edifícios metálicos (Derenji, 1993).

Os exportadores da arquitetura de ferro que mais se destacaram foram a Inglaterra, a França e a Bélgica. Dentre os exemplares arquitetônicos importados inteiramente em ferro estão: Mercado de Ferro do Ver-o-Peso; os chalés de ferro da UFPA, do Jardim Botânico Bosque Rodrigues Alves, e da antiga Imprensa Oficial do Estado do Pará (IOEPA); os coretos

das Praças da República e Batista Campos; o reservatório de água de São Brás; e os galpões da Companhia das Docas do Pará.

Em relação aos edifícios que possuem ornamentos metálicos, os de maior destaque são o Mercado de Carne do Ver-o-Peso, a antiga Livraria Universal, o Paris N'América e o Arquivo Público. Existem também remanescentes de diversas calhas, portões, grades e gradis importados espalhados pelas residências dos bairros mais antigos de Belém.

Fora do âmbito da construção de edifícios, outro grande acervo de ornamentos metálicos é o Cemitério Nossa Senhora da Soledade, com túmulos e mausoléus de grande valor histórico e artístico.

Mesmo possuindo valor histórico, tecnológico, social e arquitetônico, muitos desses edifícios e demais estruturas metálicas do final do século XIX e início do XX não existem mais, devido às intensas transformações urbanas. Muitos deles foram desmontados, e o paradeiro das peças que os compunham não é conhecido, como por exemplo, as estruturas da Estrada de Ferro de Bragança e o Reservatório Paes de Carvalho (Figura 1).

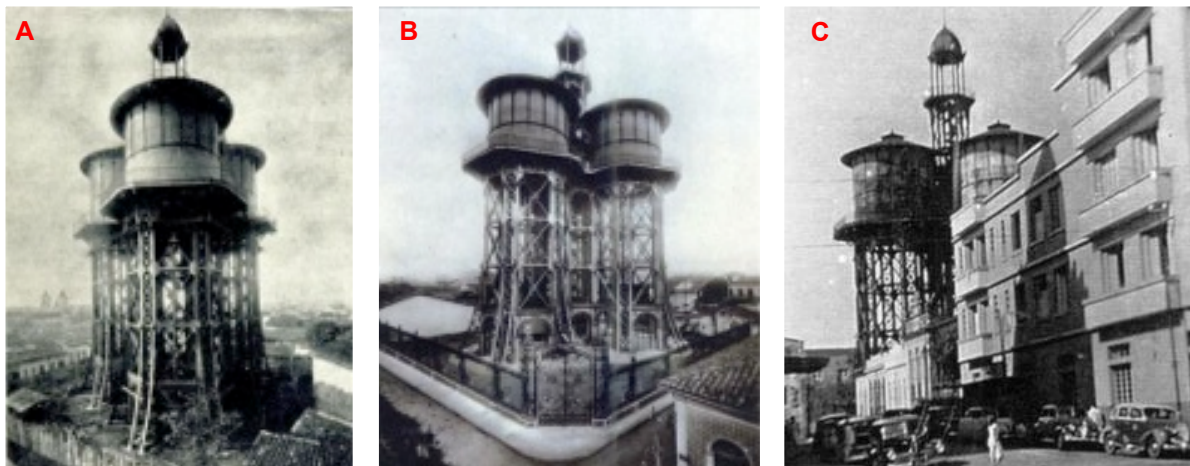


Figura 1 - Reservatório Paes de Carvalho durante a sua montagem em 1907 (A); após a sua inauguração em 1908 (B); e durante a década de 70, quando já compartilhava sua imponência com construções modernas (C). Fontes: Álbum da cidade de Belém do Pará, 1908; Álbum da cidade de Belém do Pará, 1909; Acervo Dulcília Acatauassú Nunes.

Outros, ainda, permanecem desmontados por várias décadas à espera de restauro e remontagem, como o antigo chalé de ferro da IOEPA (Figura 2).

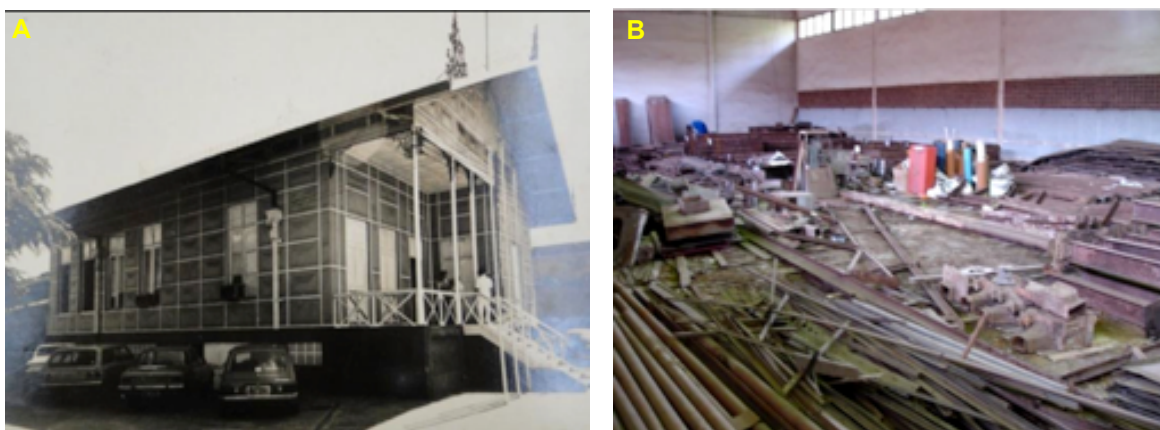


Figura 2 - Antigo chalé de ferro da IOEPA quando montado em 1978 (A) (Fonte: PONTES et al, 1973), e desmontado em 2007 (B).

Mesmo com desfalques, atualmente, a capital paraense ainda é a cidade com o maior número de representantes do patrimônio arquitetônico em metais provenientes dos séculos XIX e XX remanescente do país (Silva, 1987; Kuhl, 1998). Os edifícios da arquitetura do ferro, ainda que em alguns casos esquecidos, são testemunhos relevantes do desenvolvimento da história, da técnica, e de métodos construtivos. Essas edificações trazem, em sua concepção, inovações formais, espaciais e tecnológicas que devem ser preservadas.

Atualmente, os estudos acerca desses edifícios são mais voltados para as características históricas gerais e visuais em publicações regionais, sem destaque para a compreensão dos materiais de construção utilizados. Esta lacuna nas pesquisas impossibilita diversos desdobramentos científicos na conservação e restauro de metais históricos, tais como: 1) o entendimento mais aprofundado de tipos de ligas metálicas utilizadas por diferentes fábricas; 2) a identificação de formas de intemperismo em metais históricos na Amazônia; 3) as diferentes formas de fabricação.

De acordo com Dillmann et al (2013), objetos históricos e estruturas arquitetônicas antigas são relacionados com eventos passados e sua sobrevivência é de grande importância, pois constituem uma parcela importante da história e do patrimônio. Sem o estudo voltado para ciência dos materiais e a utilização de análises laboratoriais, as práticas de conservação e restauro tornam-se empíricas.

Um dos primeiros passos para a conservação e restauração é o estudo detalhado dos materiais antigos. As diversas propriedades que as ligas metálicas apresentam são essenciais para o planejamento de qualquer ação restaurativa (Collete et al, 2014).

Outro problema para a preservação dos metais históricos são as condições ambientais amazônicas, que aumentam exponencialmente o intemperismo em estruturas e ornamentos em

ferro. Segundo Starley (1999), em publicações internacionais, a arquitetura metálica não sofre grandes problemas de intemperismo quando comparado à artefatos arqueológicos, já que não estão enterradas e podem ser conservadas a longo prazo. Entretanto, os parâmetros de umidade e temperatura na Amazônia são diferentes das áreas geralmente estudadas em publicações internacionais voltadas para o patrimônio histórico metálico.

Em relação às questões históricas e de procedência, existe a dificuldade de informações acerca de estruturas e ornamentos metálicos importados para Belém. Segundo Starley (1999), os edifícios metálicos possuem a vantagem de possuírem datação, tanto no âmbito documental das fábricas por meio de registros, como na marcação nas peças da construção. Entretanto, não há a datação em muitos ornamentos da cidade, em especial por muitos terem sido importados por iniciativa privada, mas também pela confecção de cópias de muitos modelos europeus por manufatura local durante os séculos XIX e XX (Derenji, 1993). Estes fatores dificultam o entendimento da evolução das técnicas de produção de metais importados para a Amazônia.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é de aprofundar os conhecimentos acerca dos materiais da arquitetura de ferro dos séculos XIX e XX em Belém, em especial a caracterização das ligas metálicas em seus diferentes tipos de produção, bem como as alterações intempéricas recorrentes em edifícios históricos em ferro na Amazônia. Neste trabalho serão utilizadas técnicas instrumentais típicas das geociências e ciência dos materiais, aliadas à informações da arquitetura histórica, abrangendo o campo interdisciplinar da conservação e restauro.

O entendimento acerca dos metais antigos e suas alterações é fundamental para ações de preservação e de futuros processos restaurativos, tais como nas ações de sanar o avanço de patologias, escolha da melhor camada de proteção a ser aplicada, bem como na confecção de réplicas e próteses.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho consiste em compreender os metais históricos na arquitetura de ferro dos séculos XIX e XX em Belém, bem como seus processos de produção, e identificar formas intempéricas, para subsidiar processos restaurativos.

Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: a) caracterização física, mineralógica e química das ligas metálicas e suas patologias; b) identificação dos diferentes tipos de ligas para estabelecimento dos diversos tipos de produção, dentre fundições, forjas e

chapas prensadas; c) determinar a evolução da produção da arquitetura de ferro em Belém (Figura 3).

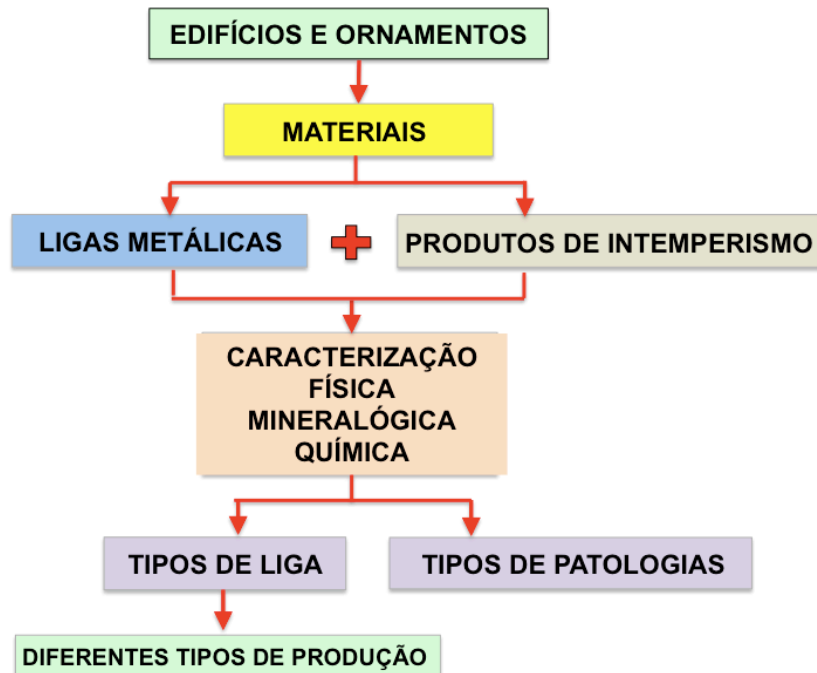


Figura 3 - Organograma dos objetivos gerais e específicos da tese

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese seguirá a estrutura do trabalho científico tradicional, nos itens: 1) Introdução; 2) Revisão Bibliográfica; 3) Materiais e métodos; 4) Resultados e discussões; 5) Conclusão.

No entanto, o capítulo de Resultados e discussões será dividido em três artigos, atendendo as regras do PPGG/UFPA, referentes à três objetos de estudo da tese de doutorado. Os artigos foram escritos em inglês, e submetidos à periódicos internacionais e interdisciplinares de *Qualis* CAPES A1 e A2.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO: A INSERÇÃO DO FERRO NA ARQUITETURA

As técnicas da utilização do ferro já existiam desde a China Antiga (SEGURADO, 1992), mas só foram desenvolvidas a partir da segunda metade do século XVIII com o advento da Revolução Industrial, que permitiu aumentar a quantidade e a qualidade da produção de materiais metálicos, além de diminuir o seu custo. Antes da industrialização intensa, a utilização do ferro na arquitetura tinha como objetivo principal equilibrar as forças horizontais no edifício, reforçando e consolidando as estruturas. Entretanto, o desenvolvimento arquitetônico não poderia ter sido viabilizado sem o domínio da produção e do uso dos metais, que influenciava diretamente na concepção das construções (Lemoine, 1986; Khul, 1998).

O ferro foi primeiramente empregado como principal material na construção de pontes e, a partir de 1830, na construção de ferrovias. Logo seu uso foi intensificado em outras tipologias arquitetônicas, como garagens, estações, e em equipamentos ferroviários. A aplicação do ferro nas construções foi paralela às mudanças na sua fabricação e dos avanços nos estudos sobre sua resistência e comportamento estático, fornecendo subsídios para dar tratamento mais adequado às suas características, e não mais o emprego em formas derivadas dos materiais de construção tradicionais (Lemoine, 1986; Khul, 1998). Assim, a utilização do ferro tornou-se cada vez mais presente na construção civil, com maior destaque entre os anos de 1840 e 1860, especialmente em relação à produção britânica.

O uso do ferro na arquitetura começou gradualmente, sendo aplicado em variadas partes dos edifícios, evoluindo posteriormente para construções inteiramente compostas deste material (Lemoine, 1986). Apesar da baixa resistência à tração, o ferro tinha grande resistência à compressão e facilidade de moldagem, sendo possível criar também peças ornamentais rebuscadas para as fachadas dos edifícios devido às possibilidades de moldagem.

O primeiro uso do ferro na arquitetura foram colunas de ferro fundido, em 1870 (Gideon, 1968), e com a evolução da produção industrial, este material começou a ser utilizado de várias outras formas, podendo ser forjado, laminado ou prensado em chapas. Progressivamente, o ferro começou a ser tratado como um material tradicional. Suas características técnicas e estéticas passaram a ser mais exploradas, atingindo expressão formal própria.

O uso do ferro não se limitou apenas à construção civil, fazendo também parte de diversos equipamentos urbanos. Durante o desenvolvimento das cidades do século XIX, e o grande número de projetos de intervenção urbana, o ferro foi uma boa opção de material a ser empregado, por possuir boa durabilidade e ser de fácil manutenção. Foram construídos coretos, fontes, quiosques, luminárias, bancos, entre outros, que ainda permanecem em algumas cidades até os dias de hoje.

A aplicação do ferro na arquitetura evoluiu para a sua utilização em todas as partes do edifício, desde a fundação até a cobertura, permitindo a concepção de construções inteiramente em ferro, que posteriormente foram caracterizadas como exemplares da “arquitetura de ferro” (Silva, 1987), que foi considerada como uma revolução no campo da construção civil.

A arquitetura do ferro é composta de elementos a serem unidos e, se comparada a outras modalidades construtivas, é de simples montagem e de fácil transporte. Empregava elementos construtivos padronizados, que tornavam o preço das construções relativamente baixo, comparando com aquelas feitas de maneira tradicional (Kuhl, 1998). Com o avanço dos processos produtivos e a variedade de peças, era possível criar novos modelos e várias combinações, proporcionando ao cliente compor uma edificação singular ainda que construída com componentes arquitetônicos padronizados.

As companhias britânicas, que eram grandes produtoras de edifícios metálicos, referiam-se a essas construções como *portable buildings* ou *exported buildings*. Dentre os produtores desta modalidade arquitetônica, destacaram-se a Grã Bretanha, e posteriormente, a França, a Alemanha e a Bélgica (Kuhl, 1998). Já as fábricas europeias de maior destaque foram as do Reino Unido: *Andrew Handyside & Co*, de Londres; *Charles D. Young & Co*, a *Coalbrook Dale & Co*, a *Edward T. Bellhouse* e a *Eagle Foundry*, de Manchester; *Francis Morton & Co*, de Liverpool; *Frederick Braby & Co*, *John Walker*, *Milton Iron Work*, *McDonnell Stevens & Co* e *Samuel Henning*, de Glasgow (Silva, 1987).

A arquitetura de ferro teve notoriedade durante as exposições internacionais no século XIX, que tinham como objetivo principal apresentar produtos industriais, colocando em evidência os modelos das novas invenções de todas as esferas da atividade humana (Gideon, 1968).

Os edifícios mais famosos do período das grandes exposições foram o Palácio de Cristal (1851), e a Galeria das Máquinas (1889). Entretanto, o apogeu do uso ferro foi durante

a exposição internacional de 1889: a apresentação da Torre *Eiffel*, de Gustave Eiffel, para o centenário da Revolução Francesa.

Dessa forma, a arquitetura de ferro ganhou grande notoriedade no contexto mundial. Logo, os países produtores de ferro puderam expandir o seu mercado e, conseqüentemente, difundir essa arquitetura para ex-colônias, especialmente após o sucesso das exposições internacionais.

Os países europeus produtores de ferro investiram em países em ascensão, como por exemplo o Brasil, onde foram implantadas residências, estradas de ferro, mobiliários urbanos, entre outros componentes da arquitetura de ferro, para suprir a demanda das crescentes cidades, e a ânsia de nova tecnologia da classe dominante.

No século XVIII, a siderurgia no Brasil não era expressiva e não tinha destaque na construção civil, se comparada ao uso de outros materiais nas construções coloniais vigentes na época. Após a abertura dos portos às nações amigas, em 1808, as relações comerciais brasileiras intensificaram com o fim do Pacto Colonial, e os produtos de diversos países europeus começaram a ser exportados para o Brasil. Os produtos provenientes da Europa eram majoritariamente industrializados, já que o Brasil não possuía grande influência industrial, nem manufatura necessária para a demanda de novas construções. Modernização era a palavra-chave para a entrada destes produtos no país.

Um dos países exportadores mais beneficiados no início desse processo foi a Inglaterra, em que vários edifícios da fábrica inglesa *Walter McFarlane's* foram importados pelo o Brasil. Os ingleses foram os maiores responsáveis pela implantação das redes ferroviárias, como em São Paulo, com a construção da *Brazil Railway*, além de diversos edifícios para atender à infraestrutura necessária a essas redes.

A utilização do ferro tornou-se uma técnica bastante procurada na arquitetura, por suprir a necessidade de se construir rapidamente, possuindo leveza e transparência, mobilidade e um sistema bem engrenado (Silva, 1987).

Gradualmente, os portos brasileiros se abriram para outras nações europeias com metalurgia desenvolvida, como a Alemanha, a França e a Bélgica, esta representada especialmente pela fábrica *Forges d'Aiseau*, detentora do sistema Danly. Além da França, a Bélgica era a maior concorrente da Inglaterra, em relação à produção do ferro, e precisava do mercado internacional para se expandir.

Os edifícios metálicos foram importados para cidades brasileiras em que a economia era crescente, como as de produção de café, açúcar, algodão e borracha. As capitais onde

foram implantadas construções de ferro foram: Porto Alegre, São Paulo, Rio de Janeiro, Recife, Fortaleza, Belém e Manaus. Outros destaques são as ferrovias estabelecidas em Minas Gerais e no Paraná.

A tipologia de edifícios metálicos mais recorrentes no Brasil foram os mercados, majoritariamente provenientes da Bélgica e da Inglaterra. Os mais famosos exemplos são os mercados de ferro de São José, em Recife, e o Ver-o-Peso, em Belém, que até hoje são utilizados de acordo com sua função original. Os exemplares da arquitetura de ferro importados pelas cidades brasileiras em crescimento, despertaram grande interesse da burguesia local, pois eram considerados protagonistas do lançamento do período do modernismo no país (Silva, 1987).

2.1.1 A influência europeia na arquitetura de ferro em Belém: dos ornamentos às estruturas complexas

A cidade de Belém teve expressivo crescimento econômico durante o Ciclo da Borracha, iniciado na metade do século XIX até o início do século XX. A capital paraense cresceu e mudou nos aspectos físicos, e até mesmo nos costumes dos seus habitantes (Derenji, 1993). Com o crescimento urbano acelerado, era necessária a implantação de novas edificações, criando cenário propício à instalação de edifícios de fácil construção e montagem. Logo, os edifícios em ferro eram a solução adequada para suprir as demandas do crescimento acelerado da cidade (Silva, 1987; Kuhl, 1998).

Os investimentos estrangeiros, provenientes da Alemanha, Inglaterra, França e Bélgica eram abundantes na capital paraense. Belém foi embelezada com produtos e edifícios importados, e por ser o principal ponto de escoamento da Amazônia, tornou-se a cidade que possui maior acervo remanescente de edifícios metálicos no Brasil.

Atualmente, Belém e suas redondezas possuem diversas construções metálicas, dentre dois mercados públicos, dois refeitórios, estação ferroviária, três coretos, um reservatório de água, um farol, três residências, um pavilhão; grande quantidade de componentes arquitetônicos em edifícios, como colunas, ornamentos e escadarias; e equipamentos urbanos, como postes, quiosques, relógios e fontes (Kuhl, 1998).

Inicialmente o ferro foi difundido na arquitetura belenense por meio da utilização de ornamentos utilizados em portas, janelas, sacadas, guarda-corpos, e em diversas partes das construções, importados de países como Portugal, Inglaterra e França. Os produtos europeus

eram vendidos por meio de catálogos, que eram anunciados em revistas européias especializadas que chegavam ao Brasil.

Na capital paraense, muitos edifícios construídos na metade do século XIX e início do século XX possuem ornamentos em ferro forjado ou fundido, que foram amplamente importados antes do início da produção local pelo Instituto Lauro Sodré (Derenji, 1993). Os detalhes decorativos europeus eram comprados pelo governo para a utilização em edifícios públicos, mas também adquiridos pela população que almejava ornamentos de qualidade e beleza para as suas casas.

Uma das fábricas que exportou de forma intensa para a capital paraense foi a companhia francesa *Guillot-Pelletier Fils & Cie*. Os anúncios dessa fábrica eram constantes nas revistas especializadas do século XIX (Figura 4A), e diversos edifícios da cidade apresentam características muito semelhantes ao desenho dos anúncios. Essa companhia inclusive importou pequenos edifícios para Belém, como o coreto de ferro da praça Batista Campos (Figura 4B).



Figura 4 - A Anúncio de ornamentos metálicos produzidos pela *Guillot-Pelletier Fils et Cie*, em revista francesa (A); Coreto da praça Batista Campos (B). Fontes: Maumené, 1925; Acervo Dulcília Acatauassú Nunes.

A semelhança de ornamentos antigos de vários edifícios paraenses com os desenhos de grades ornamentais anunciadas nas revistas estrangeiras, também representa a influência europeia na produção local. Vários modelos foram baseados naqueles vistos nas publicações, visando o requinte e a modernidade dos edifícios europeus, como, por exemplo, as grades do Palacete Pinho, do Palacete Faciola e da Casa do Governador (Figura 5).



Figura 5 - Guarda-corpos das varandas do Palacete Faciola (A), Casa do Governador (B) e Palacete Pinho (C).

Além dos elementos arquitetônicos de fachada em vários edifícios, especialmente públicos, foram inseridos demais elementos arquitetônicos como pilares, escadarias, e forros metálicos. Um exemplo de edifício bastante conhecido por elementos interiores em ferro, de procedência francesa, é o Paris N'América. Outro, é o Mercado de Carne, com estruturas internas provenientes da *Walter McFarlane's*.

Entretanto, além da construção civil, os ornamentos também fizeram parte da arquitetura mortuária, como nas sepulturas do Cemitério Nossa Senhora da Soledade, construído em 1850. É um dos únicos cemitérios monumentais do país e é considerado um museu a céu aberto (Derenji, 1993) por conter importantes manifestações da arquitetura, escultura e da simbologia funerária do século XIX.

Além do vasto acervo artístico em rochas ornamentais, o cemitério da Soledade abrange grande número de portões, grades e gradis confeccionados em metais, que fazem parte das sepulturas.

Muitos desses elementos ornamentais provavelmente foram importados de outros países, devido ao tipo de confecção, incomum na produção local. Entretanto, durante uma intervenção do governo do intendente do Estado, Antônio Lemos, em 1905, foram inseridas gradis, fabricados pelo Instituto Lauro Sodré, com o objetivo de embelezar as sepulturas sem ornamentações (Lemos, 1902).

Além do grande acervo de ornamentos metálicos em sepulturas, o cemitério possui um portão e grades externas em ferro, importados da fábrica inglesa *Singlehurts Muller & Cia*, e montados em 1853 (Lemos, 1902).

Além do uso de detalhes arquitetônicos metálicos em algumas partes das edificações, existiam os edifícios construídos inteiramente em ferro e desmontáveis, que foram bastante difundidos na Europa Oriental, América do Sul e África, por meio das importações feitas da França, Bélgica e Inglaterra.

Inicialmente, as tipologias arquitetônicas que chegaram ao Pará eram de edifícios utilitários, como os reservatórios de água, que configuraram construções de grande notoriedade, montados nos principais pontos de Belém, no final do século XIX e início do século XX.

O primeiro reservatório a chegar na capital paraense foi o reservatório de São Brás, montado em 1884, de procedência inglesa (Figura 6). Logo após, em 1899, o Reservatório Paes de Carvalho foi importado da França, encomendado da fábrica francesa *Boudet, Donon & C^a* (Montenegro, 1908), mas que também continha ornamentos ingleses:

A construção acha-se toda artisticamente adornada com placas de aço recortado e com molduras de ferro fundido. Uma grade artística e portão monumental cingem a base do edifício para isola-lo de todas as construções circumvisinhas. Ella é da fabrica inglesa Walter Macfarlane & C^a (MONTENEGRO, 1908).

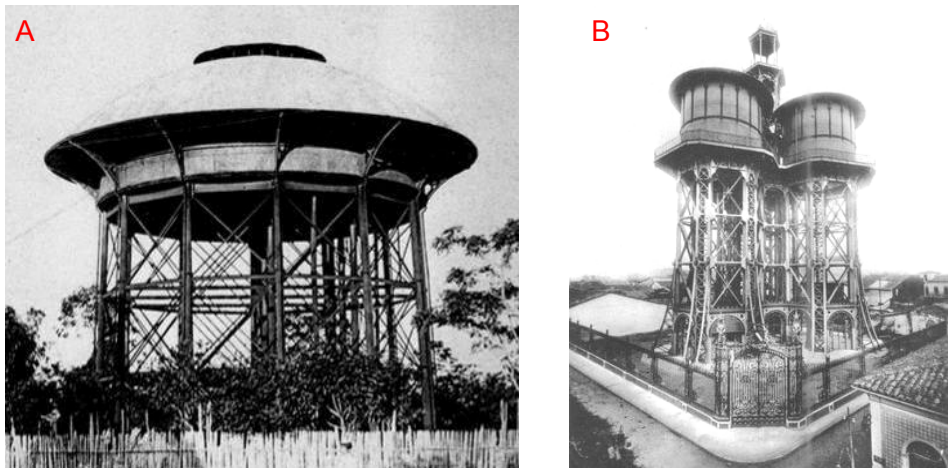


Figura 6 - Reservatório de São Brás (A) e Reservatório Paes de Carvalho (B). Fontes: Álbum da cidade de Belém do Pará de 1898; Acervo Dulcília Acatauassu Nunes.

Devido à propagação da influência europeia nas construções paraenses, as importações também voltaram-se para a aquisição de outras tipologias arquitetônicas, como os mercados, muito populares na Europa. O exemplar adquirido pelo Governo do Pará em 1882 foi o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, inteiramente em ferro.

A construção do mercado contou com vários projetos de diversos países até a decisão do desenho final, já que se configuraria como um edifício de grande importância na cidade, cabendo-lhe grandes investimentos e expectativas:

“A lei provincial n. 1,031 de 8 de maio de 1880, autorizou a construção de um mercado de ferro n’esta capital. Foram apresentadas seis propostas: três em inglês, uma em alemão e duas em português.” (Carneiro, 1882)

O Mercado de Ferro do Ver-o-Peso (Figura 7) trouxe ar de modernidade para a capital paraense, assim como auxiliou a disseminar a qualidade dos produtos europeus sobre os nacionais, destacando a falta de prática na confecção de peças metálicas em Belém na época. O edifício foi importado de uma fábrica inglesa, e nenhuma das peças que compunham a construção foi confeccionada no Pará:

“Tenho sido autorizado a apresentar o plano e orçamento para um mercado público, que deve ser situado no local em frente ao Ver-o-pezo, e devendo esta obra ser feita de ferro, como se usa nas obras modernas. D’esta ordem, pedi para Inglaterra (...) Mande vir do estrangeiro o plano, porque, não havendo aqui oficinas em que taes obras e desempenhassem os engenheiros da província, embora zelosos e habilitados para quaesquer trabalhos, se veriam baldos dos elementos, para fazer um orçamento; além de que teriam de formular moldes, que, sendo feitos expressamente, importariam mais caros do que os que as casas fornecedoras d’estas obras na Europa nos poderiam mandar, que se acham feitos e dispostos a serem combinados entre si.” (Malcher, 1881).

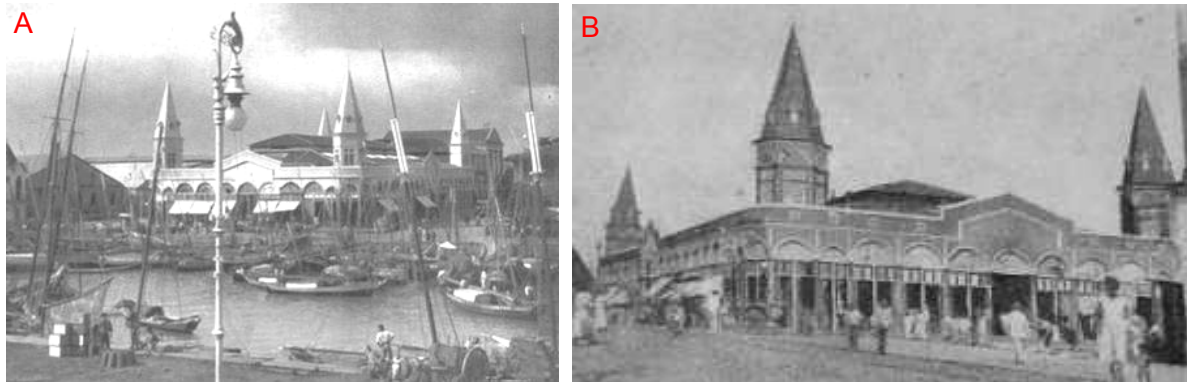


Figura 7 - Área do Ver-o-Peso com a construção do Mercado de Ferro (A); Mercado de Ferro do Ver-o-Peso (B). Fontes: Álbum de Belém, 1902; PEREGRINO, 1942

Além dos edifícios públicos totalmente metálicos existiram os privados, que em Belém se caracterizam pelos chalés, famosos por serem construídos inteiramente em ferro e desmontáveis. Estes foram importados para realizar a função de habitação campestre ou de férias (Silva, 1987), e possuem partido arquitetônico bastante disseminado na Europa do século XIX. Inclusive, diversos anúncios de residências desmontáveis de ferro foram encontrados nas publicações da época.

Os chalés de ferro em Belém são residências unifamiliares de proveniência belga, da fábrica *Forges d’Aiseau*, e construídos segundo o sistema Danly, criado por Joseph Danly. São os únicos exemplares residenciais no Brasil (Silva, 1987) construídos inteiramente em ferro, e recebem a denominação correspondente à sua localização. Eles são: o chalé da Universidade Federal do Pará (UFPA) (Figura 8A), do Bosque Rodrigues Alves (Figura 8B), e o antigo chalé da Imprensa Oficial do Estado do Pará (IOEPA) (Figura 9).



Figura 8 - Chalés de ferro da UFPA (A) e do Bosque Rodrigues Alves (B).



Figura 9 - Antigo chalé de ferro da IOEPA, em 1978. Fonte: Pontes et al, 1978

2.1.3 Transformações e permanências da arquitetura de ferro belenense: desmontagem e esquecimento

Grande parte dos edifícios metálicos que foram importadas para Belém, entre o final do século XIX e início do XX, não existem mais. Devido às transformações pelas quais a cidade passou e os defeitos que as construções apresentavam, muitos deles foram desmontados, e o paradeiro das peças que os compunham não é conhecido, como por exemplo, o Reservatório Paes de Carvalho.

O Reservatório Paes de Carvalho, durante o seu funcionamento, passou por diversos reparos para garantir a sua operacionalidade. Entretanto, depois de anos, de vários defeitos e tentativas frustradas de reparos (Bentes, 1927), o reservatório foi desativado e permaneceu na paisagem da cidade até a década de 70 do século XX, e sendo posteriormente desmontado e excluído do cenário Paraense.

Não se sabe o paradeiro das peças que os compunham. As tentativas de salvaguarda da memória desse edifício são apenas referentes aos relatórios, documentos, fotografias e relatos da época.

Infelizmente, a perda da memória dos edifícios em ferro não cessou. Além dos que já se perderam, existem os que estão em risco de desaparecer, como o antigo chalé de ferro da IOEPA, desmontado em 1987.

A desmontagem dos chalés deu-se especialmente em função da necessidade de espaço para construções modernas. O antigo chalé de ferro da IOEPA não teve a mesma sorte dos demais chalés, que passaram por remontagens na década de 90, e permanece desmontado até os dias atuais.

Inicialmente, as peças do antigo chalé de ferro da IOEPA foram armazenadas no Bosque Rodrigues Alves em condições extremamente inadequadas (Figura 10):

“Quem vê as peças enferrujadas, cobertas por folhas, expostas ao sol e à chuva, entre as árvores do Bosque Rodrigues Alves, não diz que se trata de um dos três remanescentes chalés de ferro belgas que Belém possui como herança da fase áurea da borracha ”(O Liberal, 198-?)



Figura 10 - (A) e (B) Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA depositado no Bosque Rodrigues Alves no fim da década de oitenta do século XX. Fonte: Acervo Ronaldo Nonato Marques de Carvalho

Em 1991, as peças do antigo chalé de ferro da IOEPA foram transportadas para a UFPA, e os três chalés foram tombados em conjunto pela Secretaria de Estado de Cultura do Pará (SECULT). As peças que compunham o edifício foram guardadas no galpão do Laboratório de Hidráulica, e em 1993 foram avaliadas e conferidas pelos arquitetos Geraldo Gomes da Silva, Maria Beatriz Faria e José Morgado, mas nenhum processo restaurativo foi realizado.

O armazenamento dos componentes arquitetônicos do edifício no galpão era inadequado. O espaço não era pavimentado e parte das peças ficou em contato direto com o solo, umidade e sujeira. A cobertura e as paredes do edifício que armazenava as peças, possuíam falhas por onde a água da chuva penetrava, aumentando o processo de corrosão dos elementos metálicos do chalé. Algumas peças foram deixadas no exterior do galpão, sem

proteção, o que intensificou ainda mais os processos intempéricos, e conseqüentemente o risco de não serem mais passíveis de utilização (Figura 11).



Figura 11- Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA armazenadas no galpão de Engenharia Hidráulica (A e B); peças depositadas no exterior do galpão (C).

Por motivo de reforma, em setembro de 2008, as peças do chalé começaram a ser remanejadas para o Setor de Transportes, também na UFPA. Ainda assim, o armazenamento era inadequado, já que boa parte das peças ainda estava em contato com a chuva (Figura 12).



Figura 12 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA armazenadas no setor de transportes da UFPA após o remanejamento.

Diante dessa situação um registro foi realizado entre 2007 e 2008, na tentativa de preservar uma parte da memória da edificação, já que esta se encontrava-se em risco de desaparecimento, em função do seu estado de degradação. O registro abrangeu a documentação de todos os componentes arquitetônicos do edifício, visando estudar as possibilidades de sua remontagem¹.

Infelizmente, parte do patrimônio paraense em ferro, como o antigo chalé de ferro da IOEPA, está se perdendo pelo descaso com os edifícios metálicos históricos, aliado ao crescimento da cidade que, cada vez mais, tenta excluir as construções antigas. Os chalés de ferro, bem como os demais exemplares da arquitetura de ferro, representam uma tipologia arquitetônica diferenciada, e sua memória deve ser preservada.

¹ Registro desenvolvido pela autora em trabalhos anteriores (Palácios, 2011).

2.2 FERRO FUNDIDO

Para esta pesquisa, o tipo de ferro em destaque é o fundido, mais recorrentes nos objetos de estudo.

2.2.1 Características gerais

Os ferros fundidos são ligas à base de ferro com composição química próxima ao eutético ferro-carbono. A definição que separa aços e ferros fundidos é o emprego de aproximadamente 2% de carbono.

Esse tipo de metal apresenta de modo geral resistência à corrosão muito baixa nos diversos meios (água, solo e ar). Assim, são aplicados proteção adicional, em geral revestimentos metálicos, sendo o mais comum o de zinco (Fontinha & Salta, 2007). A textura do ferro fundido é granular quando quebrado, como facilmente se pode observar com uso do microscópio ótico com ataque ácido (Colpaert, 2008).

Os ferros fundidos apresentam à pressão ambiente (1atm) uma única estrutura cristalina, estável até seu ponto de fusão: a ferrita. Entretanto, possui polimorfismo, apresentando duas estruturas cristalinas à pressão ambiente dependendo da temperatura. As estruturas de ocorrência mais comum são as compactas tipo CFC e não-compacta CCC.

As baixas temperaturas (até 912° C) o ferro tem a estrutura CCC. Acima desta temperatura, a estrutura CFC torna-se mais estável. Acima de 1394°C, a estrutura CCC volta a ser estável até o ponto de fusão do ferro (1535°C). Assim, as diferentes fases do ferro são estáveis em diferentes faixas de temperatura e de pressão (Figura 13) (COLPAERT, 2008).

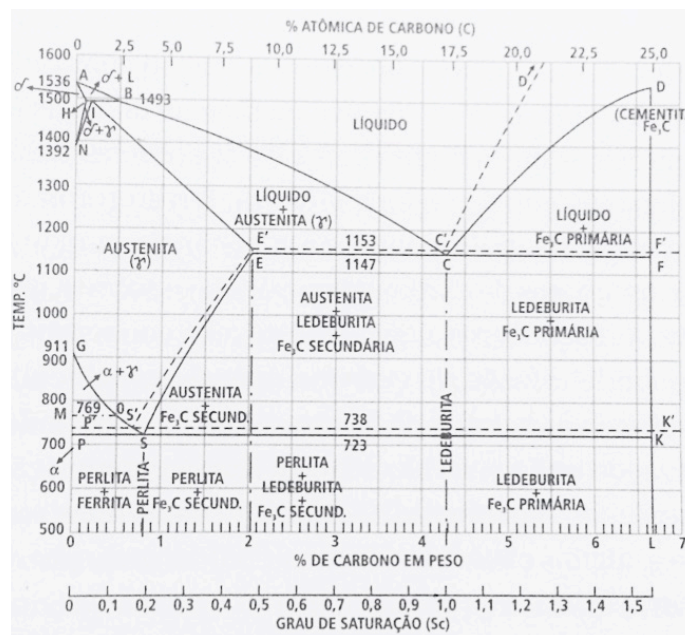


Figura 13: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Fonte: GUESSER, 2009

As principais variedades de ferros fundidos existentes distinguem-se, basicamente, pela forma como se precipita o carbono: na forma de grafita, referente ao ferro fundido cinzento (ver item 2.2.3), ou na forma de cementita, para ferro fundido branco (Colpaert, 2008). A forma de precipitação do carbono vai depender do efeito da velocidade de resfriamento do ferro, sendo que, as mais lentas favorecem o equilíbrio, com a formação de grafita durante a solidificação (Ferry & Xu, 2004; Colpaert, 2008), enquanto que as mais elevadas conduzem à solidificação metaestável, favorecendo a formação de cementita (Colpaert, 2008).

Outra classificação comum dos ferros fundidos diz respeito ao aspecto de sua fratura: quando o carbono está combinado em cementita, a fratura é de aspecto claro, e estas ligas são chamadas de ferro fundido branco. As fraturas das ligas que contem grafita nas estruturas são escuras, acinzentadas. Por analogia, estas ligas são chamadas de ferros fundidos cinzentos.

2.2.2 Produção: matéria-prima e técnicas

O ferro é encontrado em numerosos minerais, destacando-se a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4), a limonita ($\text{FeO}(\text{OH})$), a siderita (FeCO_3), a pirita (FeS_2) e a ilmenita (FeTiO_3). A associação do ferro a diversos outros elementos não desejáveis torna necessário submetê-lo a processos metalúrgicos e siderúrgicos para a sua utilização. Os minérios de ferro muitas vezes são associados a certos minerais, que constituem a sua ganga, como por exemplo, quartzo, calcita, fluorita, dolomita, barita, dentre outros.

Somente por volta do terceiro milênio a.C., o homem desenvolveu técnicas de extração e da fundição do ferro, difundindo o seu uso. Até o século IX a.C. os fornos eram bastantes rudimentares, a ponto de ser necessário quebrá-los para extrair o material produzido em alta temperatura (Montagni, 1999). Neles, o carvão vegetal era utilizado como gerador de calor (Figura 14).

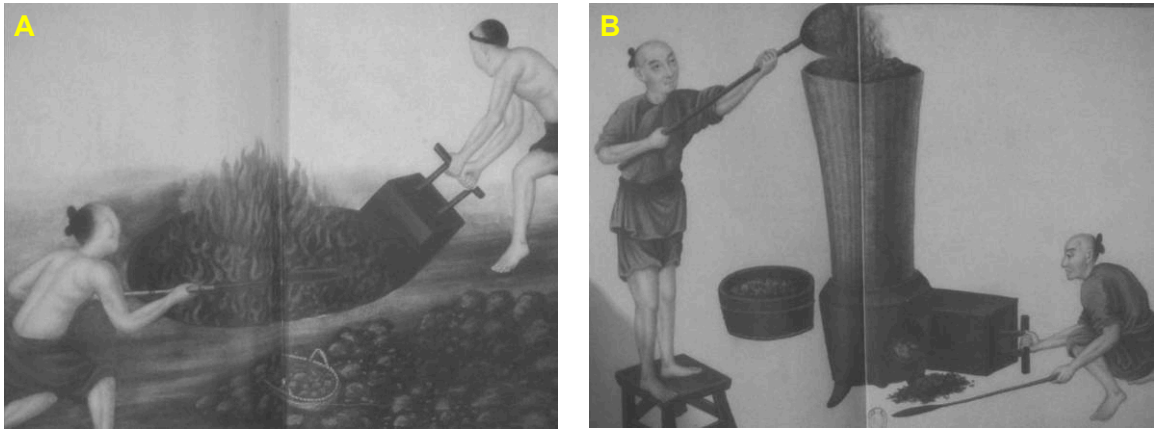


Figura 14 - Utilização de fornos rudimentares na China antiga, com uso de carvão. Fonte: Andrieux, 1991.

No período medieval, surge um novo tipo de forno de fusão de origem nórdica, o forno *Osmund*, provavelmente um dos primeiros passos para a evolução do alto forno. Essa estrutura representa uma tentativa de aumentar a altura do forno e isolar os resíduos do metal fundido.

Após o século XIV foram desenvolvidos fornos capazes de reduzir o óxido de ferro a ferro metálico, e também fundi-lo, permitindo que o produto metálico fosse facilmente retirado do forno na forma líquida e, adicionalmente, fundido nas formas desejadas, em ornamentos bastante detalhados (Colpaert, 2008). Nesse período era usual a utilização de ferros forjados, comuns em ornamentos da arquitetura de ferro histórica, que são resultantes de modificação de ferros fundidos. O forjado provém da martelagem e conformação manual de barras de ferros fundidos, e apresentam micrografias relativas a deformação, ainda com presença de muitas impurezas (Blakelock et al. 2009).

A partir da Revolução industrial foi iniciado um processo de melhoria contínua, com a mudança da forma do forno e a inclusão de equipamentos hidráulicos, assim, aumentando a produção de ferro fundido. Logo após, foi realizada a instalação dos fornos de “afinagem” do ferro, para transformá-lo em aço, como os fornos de pudlagem. Com o passar dos anos, atingiu-se o progresso da indústria siderúrgica, aperfeiçoando a produção para tornar mais barato o produto e ao mesmo tempo melhorar as suas propriedades.

Para melhorar a qualidade do ferro utilizado na construção civil, foram iniciadas as tentativas de separar os componentes da ganga, por meio de processos metalúrgicos, tais como lavagem, trituração, crivação, separação de minerais por meios químicos e elétricos, dentre outros. Esses processos evoluíram até alcançar as técnicas complexas de produção atuais, sem a presença constante de impurezas nas ligas de ferro (Segurado, 1992).

2.2.3 Microestrutura

O advento da microscopia possibilitou a classificação dos ferros fundidos em relação a sua microestrutura. Os ferros que contêm grafita são classificados, primeiramente, pela forma da precipitação do carbono.

A forma, tamanho e distribuição da grafita afetam, de forma decisiva, o comportamento dos ferros fundidos. Propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas e térmicas, dentre outras, são diretamente dependentes das características da grafita. Para os ferros fundidos cinzentos, a grafita é classificada em cinco tipos: A, B, C, D e E (Rivera et al, 2003; Collini, 2007; Colpaert, 2008; Guessser, 2009) (Figura 15).

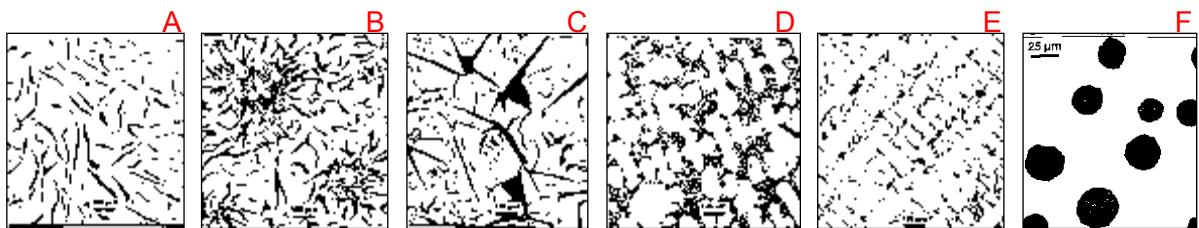


Figura 15 - Ferro fundido cinzento tipo A (A), tipo B (B), tipo C (C), tipo D (D), tipo E (E) e ferro fundido nodular (F). Fonte: COLPAERT, 2008

A grafita tipo A, com distribuição aleatória de lamelas de tamanho uniforme, é em geral associada às melhores propriedades mecânicas e é a mais indicada para aplicações de engenharia (Fan et al, 2014). A grafita do tipo B está associada à baixa nucleação: as lamelas formam-se inicialmente pequenas e aumentam de dimensão, à medida que o crescimento progride.

A grafita do tipo C ocorre quando há nucleação primária de grafita, que pode comprometer a resistência mecânica, por isso, é pouco utilizada em grandes estruturas. As grafitas de morfologia D e E são grafitas finas, provenientes, em geral, do resfriamento rápido em condições de nucleação insuficiente. Embora a grafita fina seja favorável para a resistência mecânica, ela pode gerar uma liga metálica mais quebradiça (Ferry & Xu, 2004; Xu et al, 2004; Colpaert, 2008; Guessser, 2009).

Além do ferro fundido cinzento, há também o ferro fundido dúctil ou nodular, que apresenta grafita em forma circular. O ferro fundido nodular permite combinar propriedades dos ferros fundidos e dos aços. A característica fundamental destas ligas está no ajuste da composição química e na inoculação do metal líquido, de modo a favorecer a formação de grafita em nódulos, ao invés de veios (Colpaert, 2008; Guessser, 2009).

2.2.4 Componentes químicos e mineralógicos constituintes

Além do carbono, que nem sempre é um elemento desejado, é possível encontrar diversos elementos químicos na composição das ligas de ferro. Tais elementos podem ser adicionados para garantir características diferenciadas ao material produzido, especialmente no que se refere à formação da grafita, como por exemplo silício, manganês, enxofre, e fósforo. Tais elementos químicos atuam:

- Carbono: nos produtos industriais, sua concentração está compreendida, geralmente, entre 2,0 e 4,0%, e com teores baixos há tendência para formar-se ferro do tipo branco. Porém, à medida que o teor de carbono cresce, melhoram as condições para a formação de grafita e de se obter, portanto, ferro cinzento ou outra variedade grafítica (Blackmore, 1982).
- Silício: depois do carbono, este é o elemento mais importante nos ferros fundidos (Thomas et al, 2012), pois reduz a estabilidade da cementita, favorecendo assim sua decomposição em ferrita e grafita (Radzikowska, 2004; McCowana et al, 2009). Quando visa-se a obtenção de ferro fundido com grafita, a adição do silício é um fator importante. Com pouco ou nenhum silício, o ferro fundido apresenta, em geral, fratura branca.
- Enxofre: esta substância tem papel primordial na morfologia da grafita formada no ferro fundido. O ajuste dos teores de enxofre e manganês em ferros fundidos cinzentos é fundamental para a garantia das propriedades mecânicas desejadas (Daixin, 2008).
- Manganês: o manganês dificulta a decomposição da cementita, mas seu principal papel nos ferros fundidos comuns é neutralizar a ação do enxofre (Xu et al 2005; Colpaert, 2008), formando com este MnS, da mesma forma que nos aços (Fan et al, 2014).
- Fósforo: em teores elevados, contribui para a fragilidade e atua como estabilizador da cementita (Abassi et al, 2007). O fósforo aumenta a fluidez do metal líquido, permitindo fundir peças mais finas e de contornos mais nítidos. Entretanto, o uso desta substância para este fim deve ser ponderado, devido ao seu efeito sobre as propriedades mecânicas, as quais tornam o ferro frágil.

2.3 PROCESSOS E PRODUTOS DE INTEMPERISMO NA ARQUITETURA DE FERRO

Os edifícios metálicos podem manifestar várias causas de deterioração, resultado de alterações químicas, eletroquímicas, físicas, ou ainda combinações entre elas. Contudo, o motivo principal de sua degradação é a corrosão, que produz alterações nas estruturas do material, modificando seu equilíbrio (Fontinha & Salta, 2007).

O termo “corrosão” pode ser definido como a reação do metal com elementos do seu meio, na qual é convertido a um estado não metálico. Quando isso ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade, haja vista que o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos destas propriedades.

O processo de corrosão nos edifícios metálicos geralmente resulta na diminuição da resistência dos componentes das construções, devido à variações químicas ou modificações estruturais, tais como redução da secção dos elementos, causando irregularidades e perdas na superfície do material (Gentil, 2007).

A corrosão pode ser de modo geral classificada como corrosão seca ou aquosa, esta segunda é mais recorrente, em especial em climas úmidos, como o da Amazônia. Em praticamente todos os casos de corrosão aquosa, a reação é essencialmente de natureza eletroquímica.

São muitos os fatores que determinam a intensidade do processo de corrosão dos componentes metálicos. A velocidade de corrosão de um metal não pode ser especificada sem mencionar as condições precisas do meio em que este está inserido. Os meios considerados mais relevantes na construção civil são a atmosfera, a água e os solos (Fontinha & Salta, 2007).

2.3.1 Meios corrosivos: atmosfera, água, e solos

Na corrosão causada por ações atmosféricas, o fator de maior destaque nos processos intempéricos é o vapor d’água, que muda de acordo com as variações climáticas, estação do ano e local. Estes fatores influenciam diretamente na formação dos eletrólitos das reações eletroquímicas.

A magnitude da corrosão do metal na atmosfera depende essencialmente, do tempo de permanência da película de água na sua superfície, e esta depende da alta umidade ou ocorrência de precipitações (Figura 16).

Tais situações são aplicadas também em atmosferas interiores. Nelas, o metal poderá entrar em contato com água devido a fenômenos como a condensação e a infiltração. As atmosferas interiores podem também, apresentar-se contaminadas por agentes corrosivos, dependendo da atividade realizada no edifício.



Figura 16 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA expostas à constante precipitações (A), e expostas à ambiente de elevada umidade (B)

Alguns componentes metálicos podem estar enterrados no solo, como por exemplo, tubagens e estacas (Figura 17). Devido à grande variedade de solos existentes e à heterogeneidade, o perfil de corrosividade também é muito variado, em função da capacidade de retenção de água, presença de substâncias dissolvidas na água, variações nas concentrações dos constituintes solúveis, dentre outros fatores (Ramanathan, 2007). De modo geral, os solos argilosos e úmidos são os mais corrosivos devido à presença significativa de matéria orgânica e permeabilidade à água (Fontinha & Salta, 2007).



Figura 17 - Peças do antigo chalé de ferro da IOEPA em contato direto com o solo (A, B e C).

2.3.2 Anomalias em edifícios e ornamentos metálicos

As anomalias resultantes da ocorrência de corrosão dividem-se em dois tipos: anomalias superficiais, quando a perda de metal é muito superficial, tendo como consequência apenas alterações do aspecto da superfície metálica; e anomalias profundas, em que a perda de metal sofrida pelo componente é mais significativa e pode ter consequências graves no nível da sua funcionalidade, segurança ou para a qualidade do meio envolvente (Fontinha & Salta, 2007).

a) Anomalias superficiais:

Nestes tipos de anomalias os danos de corrosão ocorridos tem por principal consequência alterações de caráter estético. Os principais sintomas apresentados pelos componentes metálicos, com este tipo de anomalias são:

- Perda de brilho/Esbranquiçamento (Figura 18A);
- Alteração de cor (Figura 18B);
- Empolamento e destacamento de revestimentos (tinta) (Figura 18C).

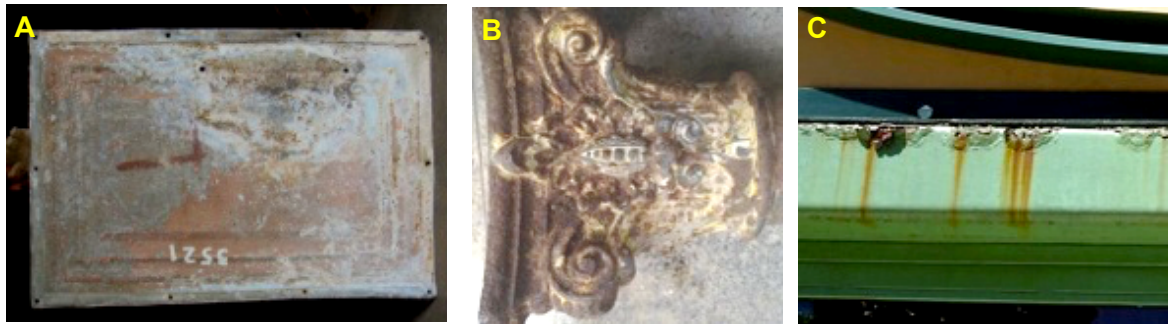


Figura 18 - Chapa do antigo chalé de ferro da IOEPA, com esbranquiçamento (A); coluna com perda de brilho e alteração de coloração (B); estrutura com empolamento e destacamento da camada de revestimento (C).

b) Anomalias profundas:

Nestes tipos de anomalias, os danos de corrosão ocorridos afetam a integridade e funcionalidade do componente metálico. Quando ocorrem estes tipos de anomalias, é normalmente necessário proceder a reparação do componente ou a sua substituição por outro, de material mais resistente à corrosão. Os principais sintomas apresentados pelos componentes metálicos, com este tipo de anomalias são:

- Perfuração;
- Diminuição de espessura (Figura 19A);
- Perda de elementos ou de partes do componente metálico (Figura 19B);
- Fissuras/ Fraturas (Figura 19C):



Figura 19 - Peças de vedação do antigo chalé de ferro da IOEPA com diminuição de espessura (A); perda de partes (B); e fratura (C).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESCOLHA DO ELENCO: CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO

Devido à grande quantidade de edifícios e ornamentos metálicos em Belém, e a impossibilidade de estudar, todo o universo da arquitetura de ferro da cidade, foi necessária a seleção dos objetos de estudo mais significativos para a tese. Foram primeiramente escolhidos dois grupos para seleção: edifícios inteiramente construídos em ferro e ornamentos.

Para a seleção dos edifícios e ornamentos estudados neste trabalho, quatro critérios iniciais foram utilizados: 1) diferentes procedências; 2) diversidade de estruturas arquitetônicas; 3) variedade de tipos de fundição; 4) tipos de patologias (Figura 20).

O critério de procedência diz respeito aos edifícios ou ornamentos de fábricas conhecidas. Os primeiros foram identificados por meio de marcações ou inscrições das próprias fábricas nas construções, ou por meio de pesquisa histórica em arquivos dos séculos XIX e XX e catálogos internacionais.

A partir da pesquisa acerca das procedências, procurou-se selecionar edifícios com a maior diversidade possível de tipos de partes arquitetônicas, tais como estruturas, ornamentos, vedações, dentre outras; variações de fundições, dentre ferros forjados e fundidos; e estado de conservação.

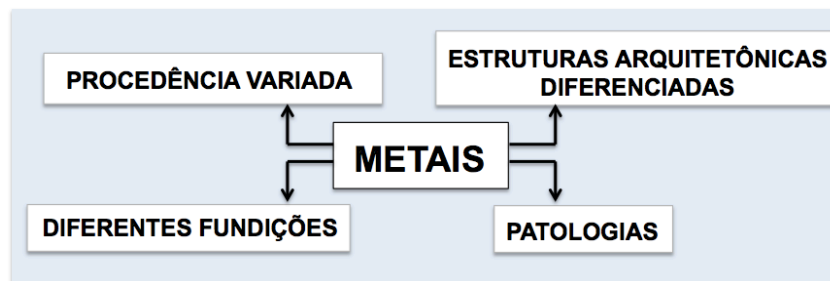


Figura 20 - Esquema dos critérios de seleção do elenco da tese.

É importante lembrar que todos esses edifícios são tombados por alguma instância, estadual ou federal, dificultando a retirada de amostras. Dessa forma, a possibilidade de acesso para amostragem foi também um critério primário adotado na decisão dos objetos de estudo.

A partir dos critérios de seleção descritos e segundo as duas tipologias arquitetônicas adotadas para a pesquisa, edifícios inteiramente metálicos e ornamentos, foram selecionados: 1) para o primeiro grupo, o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso e o chalé de ferro desmontado,

antes pertencente à IOEPA; 2) para o segundo grupo, foi selecionado um sítio histórico: o Cemitério Nossa Senhora da Soledade, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1- Identificação dos objetos de estudo, com a especificações do tipo de estrutura arquitetônica e procedência.

OBJETOS DE ESTUDO DA TESE			
NOME	ESTRUTURAS ARQUITETÔNICAS	PROCEDÊNCIA	GRUPO
Mercado de Ferro do Ver-o-Peso	- Estruturas - Vedações/ telhas - Ornamentos	Inglaterra	EDIFÍCIOS
Chalé de ferro desmontado	- Estruturas - Vedações/ telhas - Ornamentos	Bélgica	
Cemitério Nossa Senhora da Soledade	- Ornamentos em metal fundido - Ornamentos em metal forjado	Variada	ORNAMENTOS

O Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, de origem inglesa, foi escolhido por representar as fábricas da Inglaterra, conhecidas por serem as mais famosas no século XIX e XX.

O chalé de ferro desmontado é procedente da fábrica belga *Forges D'Aiseau*. Este país não teve produção expressiva no que concerne a arquitetura de ferro, entretanto, Belém possui exemplares únicos, pouco relatados na história. Em função da procedência e estado de conservação, atualmente desmontado, foi escolhido para a pesquisa.

Estes dois edifícios representam exemplares importantes na arquitetura de ferro histórica de alta complexidade. Os edifícios procedentes de outros países Europeus, tais como os coretos, foram descartados por representarem edículas ou equipamentos urbanos.

Em relação aos ornamentos metálicos do Cemitério da Soledade, estes foram escolhidos por serem de procedências diversas. Os ornamentos, além de fazerem parte da arquitetura mortuária, estão presentes nos grandes edifícios, como o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso e os chalé de ferro desmontado.

3.2 AMOSTRAGEM

3.2.1 Mercado de Ferro do Ver-o-Peso

Para o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, a retirada de amostras concentrou-se em uma das torres do edifício, fachada principal e lateral esquerda. Optou-se por essas áreas por serem de fácil acesso e determinadas pelos órgãos competentes (Figura 21). Foram coletadas 14 amostras de ligas metálicas, dentre estruturas, telhas/ vedações e ornamentos, descritos na Tabela 2, e exemplificadas nas Figuras 22 a 24.

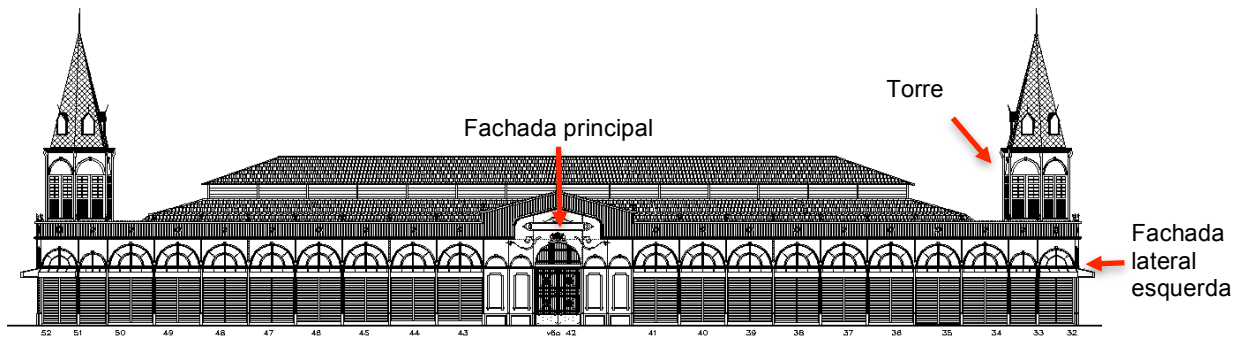


Figura 21 - Indicação das áreas utilizadas para amostragem no Mercado de Ferro do Ver-o-Peso.

Tabela 2 - Tabela descritiva das amostras do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso.

		NOME	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE COLETA
LIGAS METÁLICAS	ESTRUTURAS	VP.EP1	Porção interna do pilar da torre
		VP.EP2	Porção interna do pilar da torre
		VP.EP3	Porção externa do pilar da torre
		VP.EP4	Porção externa do pilar da torre
		VP.EP5	Porção externa do quinto pilar no pavimento térreo
		VP.EP6	Porção externa do sexto pilar no pavimento térreo
		VP.EJ1	Estrutura da esquadria adjacente à torre
	TELHAS	VP.OT1	Telha conjunta aos ornamentos do frontão
		VP.T1	Telha que compõe o frontão
		VP.T2	Telha que compõe a cobertura das janelas
	ORNAMENTOS	VP.OG1	Ornamento do frontão
		VP.C1	Calha pluvial
		VP.OC1	Arco de apoio do tubo de escoamento no pavimento térreo
		VP.P1	Portão de acesso principal

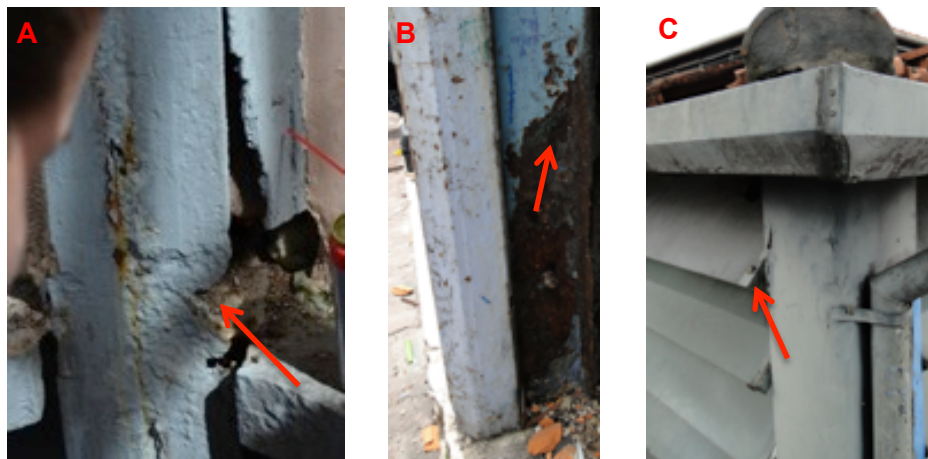


Figura 22 - Locais de retirada das amostras VP.EP1 (a), VP.EP4 (B), e VP.EJ1 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de estruturas.

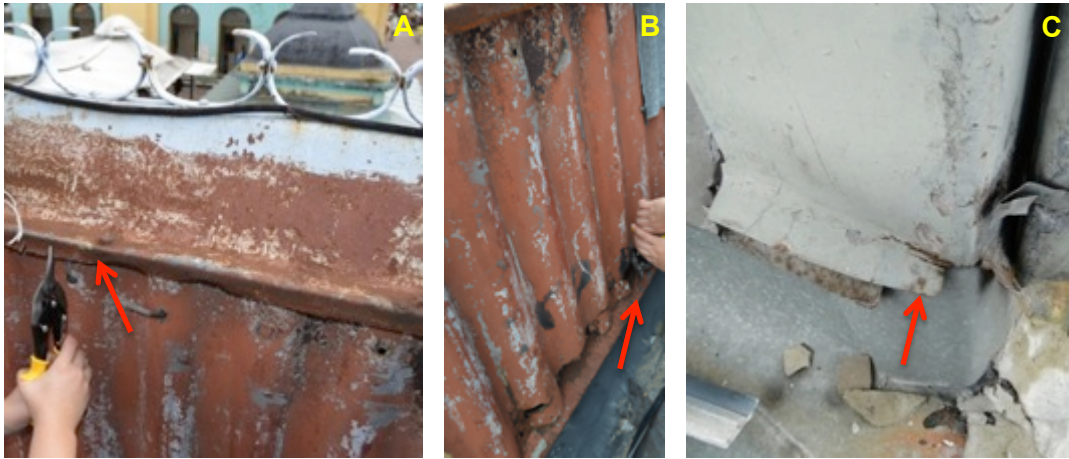


Figura 23 - Locais de retirada das amostras VP.OT1 (a), VP.T1 (B), e VP.T2 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de telhas.



Figura 24 - Locais de retirada das amostras VP.OG1 (A), VP.C1 (B), e VP.P1 (C), pertencentes à amostragem de ligas metálicas do grupo de ornamentos.

3.2.2 Chalé desmontado

As amostras de ferro foram retiradas de diversas peças, sempre com o objetivo de abranger a maior variedade de tipos possíveis, dentre pilares, tesouras, vedações, grades ornamentais e calhas (Tabela 3). Vale ressaltar que as amostras foram retiradas de pequenas áreas, e da maioria de peças que futuramente não poderão ser reutilizadas, ou que a área de amostragem não interfira na sua função e estética e/ou funcional.

Tabela 3: Tabela descritiva das amostras do chalé desmontado.

	NOME DA AMOSTRA
Estruturas	Pilar nº 9.1
	Treliça nº 6.7.2
	Treliça nº 6.7.5
	Viga nº 2.8.12
	Viga nº 2.8.13
Vedações	Chapa estampada nº 3.18.1
	Chapa estampada nº 3.18.2
Ornamentos	Grade ornamental nº 4.2.1
	Calha ornamental nº 7.3.5 (<i>Walter MacFarlane's</i>)

3.2.3 Ornamentos do Cemitério da Soledade

Por se tratar de um grande número de ornamentos, e a impossibilidade de estudar todos os túmulos e mausoléus que possuem elementos decorativos metálicos, houve a necessidade de selecionar aqueles mais significativos para a amostragem do Cemitério da Soledade.

O Cemitério da Soledade abrange 182 ornamentos em metais espalhados nas 464 sepulturas, dentre túmulos e mausoléus. Dessa forma, a primeira etapa foi a organização do sítio histórico por meio de mapeamento e divisão em 24 quadrantes, nomeados de A à Z, baseados em estudos anteriores do Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional (IPHAN), via o escritório R2 Arquitetura e Urbanismo.

Posteriormente, os ornamentos foram classificados em dois grupos: portões de mausoléus, representados na cor azul, e gradis de túmulos, em vermelho (Figura 25).

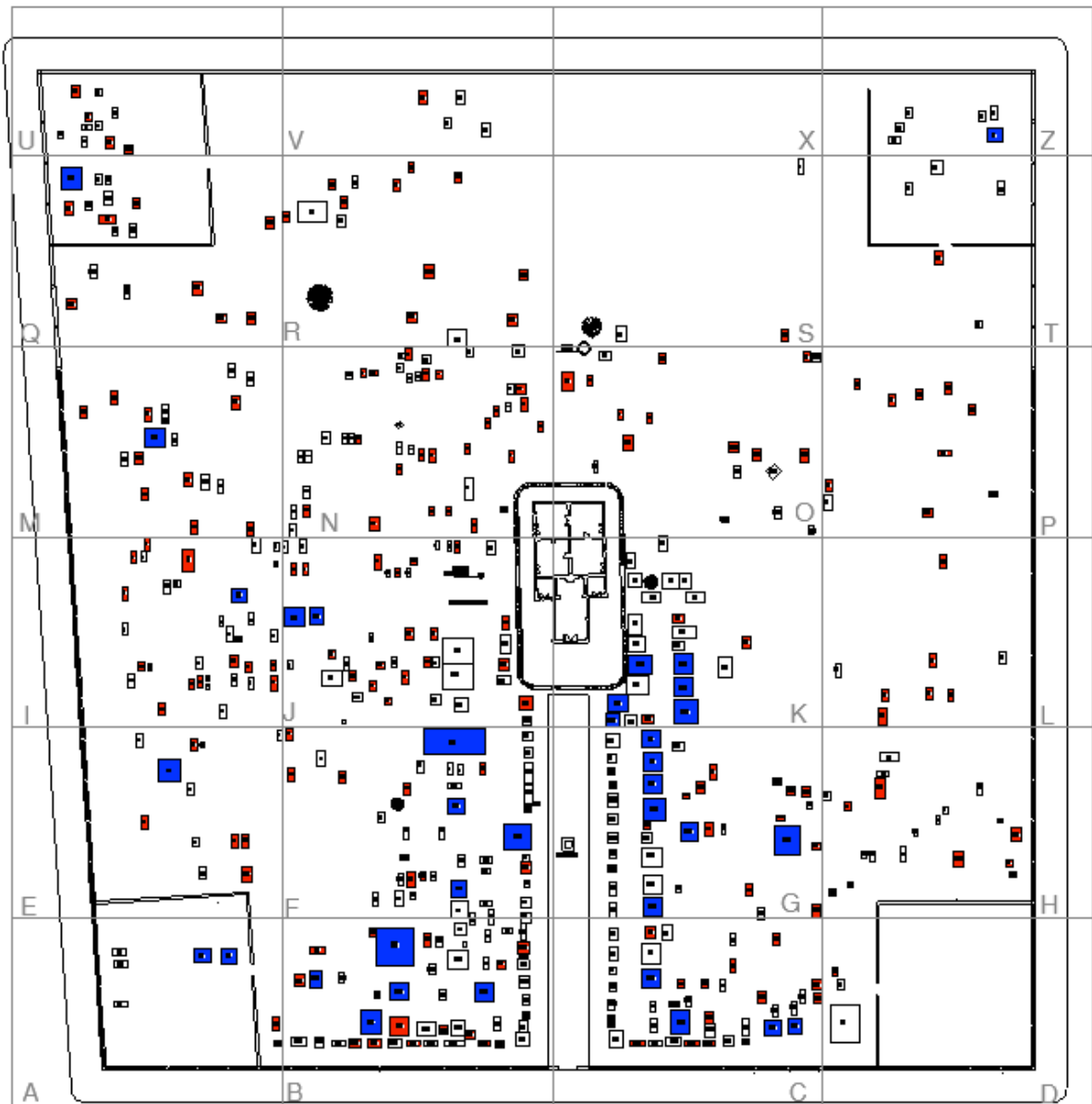


Figura 25 - Mapeamento do Cemitério da Soledade com a marcação dos portões metálicos em azul, e gradis em vermelho (Fonte: autora, baseado em trabalhos anteriores do IPHAN, realizado pela R2 Arquitetura).

Para melhor definir os ornamentos mais representativos para a pesquisa, levou-se em consideração o estado de conservação, em que apenas os que já apresentavam lacunas foram estudados. Foram selecionados 16 ornamentos diferentes, dentre 10 portões de mausolés (Figura 26) e 06 gradis (Figura 27).

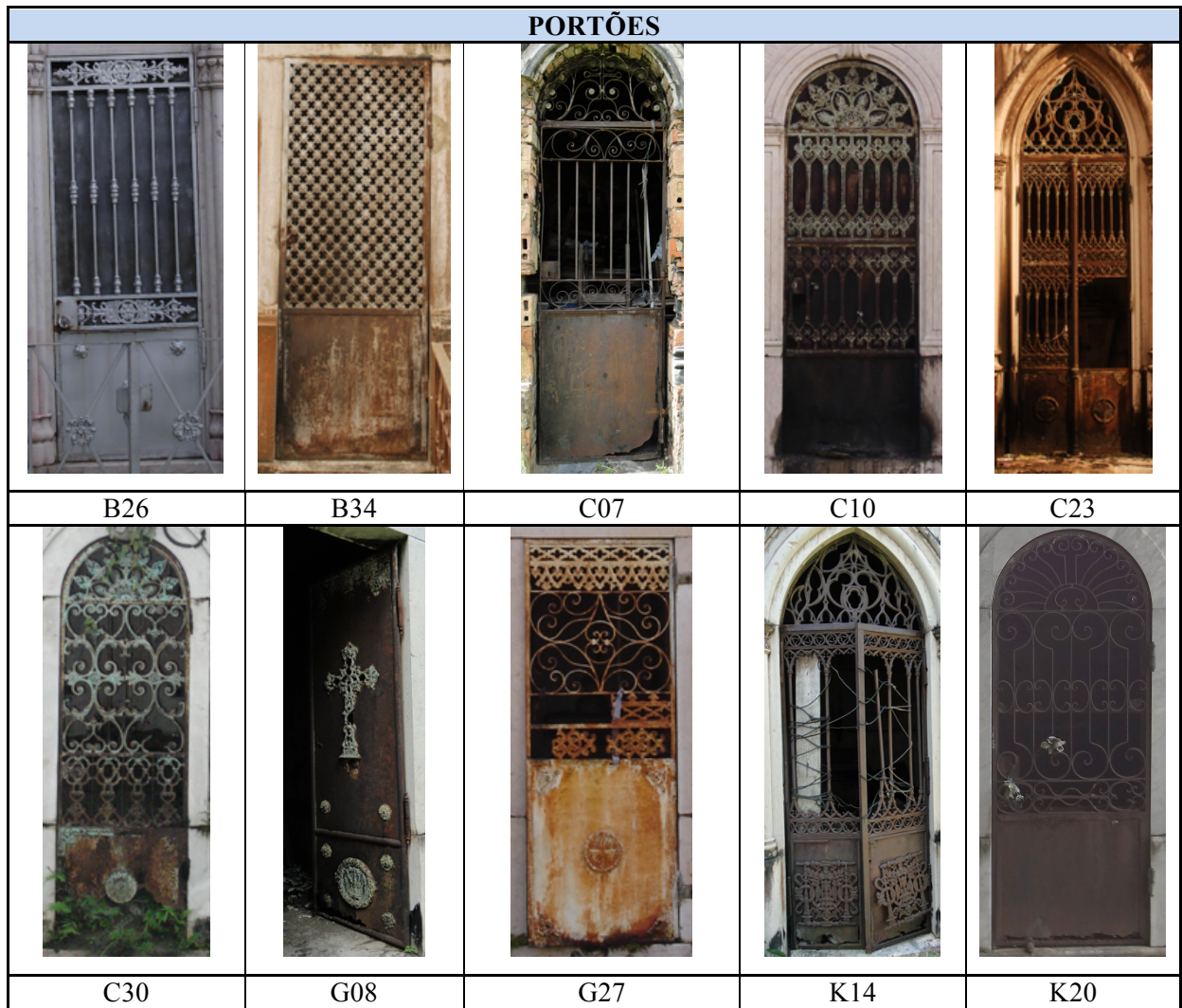


Figura 26 - Portões de mausoléus selecionados do Cemitério da Soledade.

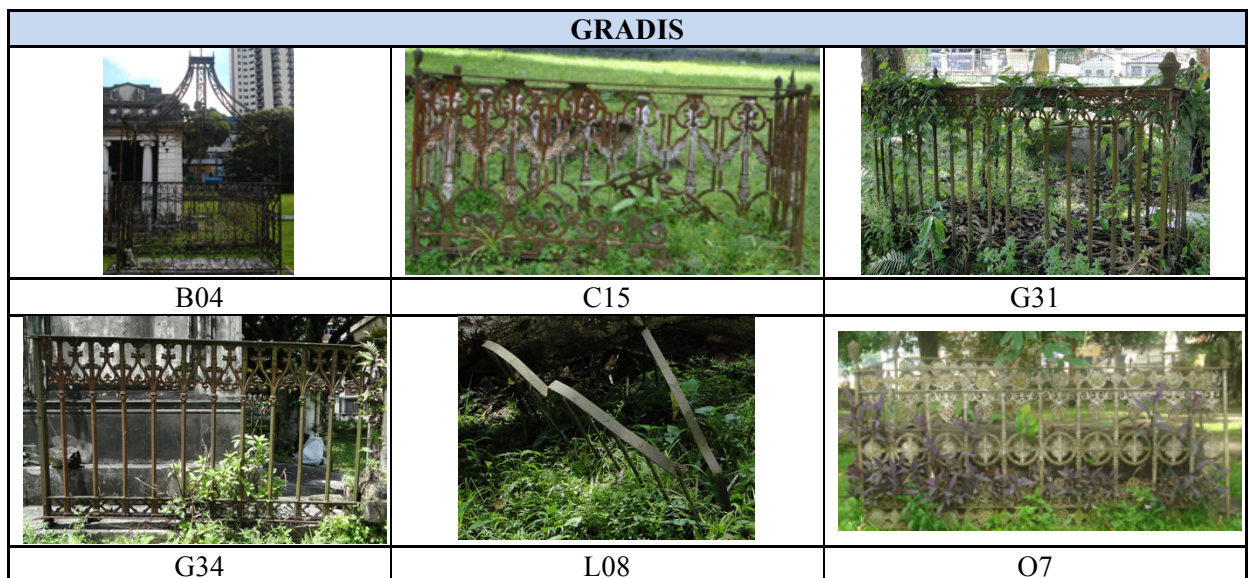


Figura 27 - Gradis de túmulos selecionados do Cemitério da Soledade.

Os portões e gradis possuem diversos tipos de ornamentação, dentre metais fundidos, forjados, e por vezes, a combinação dos dois. Por outro lado, também existem muitos ornamentos iguais ou bastante semelhantes espalhados pelo cemitério, em especial os gradis. Dessa forma, a amostragem abrange diversos portões e gradis dos vários tipos contidos no cemitério.

3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais utilizados são voltados para a caracterização física, química e mineralógica dos materiais.

Na caracterização física fez-se uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enquanto a análise química foi realizada em porções selecionadas pelo Sistema de Energia Dispersiva (SED) do MEV, e a caracterização mineralógica foi feita por meio da Difractometria de Raios-X (DRX).

Os ensaios de MEV foram realizados no equipamento da marca LEO, modelo 1430 VP. O metalizador utilizado é da marca EMILECH K550X, e metaliza as amostras a partir da interação entre um alvo de ouro ou de carbono puro e íons de ar (gás argônio), a uma pressão de $2 \cdot 10^{-1}$ mbar, com corrente de 25 mA durante 02'30", depositando uma camada de espessura média de aproximadamente 15nm sobre as amostras. O equipamento pertence ao Laboratório Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMEV), do Instituto de Geociências da UFPA.

As análises mineralógicas por Difractometria de Raios-X (DRX) foram realizadas em difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (θ/θ), tubo de raios X cerâmico com ânodo de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo (2200 W- 60 kV), filtro $K\beta$ de níquel. As condições instrumentais utilizadas foram: varredura de 5 a $65^\circ 2\theta$, voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA, tamanho do passo $0,02^\circ 2\theta$ e tempo/passo de 60 s, fenda divergente de $1/8^\circ$ e anti-espalhamento de $1/4^\circ$; máscara de 10 mm; amostra em movimentação circular com frequência de 1 rotação/s. O equipamento pertence ao Laboratório de Caracterização Mineral (LCM), do Instituto de Geociências da UFPA.

As amostras para o MEV foram preparadas em seções polidas transversais, de forma a mostrar as espessuras decorrentes nos materiais analisados. Estas foram preparadas no Laboratório de Conservação Restauração e Reabilitação (LACORE/UFPA), com a utilização de resina de poliéster, desbastadas na politriz, empregando-se uma sequência de lixas umedecidas (200, 400, 600 e 1200 mesh), e por fim, o polimento com disco coberto com

veludo lubrificado com alumina. O polimento final é com a aplicação de *spray* diamantado de 1μ (Figura 28A). Para o MEV, as amostras foram metalizadas em Au.

Para os ensaios em DRX, utilizou-se a micro-preparação devido a pequena quantidade de amostras. Estas são pulverizadas em grau de ágata, e o pó resultante é colocado diretamente no porta amostra (Figura 28B).



Figura 28 - Amostras preparadas para o MEV (A), embutidas em resina de poliéster; Amostra pulverizada para ensaio de DRX (B).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os item de Resultados e Discussões da tese de doutorado está organizado em três artigos, conforme explicado no item 1.3 (Estrutura da tese), submetidos a periódicos internacionais.

O primeiro artigo intitula-se “*The metal alloys from the XIX century and weathering action in the Mercado de Ferro do Ver-o-Peso building, northern Brazil: identification with the usage of laboratorial analysis*”, publicado no periódico *Materials Characterization* (Elsevier, *Qualis A2 - Interdisciplinar*). O segundo intitula-se “*The disassembled iron chalet from the XIX century Amazon: characterization of historical metal alloys and corrosion processes*”, submetido ao periódico *Construction and Building Materials* (Elsevier, *Qualis A2 - Interdisciplinar*); e o terceiro, “*The metal ornaments at the Soledade Cemetery: the diversity of iron alloys in mortuary architecture from the XIX century in northern Brazil*”, submetido ao *Journal of Archaeological Science* (Elsevier, *Qualis A2 – Geociências*).

Os artigos foram organizados de forma a abranger do macro ao micro da arquitetura de ferro em Belém: das grandes estruturas, representadas pelos edifícios, aos diversos ornamentos, em especial grades e gradis.

Dessa forma, os dois primeiros artigos abordam edifícios inteiramente metálicos, típicos da arquitetura de ferro importada para Belém. O primeiro artigo trata da caracterização das ligas metálicas e alterações intempéricas no Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, e o segundo aborda o mesmo tema para o chalé de ferro desmontado (antigo chalé da IOEPA). Os resultados do estudo dos dois exemplares de edifícios metálicos criou subsídios para a identificação de padrões utilizados nas fundições antigas, em função do sistema construtivo de diferentes países, no que tange estruturas, vedações, coberturas, e ornamentos. Estes resultados indicaram diversidade de ligas de ferro na arquitetura do século XIX.

O terceiro artigo abrange a temática dos ornamentos metálicos do Cemitério da Soledade. Neste artigo é apresentada a grande diversidade de tipos de ferros fundidos, forjados e laminados da mesma época, e nunca evidenciados.

Os três artigos em conjunto denotam informações sobre os tipos de ligas metálicas produzidas na arquitetura de ferro, e sua relação com os processos de fabricação. Foram descritas diversos tipos de ligas, no que tange as características físicas, químicas e mineralógicas, que até então eram desconhecidas.

4.1 ARTIGO 01: *THE METAL ALLOYS FROM THE XIX CENTURY AND WEATHERING ACTION IN THE MERCADO DE FERRO DO VER-O-PESO BUILDING, NORTHERN BRAZIL: IDENTIFICATION WITH THE USAGE OF LABORATORY ANALYSIS.*

Artigo publicado no periódico *Materials Characterization*, em 07/08/2014.



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Characterization

journal homepage: www.elsevier.com/locate/matchar

The metal alloys from the XIX century and weathering action in the Mercado do Ver-o-Peso building, northern Brazil: Identification with the usage of laboratory analysis

Flávia Olegário Palácios^{a,*}, Rômulo Simões Angélica^a, Thais Alessandra Bastos Caminha Sanjad^b

^a Universidade Federal do Pará, LCM (Laboratório de Caracterização Mineral), Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), Brazil

^b Universidade Federal do Pará (UFPA), LACORE (Laboratório de Restauração, Conservação e Reabilitação), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU), Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 February 2014

Received in revised form 3 August 2014

Accepted 5 August 2014

Available online 7 August 2014

Keywords:

Architectural heritage

Iron alloys

Corrosion products

ABSTRACT

The fabrication of metallic buildings started in Europe after the Industrial Revolution in the 18th century. Metallic constructions became very popular, and started being imported by several countries, due to the facility of constructing or assembling. Belém, a northern Brazilian city, holds a great number of buildings entirely made of iron, including the Ver-o-Peso, a fish market which structures were imported from England by the end of the 19th century. This building represents a unique type of architecture and it's an important part of the city's heritage. However, research so far did not focus on its construction materials. Ver-o-Peso building's metal alloys haven't been thoroughly studied concerning physical, chemical and mineralogical characterizations. This paper aims to identify the types of metal alloys used in the building, and also corrosion products' result from weathering actions. The methods used to characterize the materials were scanning electron microscopy and X-ray diffraction. Through this research it was possible to identify four types of iron alloys used in the different parts of the building, characterize the paint coats, and determine types of corrosion. The characterization of the materials in the building allows enrolling basis for restoration processes, documenting the types of metal alloy used in architectural heritage from the 19th century, as well as understanding the advances of corrosion.

© 2014 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Belém City, the capital of Pará State, located in northern Brazil, had an expressive economical growth during the XIX century due to rubber exportation. As a consequence, the city expanded its urban limits and the construction of new buildings was necessary. Metallic buildings were already very famous since XVIII century in Europe, as they were composed of several pieces of metal of easy assembling. Due to its facility of construction, these buildings were an adequate solution to attend Belém's need for new buildings of fast construction.

During the XIX and XX centuries several metallic architectural elements, such as structures, urban equipment, ornaments, and even entire buildings were imported to Belém from Germany, England, France and Belgium. Nowadays, Belém is the city that holds one of the largest numbers of metallic historical ornaments and buildings in the country [1].

Among gazebos, chalets, hangars and other architectural typologies, the Mercado do Ver-o-Peso building is one of the most important metallic constructions in the city. It is a complex iron structure assembled in a noble urban site of 2068 m² near the bay (Fig. 1) [2]. This

building was imported from England in 1881 as a government request, and its assembling endured for ten years until its inauguration in 1901. Even though Mercado do Ver-o-Peso building is a century old construction, it is still the main fish market in the city and one of the most famous touristic sights.

Despite its historical, social, technical and architectural importance, several previous studies on this construction are mainly written in Portuguese and do not include the detailed identification of materials with the usage of laboratory analysis, specially concerned to physical, chemical and mineralogical characterizations. This gap in research lacks the detailed understanding about the types of metal alloys used in metallic historical buildings and the comprehension on further weathering action.

Until the beginning of the 20th century, there were no international standards for foundry processes, mainly in Europe, which were very experimental at that time. Each country and region developed different techniques in widely different characteristics [3], and the metal alloys used in historical buildings in Belém are so far unknown. This kind of information is fundamental to subsidize preservation and restoration processes, specially concerning to pathology advances, in choosing the best paint coats to be applied, as well as in the confection of replicas and prosthesis.

The aim of this research is to characterize metal alloys and weathering (corrosion) products in the Mercado do Ver-o-peso

* Corresponding author at: Rua Augusto Corrêa, 01-Guamá Zip code: 66075-110, LCM/PPGG/UFPA, Brazil.

E-mail address: flavia.op@gmail.com (F.O. Palácios).



Fig. 1. Location of Belém in the Brazilian map and a recent picture of the Mercado do Ver-o-Peso building.

building, with the usage of Instrumental analytical techniques. The results obtained constitute an important type of architectural registry that was still not carried out in our region and will subsidize future restoration processes. The use of laboratorial analysis is also an important tool in documenting construction materials used in historical buildings as well as different forms of weathering.

2. Materials and Methods

2.1. Sampling

Two main kinds of metallic materials were described and sampled in this work: 1) unaltered metal alloys; and 2) altered metal alloys, that exhibit alterations caused by corrosion. In some samples, paint coats associated to the metal alloys were also found and sampled for further characterization. The materials collected were very often associated to each other in the same sample, making a difficult task to analyze the materials separately.

Sampling was very carefully carried out in small areas of the building due to its federal protection as a historical site. Two areas were allowed for sampling by the Brazilian Federal Preservation Institute, IPHAN (*Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional*), which were the left front tower and the main facade (Fig. 2).

Samples of different parts of the building were collected, such as pillars, beams, ornaments, and roof tiles in areas that already presented gaps or lacunae. Small fragments of maximum 1 cm were taken from the construction parts (Fig. 2).

Fourteen samples were collected and organized in groups according to its architectural function in the building, described in Table 1. The first group is composed by the structures, such as beams, pillars, and sustentation parts of doors and windows; the second is the roof tiles; and the third is related to ornaments, such as water ducts, doors and frameworks.

2.2. Laboratorial Analysis

The scanning electron microscopy (SEM) images and EDS analysis were obtained at an accelerating voltage of 20 kV using a LEO

equipment, model 1430 VP. The samples were coated with gold on a EMILECH K550X auto fine coater. All equipment belong to the Universidade Federal do Pará (UFPA).

The samples for SEM were built-in polyester resin for analysis in the section areas, in order to show the thickness of the materials analyzed. They were finished with the usage of sandpaper of different grain sizes (200, 400, 600 and 1200 mesh), and lubricated in velvet paper and alumina. The samples were prepared using equipment from the Laboratory of Restoration, Conservation and Rehabilitation (LACORE) in the Institute of Technology at UFPA.

The mineralogical composition of the samples was determined by Powder X-ray Diffraction Analysis (XRD), using a PANalytical X'Pert PRO MPD (PW3040/60, θ/θ) diffractometer with a ceramic X-ray tube (Cu anode, $K\alpha_1 = 1.540598 \text{ \AA}$), K β Ni filter, and an X'celerator PSD (Position-Sensitive Detector). Instrumental conditions used are as follows: scan range from 5 to 100°, γ , tube power of 40 kV and 30 mA, step size of 0.02°, time/step of 60 s, divergence slit of 1/8°, anti-scattering slit of 1/4°, mask of 10 mm, and sample spinning with a rotation time of 1.0 s. The equipment belongs to the Laboratory of Mineral Characterization (LCM), from the Institute of Geosciences at UFPA.

For the XRD analysis, micro-preparation was used, in which small amounts of the samples were powdered and placed on a Silicon (zero-background) sample holder. This type of preparation was used due to the low amount of each sample, which makes difficult the use of typical powder analysis that requires at least 2 g of sample.

3. Results

3.1. General Characteristics

In general, the 14 samples analyzed in this work exhibited very similar results in terms of their physical characteristics. Two distinct textures were described: the unaltered metal and the altered metal.

The unaltered metal has a solid and homogeneous matrix with smooth texture, exhibiting a typical light gray color in the SEM images (Fig. 3). EDS analysis confirmed that the chemical composition is mainly constituted by Fe in all samples. The diffractograms confirm this result, showing the ferrite (α -Fe) as the only phase (Fig. 3).

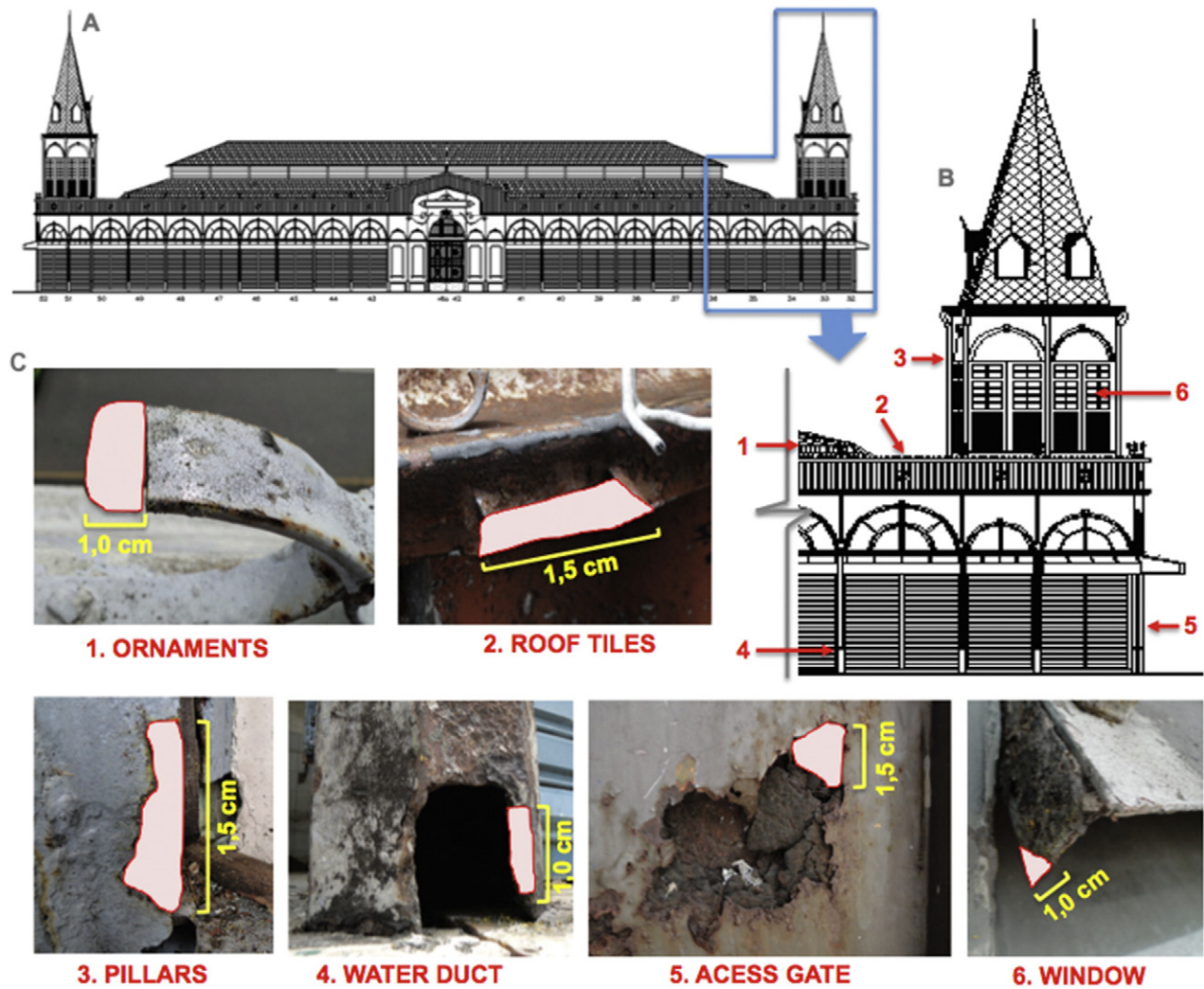


Fig. 2. (A) Location of the allowed area for sampling in the building; (B) types of architectural parts used for sampling; (C) places where the samples were collected and their sizes.

On the other hand, the altered metal exhibits a darker gray color and fractured texture in the SEM images, in an abrupt contact with the unaltered metal. Grain formation on external portions can be observed, which may indicate loss of consistency (Fig. 3).

EDS analyses were carried out in several points for the different samples. The chemical composition is dominated by Fe, but with marked differences in relative peak intensities, in comparison with the O peaks. It can be related to the presence of different iron oxo-hydroxide

phases, such as hematite (Fe_2O_3) and goethite ($\text{Fe}_3 + \text{O}(\text{OH})$), typical of corrosion products, which were confirmed by XRD.

However, despite the physical, chemical and mineralogical homogeneity in most of the samples, some differences were also identified. The unaltered metal exhibited some differences concerning inclusions on the iron matrix, and the altered metal presented variations mainly concerning chemical and mineralogical among sampling groups, which will be described in detail as follows.

Table 1

Description of the samples according to their group, area of sampling and type.

Group	Sample	Sampling area	Type of sample
01 Structures	VP.EP1	Internal part of the pillar 1 in the tower's second floor	Metal alloy and corrosion product
	VP.EP2	Internal part of the pillar 2 in the tower's second floor	
	VP.EP3	Internal part of the pillar 3 in the tower's lower floor	
	VP.EP4	Internal part of the pillar 4 in the tower's lower floor	
	VP.EP5	External part of a pillar in the main façade	
	VP.EP6	External part of a pillar in the tower's lower floor	
02 Roof tiles	VP.EJ1	Window structure	Metal alloy and paint coats
	VP.OT1	Ornament tile on the gable	Metal alloy and corrosion product
	VP.T1	Gable's tile	
03 Ornaments	VP.T2	Window tile	Metal alloy and paint coats
	VP.OG1	Gable's framework	
	VP.C1	Water duct	
	VP.OC1	Arc of support of the water duct on the lower floor	
	VP.P1	Gate of main access to the building	Metal alloy and corrosion products

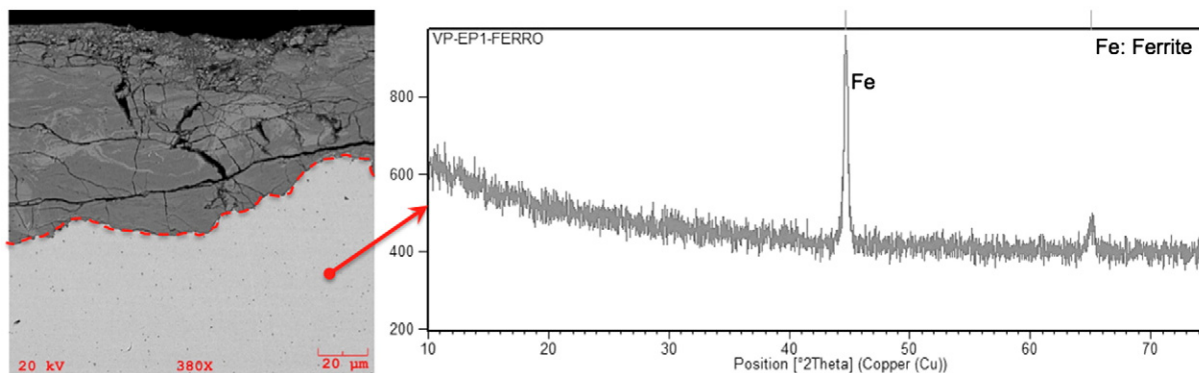


Fig. 3. (A) Representative SEM image, indicating the altered and unaltered areas of the metal; (B) samples' representative diffractogram indicating ferrite.

3.2. Unaltered Metal

Three types of inclusions are described among the samples of unaltered metal: circular, elongate and lamellae shapes. They are also known in literature as precipitations, which may indicate different kinds of cast iron.

Circular shaped inclusions are characteristic in nodular cast iron [4]. In this work, they are described only in samples from Group 1 (structure group). According to EDS analysis, they are mainly constituted by Fe, as exhibited in Fig. 4. The main concern is related to the spot size of the electron beam, which is probably analyzing also the iron matrix, composed mainly by ferrite, as already identified by XRD. Since the inclusions are deeper gray than the matrix, it means that the chemical composition of the inclusions is related to low atomic number elements (e.g., Si and Al), or even that the inclusions are filled with air.

Elongated inclusions are described in samples from Group 2 (roof tile group). These samples are also constituted mainly by Fe, according to EDS analysis. However, different from the circular inclusions from Group 1, the punctual chemical analysis also showed Al, Ca, and Zn (Fig. 5). These elements probably evidence vestiges of foundry processes and other additions to the metal alloy to provide additional properties, such as durability or elasticity.

The lamellae inclusions are presented in a sample from the water duct (VP.C1), from Group 3 (ornament group). The SEM image (Fig. 6) shows a very interesting pattern of irregular and curved lamellae, represented by dark lines in the ferrite matrix of the unaltered metal. Locally, circular inclusions can also be found, similar to those described in Group 1. These physical characteristics are very common in gray cast irons [5].

Chemical analysis by EDS showed that these lamellae are mainly constituted by C. However, it may also represent gaps or fissures in

the sample, due to its black color and irregular shapes. The circular inclusions are composed by Ti, S, Mn, Si, and Cr (Fig. 6).

Besides the physical and chemical characteristics, this sample is distinguished from the others due to its mineral composition: the graphite (C) phase, identified by XRD analysis (Fig. 7), and common in this type of iron alloy [6].

However, despite of the presence of different inclusions among the sampling, there is one sample in the ornament group (VP.0G1) that does not show any kind of inclusion. This sample is a gable's grid and exhibits a massive iron matrix without any inclusion (Fig. 8). The mineralogy is composed only by ferrite and EDS analysis indicated only Fe. The smooth surface and the low level or absence of trace elements are typical characteristics of wrought iron [7], mainly used in ornaments in architecture.

3.3. Altered Metal

Samples from the altered metal are mainly from Groups 1 (structures) and 3 (ornaments) and exhibit remarkable differences related to: 1) physical characteristics; 2) chemical composition; 3) mineral phases; and 4) progress of corrosion.

The physical characteristics concern different textures described in SEM images. In Group 1 (structure group), the altered metal shows fractures in inner areas and grain formation on its extremities (Fig. 9A), indicating defragmentation due to weathering, very common in iron alloys [8]. In ornaments, on the other hand, the altered alloy exhibits more solid texture and multilayered morphology (Fig. 9B).

EDS analysis from Group 1 (structure group) indicates only variations related to relative peak intensities of Fe and O. In ornaments, on the other hand, Cl, Mn, Si, Ca, and Al are also identified.

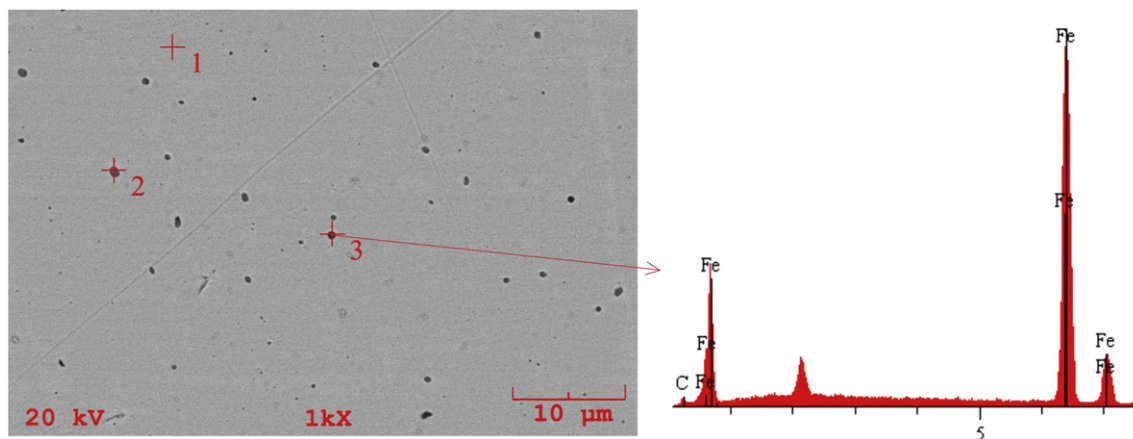


Fig. 4. SEM image of sample VP.EP3 from Group 1 (structure group), which presents circular inclusions, and the respective punctual chemical analysis.

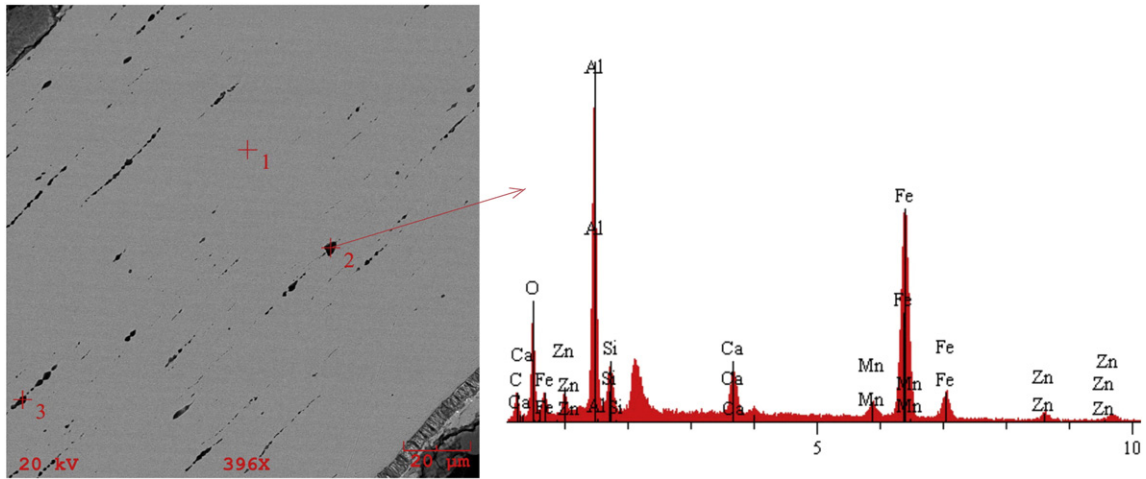


Fig. 5. SEM image of sample VP.T2 from Group 2 (roof tile group), which presents elongated precipitation, and the respective punctual chemical characterization, showing Al, Ca, and Zn.

These differences in physical and chemical characteristics may indicate remaining paint coats in ornament samples. The paint suffers weathering processes along with the iron alloys causing a different texture and composition on the altered metal.

The main mineral phases identified in both groups were hematite and goethite, typical corrosion products. However, minor amount of other phases were also identified by XRD in the different groups. In samples from Group 1 (structure group), quartz (SiO_2) and kaolinite are identified (Fig. 10). Quartz can be related either to foundry processes or to aerosol deposition, since this mineral is common in soils and sediments in the Amazon region. Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), on the other hand, is possibly part of the composition of remnant paint but can also be related to aerosols.

In samples from Group 2 (ornament group), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) was identified (Fig. 11), related to cement addition in some parts of the

building. Cement was found in thick layers on many surfaces along the building, even though not common on metal building restoration or construction processes. The presence of cement is due to recent interventions in the building, which must be further removed.

3.4. Paint Coats Associated With the Metal Alloys

According to Boucher et al. [9], it is possible that corrosion also occurs among remnants of other materials deposited on metal alloys. In this work, such materials are the paint coats. As shown in SEM images (Fig. 12), the paint coats are formed by grains of different sizes, and XRD results revealed zincite (ZnO) and calcite (CaCO_3) as the main mineral phases.

The presence of corrosion products were found between unaltered metal and remnant paint coats. Three distinct portions were presented

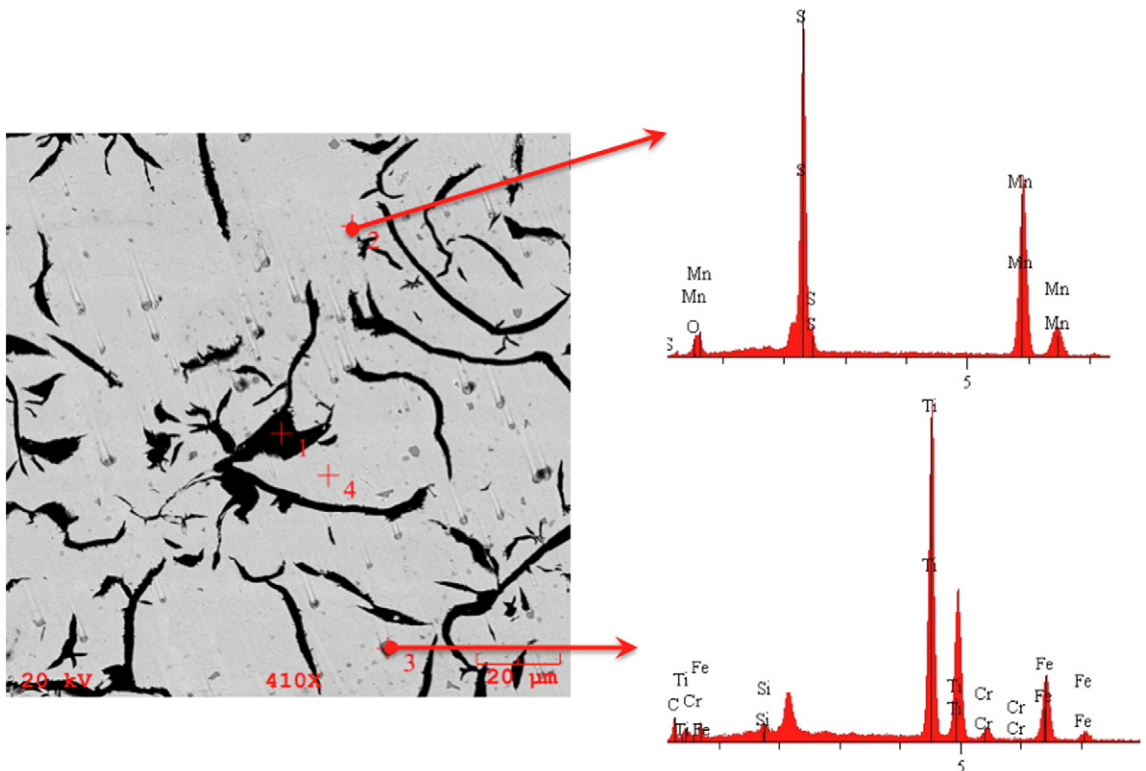


Fig. 6. SEM image of sample VP.C1 from Group 3 (ornament group), which present lamellae and circular shaped inclusions, and respective punctual chemical analysis.

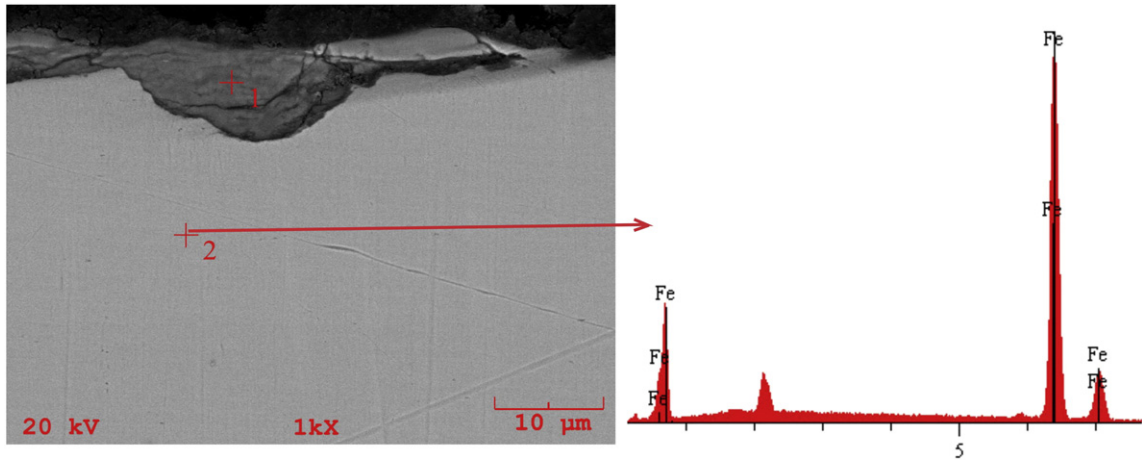


Fig. 7. Comparison of diffractograms from different groups. Above, the diffractogram of sample from Group 1, indicating ferrite; below, the diffractogram from a water duct (Group 3), indicating ferrite and graphite.

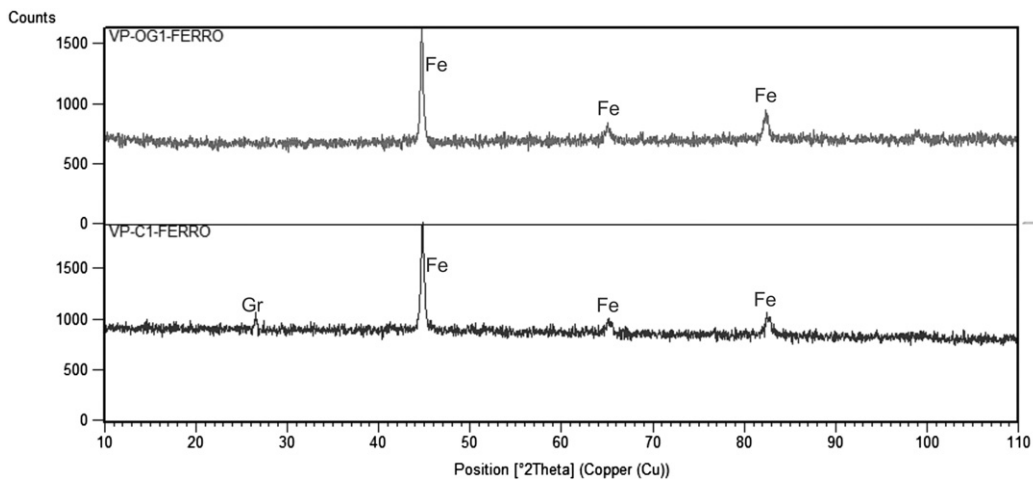


Fig. 8. SEM image from the sample (VP.OG1), in the ornament group, showing the absence of inclusions in the matrix, and the respective punctual chemical analysis.

in the samples: 1) the first and inner portion is the unaltered metal; 2) the second and intermediate portion is related to corrosion products; 3) and the third and outer portion is related to the paint coats (Fig. 12).

In Fig. 12 it is possible to notice that the portions affected by corrosion exhibit multilayered morphology and are composed by Fe and Si,

besides Zn and Ca, possibly related to zincite and calcite, described before on the paint coats. The paint's chemical elements might have been mobilized and migrated to other porous layers due to weathering action or have leached out. Additional analysis should be carried out to elucidate the chemical remobilization of paint coats and metal constituents in a further research.

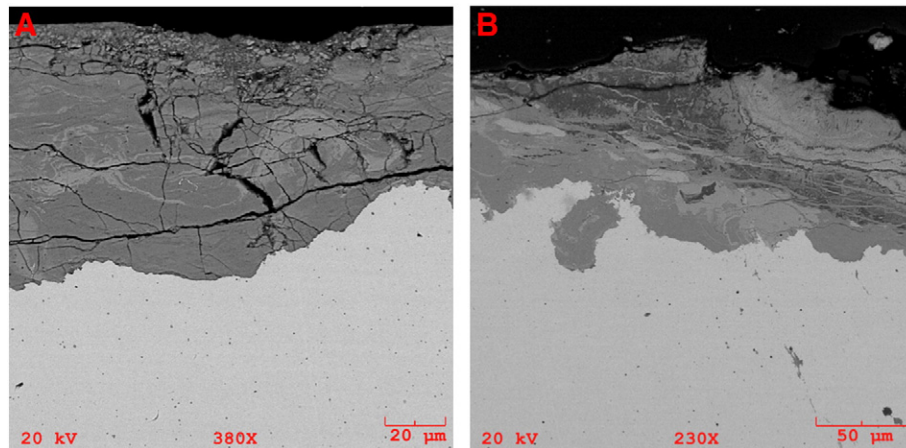


Fig. 9. Texture differences in corrosion products between samples from structure group (sample VP.EP3) (A) and the ornament group (sample VP.OC1) (B).

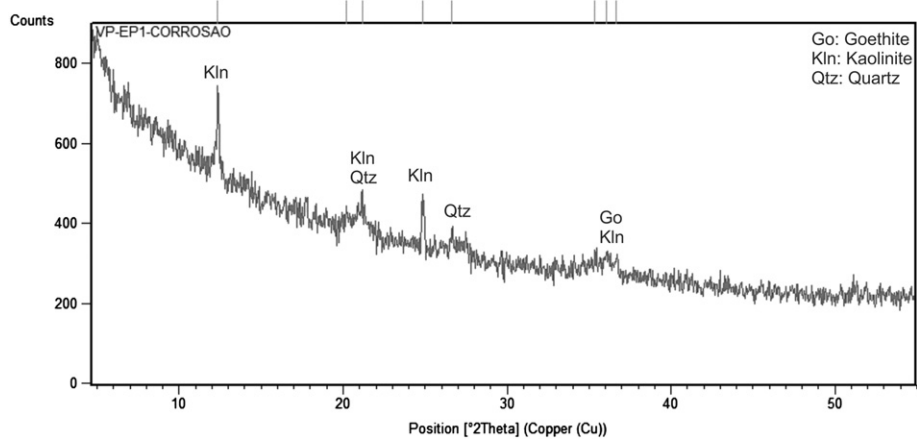


Fig. 10. Diffractogram of the sample VP-EP1, from the structure group of sampling, which presents goethite, kaolinite and quartz.

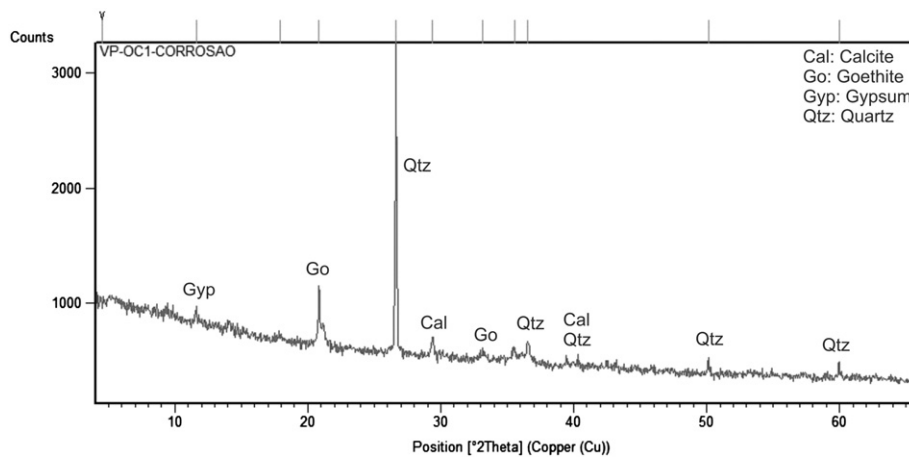


Fig. 11. Diffractogram of the sample VP-OC1 in ornament group, showing calcite, goethite, gypsum and quartz.

However, it is possible to observe that the multilayered texture and the presence of such additional elements, besides Fe and O, show that corrosion processes in the studied samples affected both iron alloys and paint coats.

In well-preserved metal alloys, there is no presence of corrosion products between the unaltered metal and paint coats. Normally, the metal

alloy and the most internal paint coat are not altered, only the most external paint coat, which has direct contact to the environment (Fig. 13).

The occurrence of corrosion products between the unaltered metal and the paint coats is probably due to the gaps found on the building's facade. These gaps are caused mostly by metal alloys' intense corrosion and paint coat detachment, which allow the direct contact of rainwater

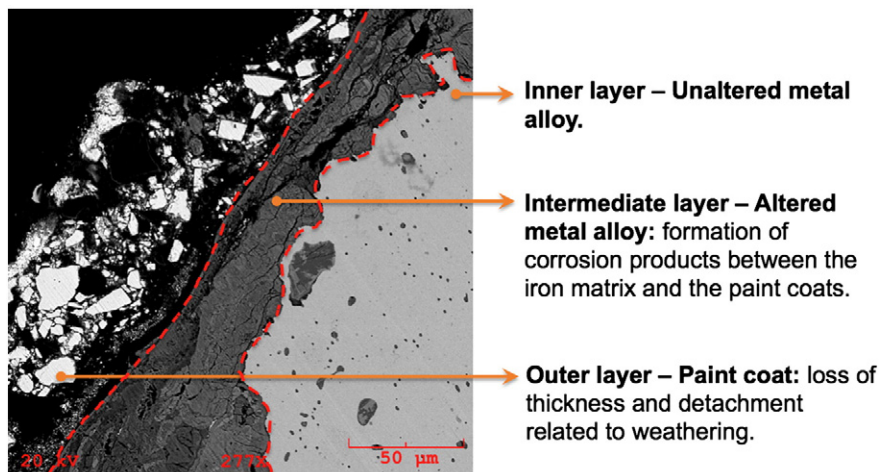


Fig. 12. SEM image with the formation of corrosion products between the metal alloy and the paint coats.

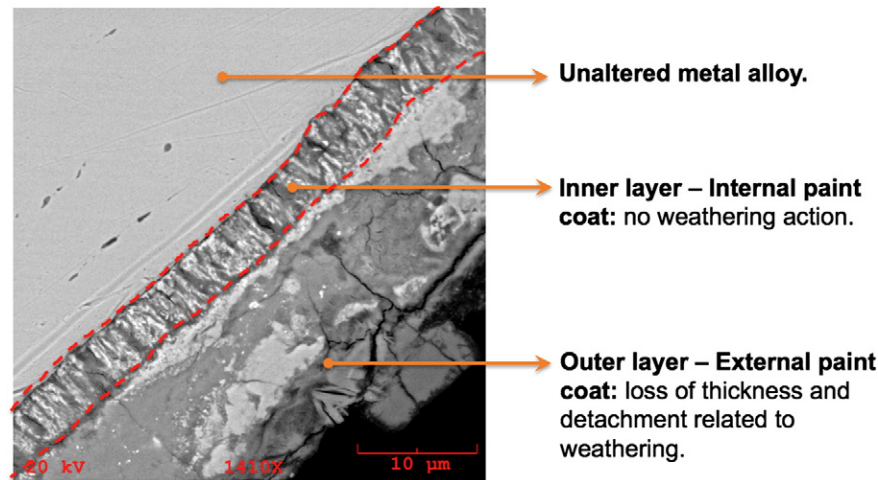


Fig. 13. SEM image of a sample showing a well-preserved metal alloy: the inner layer (internal paint coat) does not present corrosion products.

with the unaltered metal, as well as in the interface with the paint and the iron matrix.

4. Discussion

The results of this work presented iron alloys basically composed by Fe, related to ferrite as the main mineral phase. However, based on microscopic and textural evaluation, four different kinds of alloys were grouped according to the inclusions or precipitations described: 1) Circular inclusions, for Group 1 (structure group); 2) elongated inclusions, for Group 2 (roof tile group); 3) lamellae inclusions, for water ducts from Group 3 (ornament group); and 4) the absence of inclusions in some samples from Group 3.

The shapes and kinds of inclusions can determine different types of iron alloys. Some of them are not perfectly compatible to new alloy manufacturing, since the processes of foundry were very different around the world before the 19th century.

According to Guesser [10], the following classification can be defined for the metal alloys herein described: 1) Nodular cast iron, for those with circular inclusions; 2) type E cast iron, with elongated inclusions; 3) type B cast iron, lamellae inclusions; 4) wrought iron, related to the absence of inclusions.

Chemical and mineralogical differences were also found among the different types of iron alloy, summarized in Table 2.

The iron alloys in Ver-o-Peso building were intentionally built to provide the proper characteristics to the metal pieces applied on different parts of the building. For example, nodular cast iron used on pillars and beams, is more resistant to compression and traction than wrought iron. On the other hand, wrought iron is more malleable and adequate for ornaments. It is worth noting that until the end of the 19th century different foundry processes for the same building are not mentioned on historical data and not documented on heritage iron architecture in northern Brazil.

The weathering products on Ver-o-Peso building also showed distinct characteristics due to the formation of corrosion products between paint coats and the iron alloy, only observed through detailed textural and microscopy studies.

5. Conclusions

The results from this work can be considered as helpful information to the performance of future restorative processes on metal alloys, such as: 1) the confection of proper replicas and prosthesis; and 2) appliance of new paint coats for minimizing weathering actions.

The confection of replicas and prosthesis can be developed due to the results of laboratorial analysis, which provides the original composition of the historical alloy, and also gives basis on the determination of adequate foundry temperatures. The results also aid on the decision of the kind of method used on mending broken pieces and incorporating new metal parts.

However, these methods still need to be thoroughly studied in order to be applied. The restoration of iron architecture in Brazil has developed in the fields of cleaning and protecting, leaving the damaged pieces to discard and substitution using completely new materials, such as aluminum and fiberglass. According to Brandi [11], restoration processes should save as much as possible damaged areas of historical monuments and respect their original characteristics, for they are singular in many ways.

The continuation of this research aims to produce replicas and prosthesis and their application on iron buildings and ornaments, in order to achieve basis for restoration using materials similar to the originals, and saving most of the iron pieces instead of whole replacement.

In this research, it was also possible to identify the original characteristics of the paint applied. However, the original layers are not protecting the metal surfaces, and as a consequence, a reasonable suggestion could be the removal of paint coats and the application of new proper ones, favoring iron alloy conservation.

Table 2

Description of the types of iron alloy described in this work according to their group of sampling, use on the building, types of inclusion, chemical and mineral characteristics.

Groups (Sampling)	Use on the building	Inclusions	Chemistry (Inclusions)	Minerals (Matrix)	Type of alloy (Guesser [10])
Group 1 (Structural group)	Pillars Beams	Circular	No trace elements	Ferrite	Nodular cast iron
Group 2 (Roof tile group)	Roof tiles Wall tiles	Elongated	Al, Ca, Mn, Si, Zn	Ferrite	Type E cast iron
Group 3 (Ornaments)	Water ducts	Lamellae	C (lamellae)	Ferrite, Graphite (inclusions)	Type B cast iron
	Frameworks	Absence	No trace elements	Ferrite	Wrought iron

Due to the laboratorial documentation developed in this paper, the paint coat directly in contact with the iron may be reproduced, once it is zinc based, proper for protection of historical and modern iron buildings. The other paint layers might also be reproduced according to the original characteristics, especially due to the preservation of the color scheme used through time, topic of a further investigation.

The next steps on this research are to thoroughly study the paint coats using optical microscopy and X-ray fluorescence (XRD), and to carry out restoration testing of the iron alloys. The Ver-o-Peso building is part of a study on the metal buildings and ornaments imported from Europe to Belém are still in development.

Acknowledgments

The authors give thanks to IPHAN, for allowing the sampling for this research; to LabMEV, from the Geoscience Institute at UFPA, for the SEM/EDS analysis; to CNPq for a PhD scholarship for the first author, besides financial support for this research.

References

- [1] G.G. Silva, *Arquitetura do ferro no Brasil*, Editora Nobel, São Paulo, 1987.
- [2] J. G. Malcher. Relatório em que o Exm. Sr. Dr. Gama Malcher, 1° Vice-Presidente da Província, passou a administração da mesma ao Exm. Sr. Dr. Manoel Pinto de Souza Dantas Filho, em 27 de Abril de 1881. Belém: Typ. do Diário de Notícias, 1881 (Government books).
- [3] M. Bouw, I. Wouters, J. Vereecken, L. Lauriks, Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 – a complex and confusing situation resolved, *Constr. Build. Mater.* (2009) 2775–2787.
- [4] M.F. Campos, L.C.R. Lopes, P. Magina, F.C.L. Tavares, C.T. Kuniyoshi, H. Goldenstein, Texture and microtexture studies in different types of cast iron, *Mater. Sci. Eng.* (2005) 164–170.
- [5] C.N. McCowana, T.A. Siewerta, J.D. McColskeya, K. Hildebrandb, D.L. Olsonc, United States Capitol dome: characterization of cast and wrought materials, *Mater. Charact.* (2011) 807–816.
- [6] M.L.A. Gil, A. Santos, M. Bethencourt, T. García, S. Fernández-Bastero, A. Velo, L. Gago-Duport, Use of X-ray and other techniques to analyze the phase transformation induced in archaeological cast iron after its stabilization by the electrolytic method, *Anal. Chim. Acta.* (2003) 245–254.
- [7] D. Starley, Determining the technological origins of iron and steel, *J. Archeol. Sci.* (1999) 1127–1133.
- [8] J. Monnier, D. Neff, S. Réguer, P. Dillmann, L. Bellot-Gurlet, E. Leroy, L. Legrand, I. Guillot, A corrosion study of the ferrous medieval reinforcement of the Amiens cathedral. Phase characterization and localization by various microprobes techniques, *Corros. Sci.* (2010) 695–710.
- [9] M. Boucher, E. Foy, D. Neff, P. Dillmann, The complex corrosion system of a medieval iron rebar from the Bourges' Cathedral. Characterization and reactivity studies, *Corros. Sci.* (2013) 361–372.
- [10] W.L. Guesser, *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*, Blucher, São Paulo, 2009.
- [11] C. Brandi, *Theory of Restoration*, Istituto Centrale per il Restauro, Roma, Italy, 2005.

4.2 ARTIGO 02: *THE DISASSEMBLED IRON CHALET FROM THE XIX CENTURY AMAZON: CHARACTERIZATION OF HISTORICAL METAL ALLOYS AND CORROSION PROCESSES*

Artigo submetido ao periódico *Construction and Building Materials* em 20/04/2014.



Flavia Palacios <flavia.op@gmail.com>

A manuscript number has been assigned: CONBUILDMAT-D-15-01287

1 message

Construction & Building Materials <esubmissionsupport@elsevier.com>

Tue, Apr 21, 2015 at 12:09 PM

To: flavia.op@gmail.com, flaviaop@ufpa.br

Cc: rsangelica@gmail.com, thaisabcs@gmail.com

Ms. Ref. No.: CONBUILDMAT-D-15-01287

Title: The disassembled iron chalet from the XIX century Amazon: characterization of historical metal alloys and corrosion processes

Construction & Building Materials

Dear Ms. Palacios,

Your submission, referenced above, has been assigned the manuscript number CONBUILDMAT-D-15-01287 and has been assigned to an Editor who will handle peer review.

Please note that in most cases at least two reviews may be required before a decision on a manuscript is made. You will be notified by e-mail each time a reviewer agrees to review your manuscript.

To track the progress of your manuscript, please log in to <http://ees.elsevier.com/conbuildmat/> and click on the "Submissions Being Processed" folder.

Your username is: flavia.op@gmail.com

If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT/automail_query.asp

Thank you for submitting your manuscript to Construction & Building Materials.

Kind regards,

Construction & Building Materials

=====

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

**THE DISASSEMBLED IRON CHALET FROM THE XIX CENTURY AMAZON:
CHARACTERIZATION OF HISTORICAL METAL ALLOYS AND CORROSION
PROCESSES**

Flávia Olegário Palácios *⁽¹⁾, Rômulo Simões Angélica⁽¹⁾; Thais Alessandra Bastos Caminha
Sanjad ⁽²⁾

(1) Universidade Federal do Pará – LCM (Laboratório de Caracterização Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG).

(2) Universidade Federal do Pará (UFPA) – LACORE (Laboratório de Restauração, Conservação e Reabilitação) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU).

(*) Corresponding Author (flavia.op@gmail.com)

ABSTRACT

The use of iron in architecture was intensified on the second half of the 19th century in Europe, and its influence achieved several countries in growth, such as Brazil. The installation of buildings of easy construction, such as metallic ones, was necessary and considered a sign of modernity for being of simple assembling and transportation. Even though metal buildings have historical, technological and architectonic values, many of them do not exist anymore. They were not spared from several changes Brazilian cities went through, such as Belém (Amazon Region). Belém has a great number of iron buildings, including the only three *chalets* entirely made of iron in the country, constructed according to the Danly system, from the Belgian factory *Forges d'Aiseau*. One of them, the IOEPA *chalet*, is disassembled. Several pieces were lost or damaged due to incorrect storage, exposition to weathering, and submitted to increasing corrosion process. It is an unique building and its historical and architectonical importance needs to be reassured. The objective of this study is to characterize its iron alloys and corrosion products, with the usage of laboratorial analysis, in order to subsidize future restoration processes.

Keywords: architectural heritage; disassembled *chalet*; iron alloys; corrosion products.

1. INTRODUCTION

During the end of the 19th century, Belém city (Amazon region, northern Brazil) started to import several iron buildings from European countries such as Germany, England, France and Belgium. Belém currently holds a great amount of architectural heritage built in iron, which gives the city unique historical and urban characteristics.

Besides the large number of ancient iron buildings, Belém also has the only three iron *chalets* in the country, imported from the Belgian foundry *Forges D'Aiseau* during the end of the 19th century and the beginning of the 20th century. The Belgian *chalets* are entirely made of iron, including pillars, beams, roof structures, ceilings, walls and ornaments [1].

The *chalets* were built in outer areas of the city's center and used for residential purposes. However, during the decades of 1980's and 1990's the *chalets* received other uses, such as offices, libraries, etc. Due to the city's growth and the need for bigger and modern constructions, the iron *chalets* were disassembled and reassembled in other areas of the city. The transportation and reassembly of *Forges D'Aiseau* buildings was possible due to their construction system, the *Danly* System [1], in which the constructions were planned to have unitary and standardized pieces. The buildings came along with a guide for construction (assembling), however, the iron pieces could also be rearranged differently from the original project, adapting to the owner's desires.

Two of the *chalets* were disassembled from its original site and reassembled at the Campus of the Federal University of *Pará* (UFPA) (Figure 01) and Rodrigues Alves Botanical Garden (Figure 02), both areas of great visitation. The buildings also received new color scheme and some minor interventions to adapt to their new urban site.



Figure 01- Iron *chalet* at UFPA



Figure 02 - Iron *chalet* at Rodrigues Alves Botanical Garden.

Despite its technical, historical and esthetic importance, the *chalet* that belonged to the State's Press was disassembled in 1986 and it hasn't been reassembled so far. Its iron pieces remain stored, and since then awaiting for restoration (Figure 2). The building's parts were displaced twice during the 1980's and 90's, thus, it has been exposed to severe weathering action due to its inappropriate storage, causing the loss of several parts of the building as a result of intense corrosion processes. Currently, the *chalet's* pieces are stored at Federal University of Pará Campus (Figure 2).

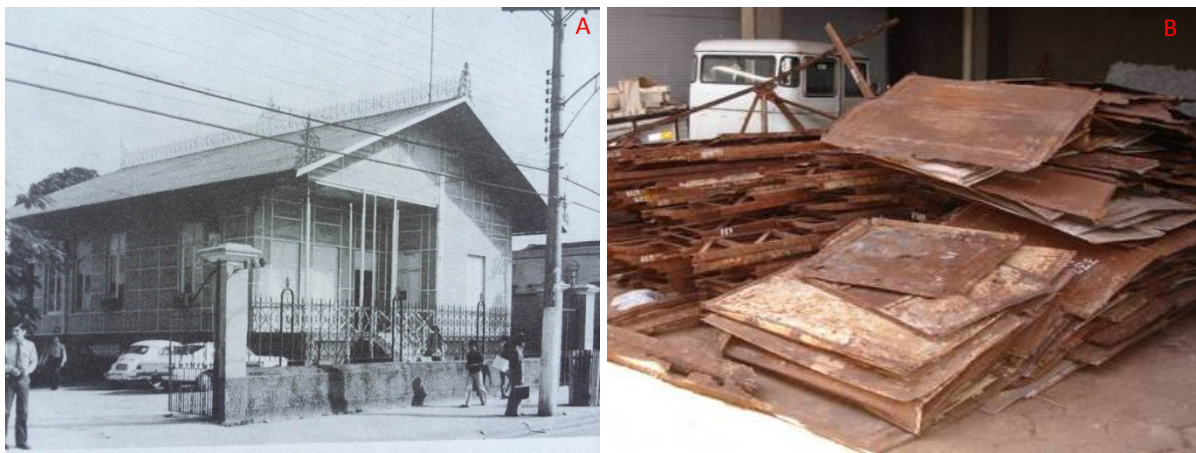


Figure 03 - The *chalet* while assembled in 1986 (A) [2], and currently disassembled (B).

After the *chalet* was disassembled, the building pieces were not properly safeguarded for further assembling, surrounded by dirt and soil, causing the increase of corrosion processes (Figure 3b). According to Starley (1999) [3], corrosion on architectural ironwork is not a great problem compared to archeological artifacts. However, in the Amazon Region

humidity achieves high rates, which accelerate corrosion processes, especially on the disassembled buildings with poor storage conditions.

The disassembled *chalet* has an elementary construction system when compared to the others, since it is smaller, has only one floor and its iron pieces are of simpler design. However, it contains ornaments from different foundries, such as a water duct from the British foundry *Walter MacFarlane's*. The usage of two different foundry factories in the same construction is not common among the iron buildings in the city.

Iron architecture in Belém – in fact, in the whole Amazon region – hasn't been thoroughly studied in the areas of materials science. Historical facts and construction systems have been discussed, however, the literature is restricted to local publications, and subsides for restoration has not been settled for iron buildings in the Amazon. According to Dillmann (2013) [4] historical objects and structures offer direct link to past events. Also, its survival is of great importance, and without invasive analysis of its materials, conservation would remain an empirical process.

One of the first steps for applying restoration processes is the characterization of the ancient materials used in the construction, such as metal alloy and paint coats and their weathering products. As stated by Collete (2014) [5], a detailed study of materials properties is necessary before planning any restoration processes.

Thus, the objective of this research is to provide subsidies for restoration processes of iron buildings, as part of a major research project initiated by Palacios et al (2014) [6] on English heritage metal constructions in the Amazon region. This paper aims to study metal alloys of the disassembled Belgian *chalet* in Belém, with the usage of instrumental analytical techniques in order to characterize metal alloys and weathering products in the building.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 SAMPLING

Two main kinds of metallic materials of the disassembled Belgian *chalet* were described and sampled in this work: 1) metal alloys; and 2) weathering products. In some samples, paint coats associated to the metal alloys were also found. The materials collected were very often associated to each other in the same sample, making a difficult task to analyze the materials separately.

Sampling was carried out in small areas of the pieces due to its legal protection as an historical building. The access for sampling was allowed by the Federal University of *Pará*, the *chalet's* official keeper.

Samples of different pieces of the building were collected in areas that already presented gaps or lacunae. Small fragments of maximum 1cm were taken from the construction parts (Figure 04).

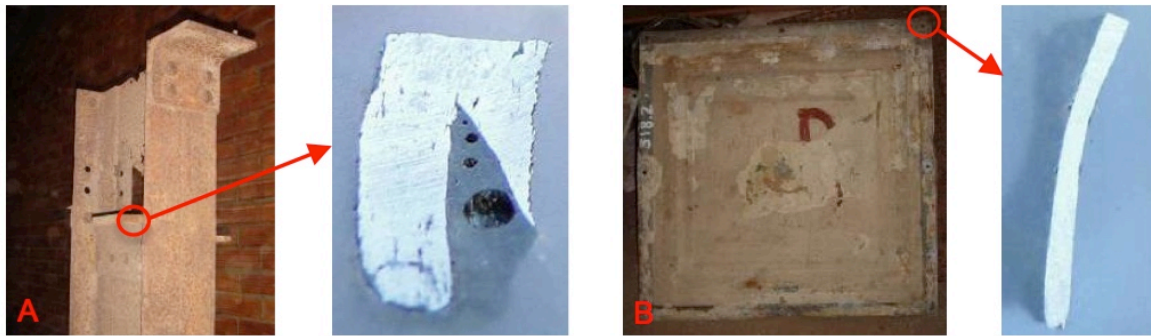


Figure 04 - Samples taken from a pillar (A) and wall sheet (B).

Nine samples were collected and organized in three groups according to its architectural function in the building, described in Table 01. The first group is composed by structures, such as pillars, trusses and beams; the second is related to wall components, such as wall sheets; and the third group is the ornaments, such as ridge grids and water ducts.

Table 01 - Description of the samples according to their group, piece of sampling and type.

GROUP	SAMPLE	SAMPLING PIECE	TYPE OF SAMPLE
01 Structures	Pillar 01	Pillar n° 9.1	Metal alloy and corrosion product
	Truss 01	Truss n° 6.7.2	
	Truss 02	Truss n° 6.7.5	
	Beam 01	Beam n° 2.8.12	
	Beam 02	Beam n° 2.8.13	
02 Tiles	Wall sheet 01	Wall sheet n° 3.18.1	Metal alloy and paint coats
	Wall sheet 02	Wall sheet n° 3.18.2	
03 Ornaments	Ornamental grid	Ridge ornamental grid n° 4.2.1	Metal alloy and corrosion product
	Water duct	Water duct (<i>MacFarlane's</i>) n° 7.3.5	

2.2. LABORATORIAL ANALYSIS

Laboratorial analysis were held using Scanning Electron Microscopy (SEM) with EDS analysis in order to overview the metallic matrix to the corrosion products, allowing to study its morphology, thickness, cracks and other textural characteristics. Powder X-ray Diffraction Analysis (XRD) was used to determine mineralogical composition of the samples

SEM images and EDS analysis were obtained at an accelerating voltage of 20 kV using a LEO equipment, model 1430 VP. The samples were coated with gold on EMILECH K550X auto fine coater. All equipment belongs to the Federal University of *Pará*.

The samples for SEM were built-in polyester resin for analysis in the section areas, in order to show the thickness of the analyzed materials. They were finished with the usage of sandpaper of different grain sizes (200, 400, 600 and 1200 mesh), and lubricated in velvet paper and alumina. The samples were prepared using equipment from the Laboratory of Restoration, Conservation and Rehabilitation (LACORE) in the Institute of Technology at UFPA.

The mineralogical composition of the samples was determined by Powder X-ray Diffraction Analysis (XRD), using a PANalytical X'Pert PRO MPD (PW3040/60, θ/θ) diffractometer with a ceramic X-ray tube (Cu anode, $K\alpha_1=1.540598 \text{ \AA}$), $K\beta$ Ni filter, and an X'celerator PSD (Position-Sensitive Detector). Instrumental conditions used are as follow: scan range from 5 to $100^\circ 2\theta$, tube power of 40 kV and 30 mA, step size of 0.02° , time/step of 60 s, divergence slit of $1/8^\circ$, anti scattering slit of $1/4^\circ$, mask of 10 mm, and sample spinning with a rotation time of 1.0 s. The equipment belongs to the Laboratory of Mineral Characterization (LCM), from the Institute of Geosciences at UFPA.

For the XRD analysis, micro-preparation was used, in which small amounts of the samples were powdered and placed on a Silicon (zero-background) sample holder. This type of preparation was used due to the low amount of each sample, which makes difficult the use of typical powder analysis that requires at least 2g of sample.

3. RESULTS

3.1 GENERAL CHARACTERISTICS

The nine samples analyzed showed similar results related to physical characteristics. Two distinct textures were described, following the nomenclature adopted by Palacios et al (2014) [6]: the unaltered metal and the altered metal (Figure 05).

The unaltered metal is formed by Fe as a homogeneous and solid matrix, and ferrite (α - Fe) as the main mineral phase on the diffractograms (Figure 05). The altered metal present fractured texture, formed by Fe and O, associated to the mineral phases hematite and goethite shown in XRD analysis, as products of corrosion processes.

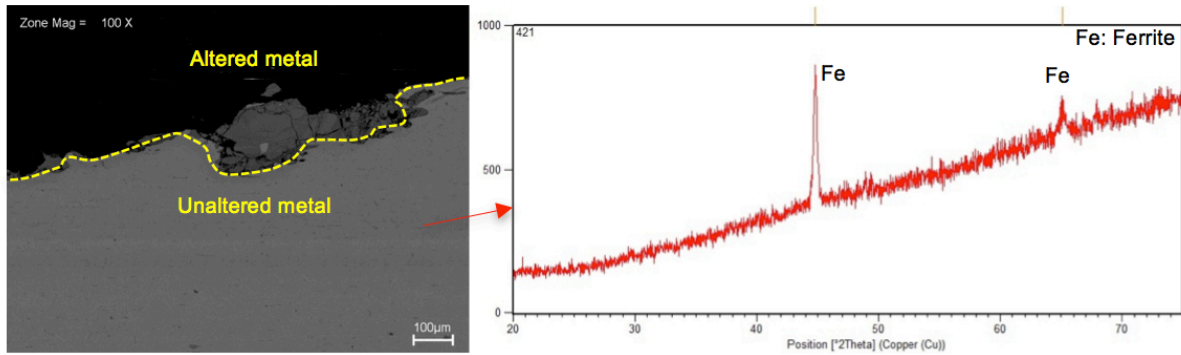


Figure 05 - Representative SEM image, indicating the altered and unaltered areas of the metal, and representative diffractogram indicating ferrite.

Despite the similarities among the samples, some differences were also found on the unaltered and altered portions. On unaltered metals, inclusions were found on the iron matrix described in five different shapes. On altered portions, the differences are related to chemical and mineralogical composition, which will be described in details as follows.

3.2 UNALTERED METAL

Five types of inclusions, also known as precipitations, are described among the groups of unaltered metal samples: circular, serpentine, elongate lamellae, elongate, and radial lamellae.

3.2.1 Group 01

a) Circular inclusions

Samples from group 01 (foundation and roof structures) presented Fe, C, and traces of Pb, in the iron matrix of pillars, trusses and beams. However, the samples presented three different types of precipitations. In pillar samples, ferritic matrix with graphite nodules (circled shaped inclusions) were described, similar to the results acquired by Campos et al (2005) in samples of cast iron [7]. The nodular precipitations are a typical characteristic of nodular cast iron.

The nodules found on the matrix are not perfectly shaped (Figure 06), presenting some deformation, and also line-shaped formation, that may indicate uniaxial tension of the pillar [8], when the building was still assembled. The inclusions presented no trace elements and the same composition as the iron matrix.

Also, it was possible to notice areas of corrosion products among the unaltered portion of the sample (Figure 06). This is possibly due to level of degradation of the pillars, and also the lack of paint coat to protect the metal piece.

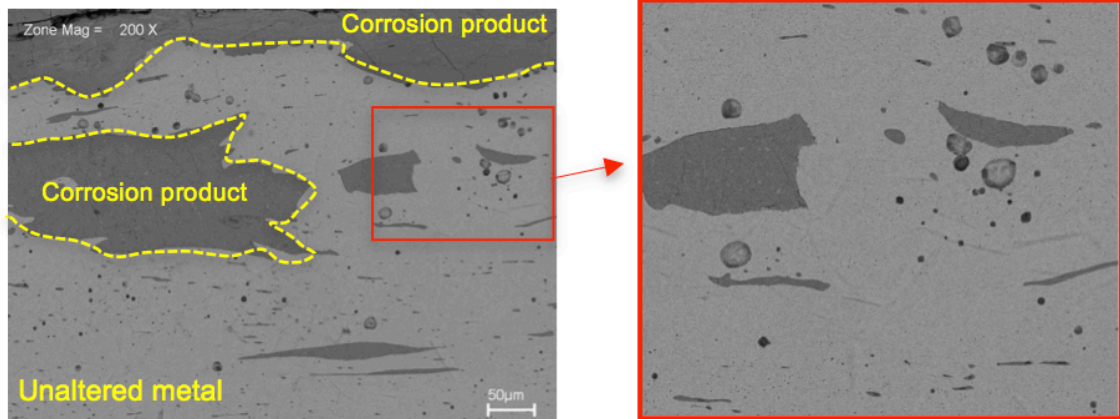


Figure 06 - SEM image from pillar sample (n° 9.1), which present circular inclusions and areas of corrosion products, and magnified image of inclusions.

b) Serpentine inclusions

Truss samples also exhibit nodules, however, serpentine shaped inclusions were as well described. The nodules are likewise deformed, as observed on pillar samples, and the serpentine shaped are possibly related to slag inclusions, similar to the samples of an ancient iron an anchor described by Aronson et al (2013), and in the Capitol Dome by McCowana et al (2011) [9,10] (Figure 7). The chemical composition of the nodular inclusions showed similarities concerning the presence of Fe and Pb, however, it also presented Cl.

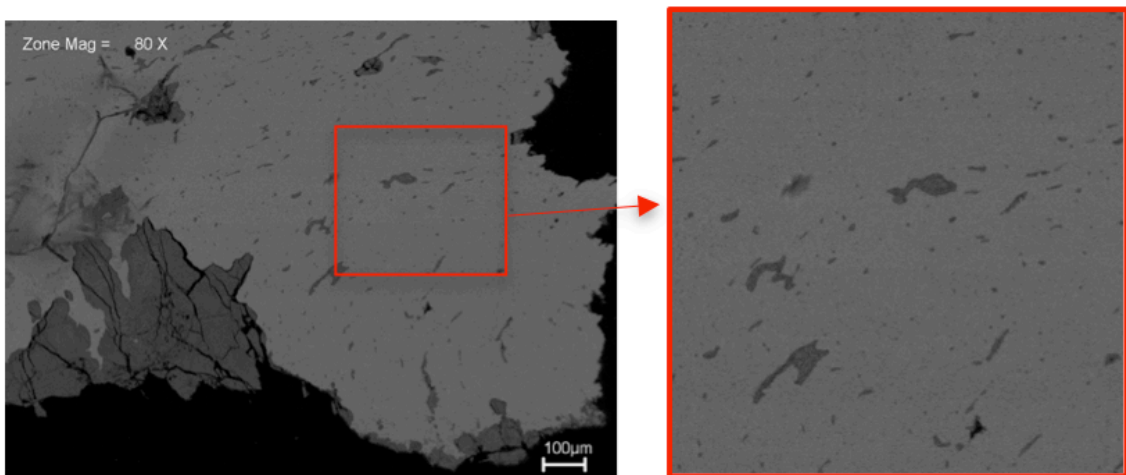


Figure 07: SEM image from truss sample (n° 6.7.5), which present serpentine inclusions.

c) Elongated lamellae inclusions

In all samples from beams, elongate lamellae were presented. The lamellae do not have a pattern, as they are randomly organized in micro-cracks, also a typical characteristic of gray cast iron [11] (Figure 08). The precipitations are formed mainly by Fe and C, presenting traces of Mg, Al, Si, P, S, Mn and Cu.

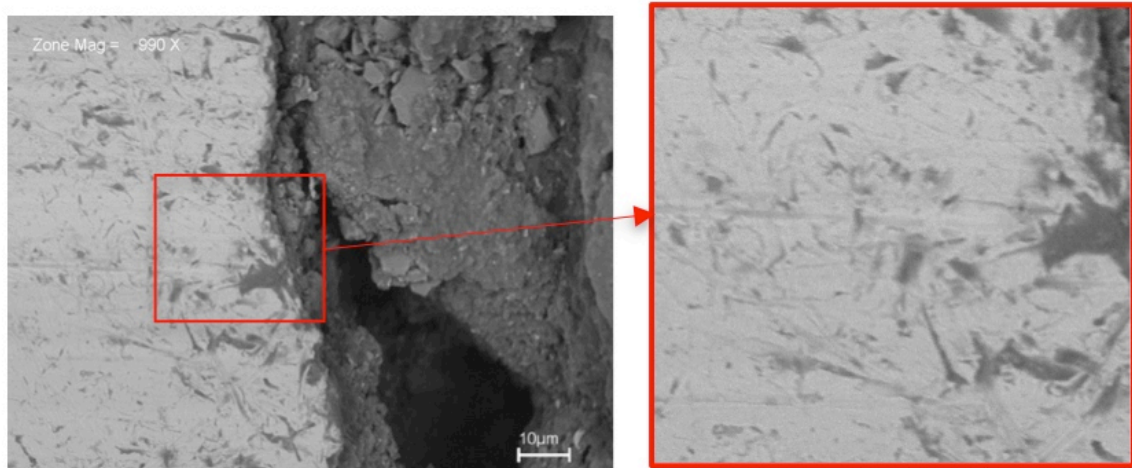


Figure 08: SEM image from beam sample (n^o2.8.13), which present elongate lamellae inclusions.

3.2.2 Group 02

a) Elongated inclusions

Samples from group 02 (tiles) presented only elongate shaped inclusions in the matrix, possibly related to slag or graphite formation, whose orientation is due to the manufacturing process of the wall tiles [4] (Figure 09). The samples from this group were the only that did not exhibited corrosion products among the unaltered area, possibly due to the presence of protective paint coats.

The iron matrix of the wall tiles is mainly composed by Fe, with traces of C, Mg, Al, Si, P, Mn, Cu and Pb.

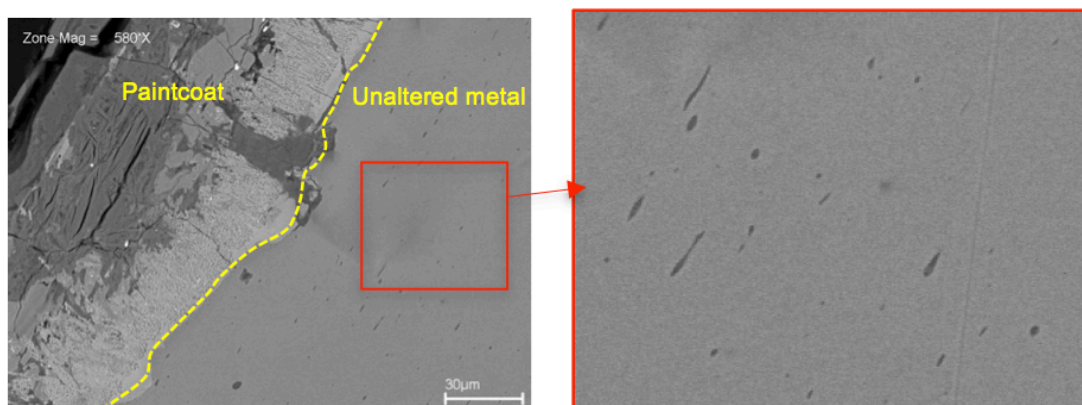


Figure 09 - SEM image from wall sheet sample (n^o 3.18.2), which present elongated shaped inclusions, and the presence of paint coats.

3.2.3 Group 03

a) Slag filaments

Samples of ornamental grids from group 03 (ornaments) did not present any type of inclusions (Figure 10), only formation of filaments or diverse shapes. This kind of formation is probably related to oriented slag formation, revealing the deformation direction used in shaping the bulk material, common in wrought iron [12]. The samples matrix is constituted by Fe, C and Si.

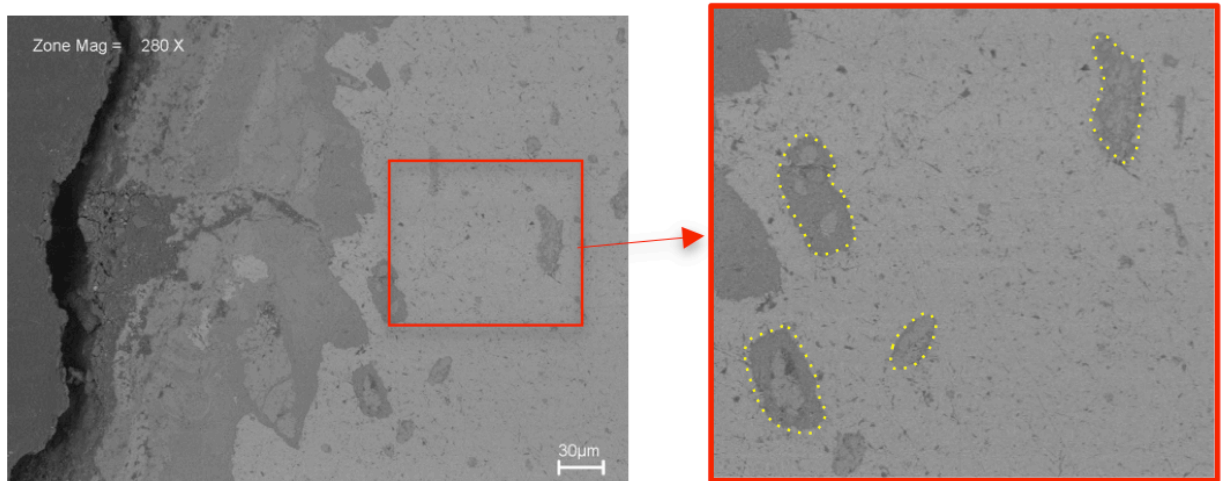


Figure 10 - SEM image from ornamental grid (n° 4.2.1), indicating lack of inclusions and formation of slag, marked in yellow.

b) Radial lamellae inclusions

The samples from the water duct presented lamellae inclusions dispersed into ferrous matrix (Figure 11), also described in Moonesan et al (2012) and Gil et al (2003) [13, 14]. It is represented by a nearly spherical shape, characteristic of the eutectic solidification [15], typical of gray cast iron. The inclusions are mainly formed by carbon, and the matrix formed by Fe and Al. XRD analysis confirmed the presence of ferrite and graphite.

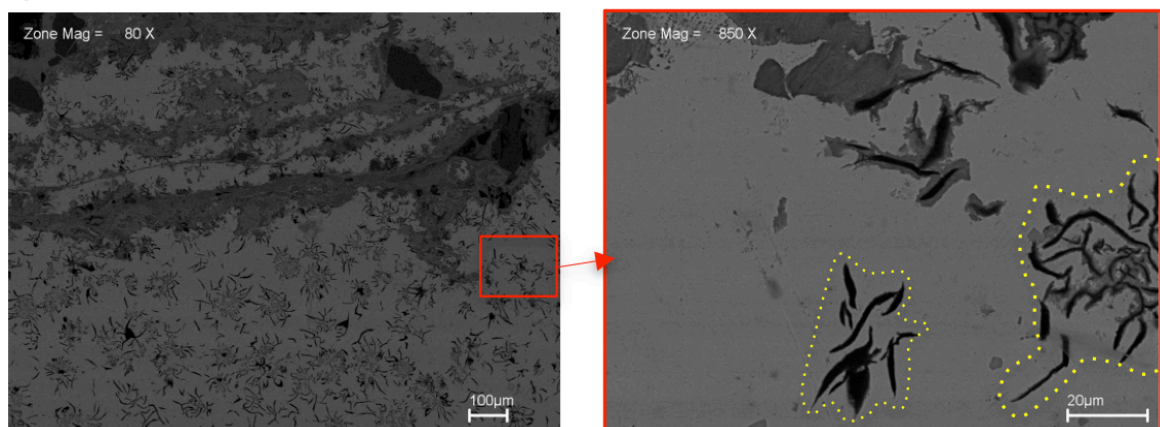


Figure 11 - SEM image from water duct sample (n°. 7.3.5), presenting radial lamellae inclusions.

In summary, the disassembled *chalet* contains six types of metal alloys related to the three groups described before. In Table 02 the samples are described according to its group, use in the building, inclusions, chemical composition, mineralogical composition and type of alloy.

Table 02 - Description of the samples according to its group, use, and its physical, chemical and mineralogical composition.

GROUPS (Sampling)	USE ON THE BUILDING	INCLUSIONS	CHEMISTRY (Inclusions)	MINERALS (Matrix)	TYPE OF ALLOY
01 Structures	Pillars	Circular	No trace elements	Ferrite	Nodular cast iron
	Trusses	Circular and Serpentine	Fe, Pb, Cl	Ferrite	Nodular cast iron
	Beams	Elongated lamellae	Mg, Al, Si, P, S, Mn and Cu	Ferrite	Type A cast iron
02 Tiles	Wall sheet	Elongated	No trace elements	Ferrite	Type E cast iron
03 Ornaments	Ornamental grid	Slags Filaments	No trace elements	Ferrite	Wrought iron
	Water duct	Radial lamellae	Fe, C	Ferrite and graphite (inclusions)	Type B cast iron

3.3 ALTERED METAL

Two types of weathering products were found among the samples, differentiated by the amount of layers presented on its morphology. The first exhibit two layers related to grain size heterogeneity due to corrosion, and the second present a multilayer structure due to the weathering of paint coats.

The samples that exhibit two-layer morphology presents the inner layer, which is in contact with the unaltered metal, as fractured and more dense. The outer layer presents porous surface and exhibits grain formation, mainly composed by Si (Figure 12), as already described by Monnier et al (2010) in samples of medieval ferrous reinforcement [16].

A representative diffractogram of corrosion products is presented in Figure 12, showing goethite, lepidocrocite, quartz and magnetite. Peak shapes are broad, poorly delineated and with very low intensity, typical of low crystallinity phases, such as corrosion products.

The mineral goethite assumes a non-reactive phase, and lepidocrocite plays active role in the corrosion mechanisms [17]. Both minerals are typical in corrosion products. Magnetite

is possibly related to remnants of the unaltered metal, and quartz is a typical mineral found on historical iron alloys due to its production.

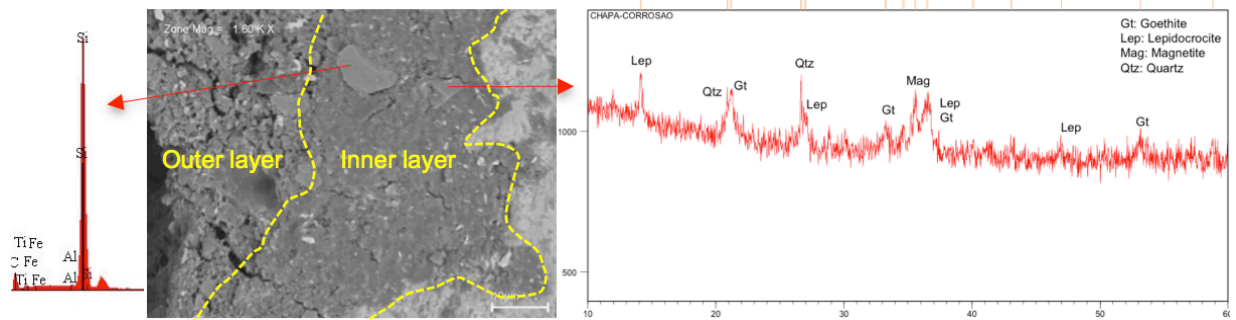


Figure 12: SEM image from corrosion sample (n° 9.1), indicating three different phases of corrosion process, and diffractogram indicating its mineralogical composition.

The second type of weathering on the samples present a multilayered morphology, common in metal alloys associated with other materials, as described by Bouchar et al (2013) in samples of medieval iron rebar [18]. The multilayered morphology is probably related to remnant paint coats, as shown in Figure 13. The corrosion layers exhibit Ba on EDS analysis, typical component found on paint coats.

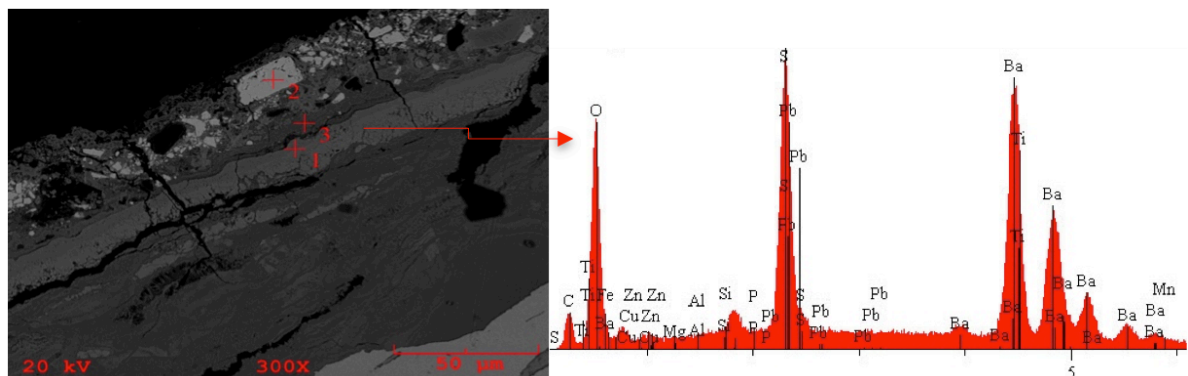


Figure 13 - Representative SEM image of samples associated with paint coat (n° 3.18.2), presenting multilayered morphology and weathering products.

3.4 PAINT COATS ASSOCIATED WITH THE METAL ALLOYS

In samples associated with paint coats, it was possible to identify two different layers between the unaltered metal and corrosion products. These layers are related to galvanization, due to the presence of major peaks of zinc in EDS analysis (Figure 14).

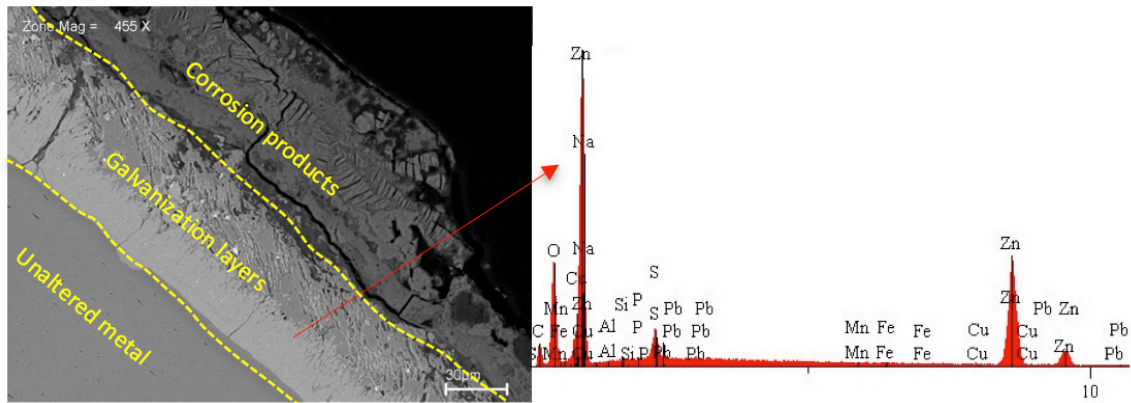


Figure 14 - Representative SEM image of samples (n° 3.18.1) associated with paint coat, presenting galvanization layer, presenting multilayered morphology.

A representative diffractogram of weathered areas with the presence of paint coats is shown in Figure 15. The main mineral phases presented are metallic zinc, zincite and hidrozoicite, as well as barite in low quantities.

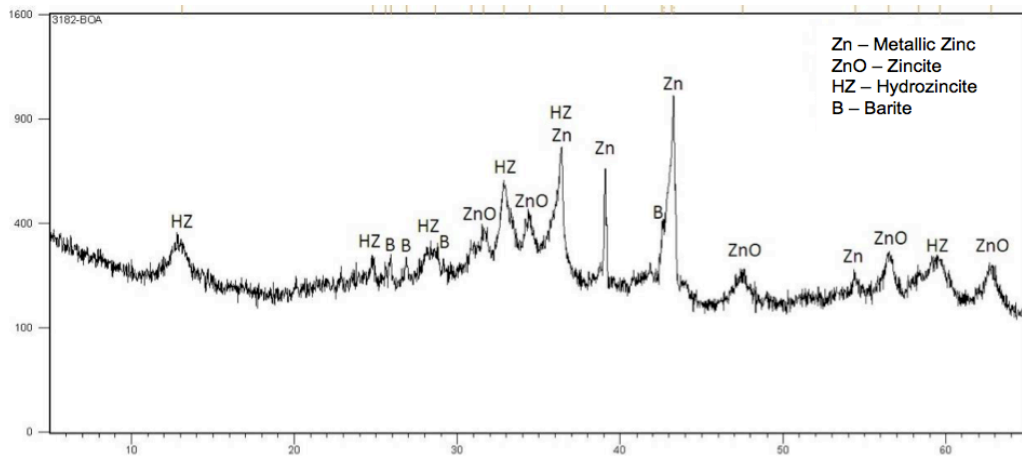


Figure 15 - Diffractogram sample of wall sheet 02 (n° 3.18.2), indicating classic corrosion process of the zinc in paint coats.

Zincite and hidrozoicite present large and poorly delineated peaks, showing low crystallinity, which represent classic corrosion products formed from metallic zinc. Metallic zinc, on the other hand, present narrow and well outlined peaks. On SEM images it is observed the presence of Zn, which possibly is related to the zincite identified in the XRD.

The minerals presented on the diffractograms show the zinc phase sequence, which is $Zn: Zn^0 \rightarrow ZnO \rightarrow Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$. Zinc is used as a sacrificed metal during the galvanization process, in order to protect the metal alloy from weathering actions. Despite the lack of conservation of the *chalet's* pieces, the paint coats still give protection, which can be confirmed by the presence of metallic zinc on XRD and SEM images.

3. DISCUSSION

3.1 METAL ALLOYS

The use of different metal alloys in the same construction is not only found in Belgium foundries. According to Palacios et al [6], the Mercado do Ver-o-Peso building, also a member of the Amazon heritage iron architecture, presents different types of metal alloys, very similar to those found in the disassembled *chalet*. The Mercado do Ver-o-Peso building was imported from England in 1901 and also presents six types of metal alloys in different pieces of the building, according to their function.

The metal alloys presented in the two building are alike, implying similar methods of foundry, despite the divergences in architectural characteristics and provenience. Table 03 shows the use of the different iron alloys, related to its use on the constructions.

Table 03 - Comparison between the alloys from the disassembled *chalet* and from Mercado do Ver-o-Peso building.

GROUPS (Sampling)	CHALET Belgium, 1886 (This Work)		MERCADO DO VER-O-PESO England, 1901 (Palácios et al., 2014)	
	USE ON THE BUILDING	TYPE OF ALLOY	USE ON THE BUILDING	TYPE OF ALLOY
01 Structures	Pillars	Nodular cast iron	Pillars	Nodular cast iron
	Trusses		-	-
	Beams	Type A cast iron	Beams	Nodular cast iron
02 Tiles	Wall tiles	Type E cast iron	Wall tiles	Type E cast iron
03 Ornaments	Water duct	Type B cast iron	Water duct	Type B cast iron
	Frameworks	Wrought iron	Frameworks	Wrought iron

Although both buildings may be related due to similar use of different metal alloys, it is possible to observe on SEM images the evolution of foundry methods. According to Scott (2013) [19] microstructure and composition research on alloys are also essential components in the search for authenticity and fabrication technology.

The precipitations found in samples from the *chalet* exhibit deformations, probably due to errors during foundry processes, held on the end of 1880's. For example, inclusions on structure samples are deformed and different sized. The deformation, presence of slag and lack of organization of inclusions on the iron matrix are also presented in other samples, as shown in Figure 16.

On Mercado do Ver-o-Peso samples, the organization and the size of precipitation are regular, which may indicate a process of foundry with fewer errors, fabricated during the end of 1890's and beginning of 1900's.

Besides the difference of alloys micrography due to foundry processes held in different countries and time, it is possible to observe the evolution of the English foundry (Walter MacFarlane's), since both buildings have water ducts from the same factory. The sample from the *chalet* presents fewer and unorganized precipitation, and the sample from Mercado do Ver-o-Peso show matrix containing well formed long radial shaped lamellae, as shown in Figure 16.

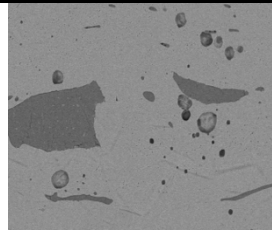
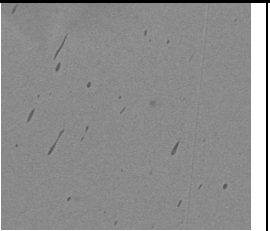
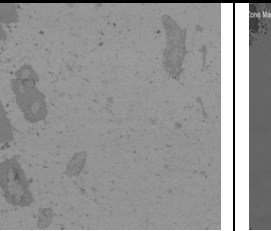
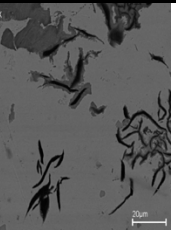
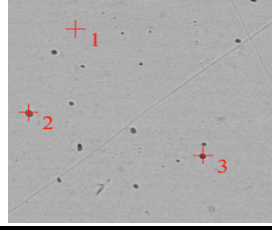
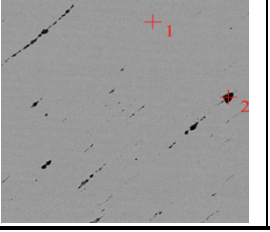
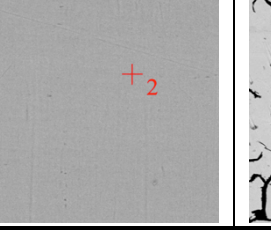
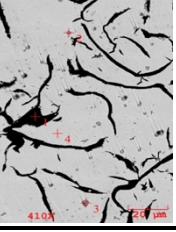
BUILDING	USE ON THE BUILDING / SAMPLES			
	STRUCTURES	WALL TILES	FRAMEWORKS	WATER DUCTS
Chalet (Belgium, 1886) (This work)				
Mercado do Ver-o-Peso (England, 1901) (Palacios et al, 2014)				

Figure 16 - Comparison between SEM images of samples from the disassembled *chalet* and the Mercado do Ver-o-Peso building.

3.2 WEATHERING PRODUCTS

The corrosion products in all samples are related to the iron matrix composition, only varying on the quantity of O, according to Table 05. However, in some samples Cl was found, which is possibly related to the iron pieces that were buried in soil during improper storage, such as the ornaments. Cl might be contained in phases of corrosion products, leading to serious problems for conservation of metallic heritage, as stated by Réguer et al (2007) in samples of heritage metallic artifacts [20].

The phases containing zincite and hydrozincite, are related to the pieces that still have paint coats, as the zinc works as metal of sacrifice. Despite the severe corrosion process, some pieces still present paint coats that preserve the metal alloy, as show previously in Figure 13.

Table 05 - Description of weathering products on the *chalet*, according to its chemical and mineralogical characteristics.

GROUPS (SAMPLING)	USE ON THE BUILDING	CHEMISTRY (MATRIX)	CHEMISTRY (CORROSION PRODUCTS)	MINERALS (CORROSION PRODUCTS)	TYPE OF CORROSION PRODUCT
01 Structures	Pillars	Fe and C Trace elements: Pb	Fe, C, and O Trace elements: P, Si, Cu, Pb.	Hematite and goethite	Oxi-hydroxide
	Trusses	Fe and C Trace elements: Pb	Fe, C, and O Trace elements: Mg, Al, Si, P, S, Mn and Cu.	Hematite and goethite	Oxi-hydroxide
	Beams	Fe and C Trace elements: O, Si, Al, Ti	Fe, C and O Trace elements: Si, Al, Ti.	Hematite and goethite	Oxi-hydroxide
02 Tiles	Tiles	Fe and C Trace elements:	Zn and O Trace elements: Fe, Pb, Cu, Mn, S, P, Si, Al, Mg, Na, C.	Zincite and hydrozincite	Weathered paint coat
03 Ornaments	Framework	Fe and C Trace elements: Al, Si, Ti	Fe and C Trace elements: Al, Si, Ti and Cl.	Hematite and goethite	Oxi-hydroxide
	Water duct	Fe and C Trace elements: O, Zn, Pb, Mn, S, P, Si, Al, Mg.	Fe, C and O Trace elements: Zn, Pb, Mn, S, P, Si, Al, Mg.	Hematite and goethite	Oxi-hydroxide

4. CONCLUSION

According to Bown et al (2009) [21], between 1860 and 1914, foundry industries were experimental, and every country developed their own techniques. However, even though each country had different techniques, some similarities were found on the methodology of construction, related to the use of different iron alloys.

As stated in the introduction, most of the literature related not only to the iron architecture, but to the historical buildings in northern Brazil as a whole, are mainly related to local reports written in Portuguese. Such historical data always referred the iron building as been made of steel or did not specify the kind of iron used. One assumes that the main contribution of this research is to prove that they were made of different types of iron, related to their function in the building.

As a result of the laboratorial analysis it is possible to state that the Belgium *chalets* are buildings of advanced construction technology for that time, due to the correlation of different types of metal alloys and the piece's structural function. It is possible that the same methods were applied to the other Belgium *chalets*, considering their same origin.

Due to the comparison of two buildings of different foundries and time, it is possible to initiate a broader research on the chronology of foundries of iron buildings imported to Belém during the 19th and 20th centuries, relating the origin, age, and different kinds of iron alloys.

ACKNOWLEDGMENTS

To DPHAC and UFPA, for allowing the sampling for this research; to LabMEV, from the Geoscience Institute at UFPA, for the SEM/EDS analysis; to CNPq for a PhD scholarship for the first author, besides financial support for this research.

REFERENCES

- [1] LEMOINE, Bertrand. *L'Architecture du Fer – France XIX siècle*. France: Édition Champ Vallon, 1986.
- [2] SILVA, Geraldo Gomes da. *Arquitetura do ferro no Brasil*. São Paulo: Nobel, 1987.
- [3] D. Starley. Determining the Technological Origins of Iron and Steel. *Journal of Archeological Science* (26), 1999, 1127-1133.
- [4] P. Dillmann, D. Watkinson, E. Angelini, A. Adeiaens. Introduction: conservation versus laboratory investigation in preservation of metallic heritage artifacts. In: *Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts*. Woodhead Publishing, 2013.
- [5] Q. Collete, S. Sire, W. J. Vermes, V. J. Mesler, I. Wouters. Experimental investigations on hot-driven structural rivets in historical French and Belgian wrought-iron structures (1880s-1890s). *Construction and Building Materials* (54), 2014, 258-269.
- [6] F.O. Palacios, R.S. Angelica, T.A.B.C Sanjad. The metal alloys from the XIX century and weathering action in the Mercado de Ferro do Ver-o-Peso building, northern Brazil: Identification with the usage of laboratory analysis. *Materials Characterization* (96), 2014, 225-233.
- [7] M.F. de Campos, L.C. Rolim Lopes, P. Magina, F.C. Lee Tavares, C.T. Kuniishi, H. Goldenstein. Texture and microtexture studies in different types of cast irons. *Materials Science & Engineering A* (398), 2005, 164-170.
- [8] A. Ghahremaninezhad, K. Ravi-Chandar. Deformation and failure in nodular cast iron. *Acta Materialia* (60), 2012, 2359–2368.
- [9] A. Aronson, D. Ashkensazi, O. Barkai, Y. Kahanov. Archeometallurgical investigation of the iron anchor from the Tantura F shipwreck. *Materials Characterization* (78), 2013, 108 – 120.
- [10] C. N McCowana. T.A. Siewerta, J.D. McColskeya, K. Hildebrandb, D.L. Olsonc. United States Capitol dome: Characterization of cast and wrought materials. *Materials Characterization*, 2011, p 807-816.
- [11] L. Collini, G. Nicoletto, R. Konecná. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* (448), 2007, 529 – 539.
- [12] D. Cvikel, D. Ashkenazib, A. Sternc, Y. Kahanova. Characterization of a 12-pdr wrought-iron cannonball from the Akko 1 shipwreck. *Materials Characterization* (83), 2013, 198–211.
- [13] M. Moonesan, A. Honarbakhshraouf, F. Madah, A. Habibollahzadeh. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron. *Journal of Alloys and Compounds* (520), 2012, 226–231.
- [14] M.L.A Gil, A. Santos, M. Bethencourt, T. García, S. Fernández-Bastero, A. Velo, L. Gago-Duport. Use of X-ray and other techniques to analyze the phase transformation induced in archaeological cast iron after its stabilization by the electrolytic method. *Analytica Chimica Acta*, 2003, p 245-254.
- [15] G.L. Rivera, R.E. Boeri, J.A. Sikora. Solidification of gray cast iron. *Scripta Materialia* (50), 2004, 331-335.
- [16] J. Monnier, D. Neff, S. Reguer, P. Dillmann, L. Bellot-Gurlet, E. Leroy, E. Foy, L. Legrand, I. Guillot. A corrosion study of the ferrous medieval reinforcement of the Amiens cathedral. Phase characterization and localization by various microprobes techniques. *Corrosion Science* (52), 2010, 695-710.
- [17] J. Monnier, I. Guillot, L. Legrand, P. Dillmann. Reactivity studies of atmospheric corrosion of heritage iron artefacts. In: *Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts*. Woodhead Publishing, 2013.
- [18] M. Bouchar, E. Foy, D. Neff, P. Dillmann. The complex corrosion system of a medieval iron rebar from the Bourges' Cathedral. Characterization and reactivity studies. *Corrosion Science* (76),

2013, 361–372.

[19] D.A. Scott. The usage of metallographic and metallurgical investigation methods in the preservation of metallic heritage artifacts. In: Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts. Woodhead Publishing, 2013.

[20] S. Réguer, P. Dillmann, F. Mirambet. Buried iron archaeological artefacts: Corrosion mechanisms related to the presence of Cl-containing phases. Corrosion Science. (49) 2007, 2726–2744.

[21] M. de Bouw, I. Wouters, J. Vereecken, L. Lauricks. Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 – A complex and confusing situation resolved. Construction and Building Materials (23), 2009, 2775 – 2787.

4.3 Artigo 03: *The metal ornaments at the Soledade Cemetery: the diversity of iron alloys in mortuary architecture from XIX century in northern Brazil.*

Artigo submetido ao periódico *Journal of Archaeological Science* em 06/05/2014.

Gmail - Submission Confirmation JAS

5/6/15, 5:16 PM



Flavia Palacios <flavia.op@gmail.com>

Submission Confirmation JAS

1 message

Journal of Archaeological Science <jas@elsevier.com>
To: flavia.op@gmail.com, flaviaop@ufpa.br

Wed, May 6, 2015 at 5:05 PM

Journal of Archaeological Science
Title: THE IRON ORNAMENTS AT THE SOLEDADE CEMETERY: THE DIVERSITY OF METAL ALLOYS IN MORTUARY ARCHITECTURE FROM XIX CENTURY IN NORTHERN BRAZIL
Authors: Flavia Olegario Palacios, M.D.; Rômulo S Angélica, Dr; Thais C Sanjad, Dr
Article Type: Full Length Article

Dear Flavia,

Your submission entitled "THE IRON ORNAMENTS AT THE SOLEDADE CEMETERY: THE DIVERSITY OF METAL ALLOYS IN MORTUARY ARCHITECTURE FROM XIX CENTURY IN NORTHERN BRAZIL" has been received by Journal of Archaeological Science .

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <http://ees.elsevier.com/yjasc/>.

Your username is: flavia.op@gmail.com

If you need to retrieve password details, please go to: [http://ees.elsevier.com/yjasc/automail_query.asp](http://ees.elsevier.com/yjasc/automail_query.asp;);

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal. Please do not hesitate to contact me if you have any queries.

Kind regards,

Journal of Archaeological Science
email: jas@elsevier.com
<http://ees.elsevier.com/yjasc>

For any technical queries about using EES, please contact Elsevier Author Support at authorsupport@elsevier.com

THE IRON ORNAMENTS AT THE SOLEDADE CEMETERY: THE DIVERSITY OF METAL ALLOYS IN MORTUARY ARCHITECTURE FROM XIX CENTURY IN NORTHERN BRAZIL

Flávia Olegário Palácios *⁽¹⁾, Rômulo Simões Angélica⁽¹⁾; Thais Alessandra Bastos Caminha Sanjad ⁽²⁾

(1) Universidade Federal do Pará – LCM (Laboratório de Caracterização Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG).

(2) Universidade Federal do Pará (UFPA) – LACORE (Laboratório de Restauração, Conservação e Reabilitação) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU).

(*) Corresponding Author (flavia.op@gmail.com)

ABSTRACT

The use of iron in architecture in Belém (northern Brazil, Amazon) started approximately in the end of the 18th century, especially with the use of ornaments applied on *façades* and other parts of historical buildings. However, its use was spread over other types of monuments, such as the tombs and mausoleums at the Soledade Cemetery, a monumental historical site built in 1850. The site holds 186 iron ornaments, which are not found in other city's constructions, due to its decorative diversity patterns and different origin, imported from European countries during its construction. However, these iron ornaments are in current corrosion process due to weathering action, but also by anthropogenic factors, causing loss of many parts of its ornamental unit. Restoration and conservation processes have not been held, especially due to the lack of knowledge about the metal alloys. The objective of this study is to characterize the iron alloys of the cemetery with the usage of laboratorial analysis, to subsidize future restoration processes. The results of this work exhibited diversity of micrographic textures, also chemical and mineralogical composition, not found in typical building ornaments, characterizing the Soledade Cemetery as an important site for iron architecture studies, besides famous major structures.

Keyword: architectural heritage; iron alloys; historical iron ornaments.

1. INTRODUCTION

During the 19th and 20th century, Belém, a northern Brazilian city located in the Amazon, imported a great amount of metal ornaments from European countries, such as England, France and Portugal. These ornaments were used on several buildings in the city, and usually applied on balconies, roofs, water ducts and many other *façades* parts.

The usage of metal ornaments spread over many kinds of constructions in Belém, such as houses, palaces, urban equipment, and also mortuary architecture from late 19th and 20th centuries. An example of this type of use is the Soledade Cemetery, which is one of the remaining monumental cemeteries from the 19th century in the country, and an important historical site in the city, protected by federal patrimonial institution.

The Soledade Cemetery is located in the city center, among important historical areas, such as Republic Square and Batista Campos Square (Figure 01). The mortuary site was built in 1830, and remained active only until 1860, but it is still visited on Mondays for many popular rituals. During these forty years, 464 mausoleums and tombs were built in the site, mostly imported from Portugal, but also locally manufactured. They were constructed in ornamental rocks, bricks, ceramic tiles, glass, and metals.

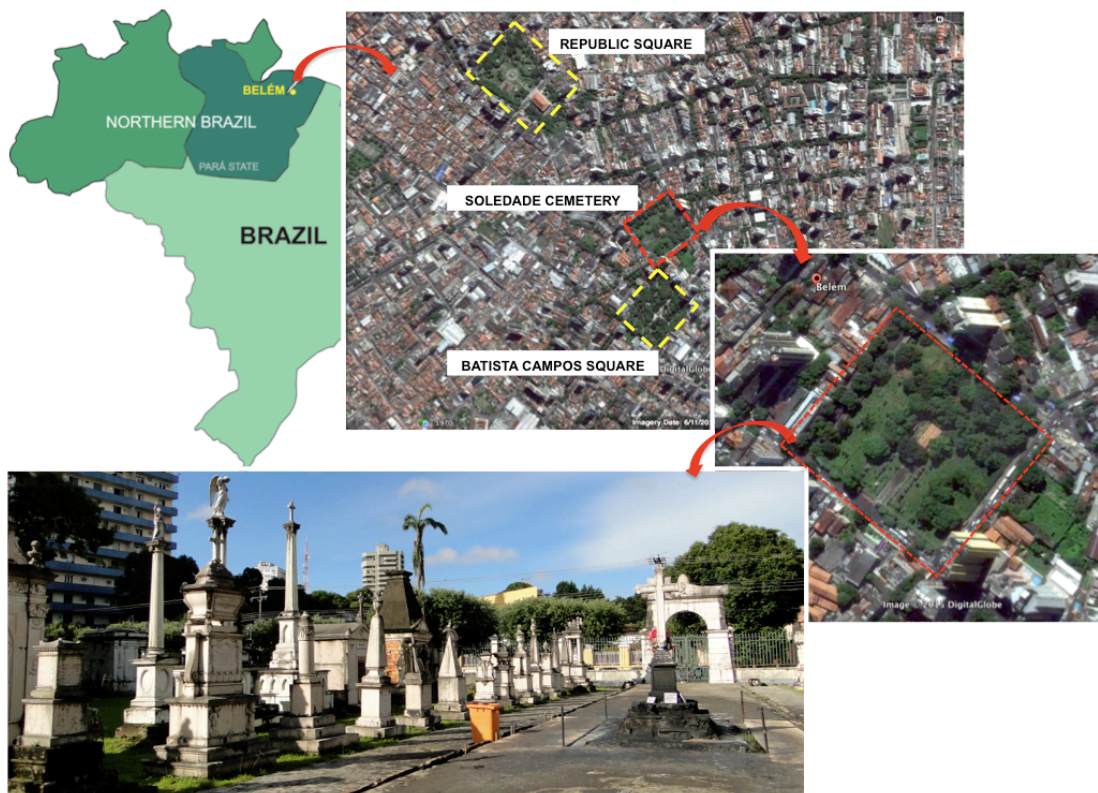


Figure 01- Localization of the Soledade Cemetery in Belém and a photograph of its main entrance, illustrating the diversity of tombs and mausoleums.

The metal ornaments were applied among 186 mausoleums and tombs in the cemetery, and present different architectural patterns. Gates, grids and plane sheets exhibit different ornamental design, built both in cast and wrought iron.

However, despite the historical and architectural importance of the Soledade Cemetery, the site has not been actively used since 1860, and has never passed through restoration processes on metal ornaments. The mausoleums and tombs are susceptible to permanent weathering, especially corrosion, and as consequence, lacunae are present in many iron ornaments (Figure 02).

Nonetheless, other kinds of weathering products are exhibited, as well as anthropogenic actions due to mortuary rituals still held in the site, such as the practice of lighting candles. The weathering and anthropogenic actions cause loss of parts, damaging the ornamental unit (Figure 02).



Figure 02 - Plane sheets from different mausoleums, which exhibit general corrosion, lacunae (A) and burned surfaces (B), due to mortuary rituals.

Many iron ornaments present bad state of conservation, exhibiting loss of ornamental features due to corrosion and anthropogenic processes. A detailed study needs to be held in order to subsidize restoration actions to return the esthetical, architectural and historical importance of the metal ornaments.

However, the iron alloys in the Soledade Cemetery are unknown, as many other applied on various buildings in the city, precluding decisions on conservation and restoration actions. According to Light (2000) [1], historical ferrous metals are poorly understood, but are critical to the knowledge of forging history and conservation.

Another difficulty is the lack of historical data on metal ornaments imported to Belém. As stated in Starley (2009) [2], architectural iron samples have the advantage of being easily

dated due to its industrial production. However, the ornaments at the Soledade Cemetery do not have this kind of information registered. Some of the mausoleums and tombs exhibit historical data on stonework (date and author), but the doubt remains on iron ornaments.

Considering the many problems on conservation of metal ornaments in Belém, the aim of this research is to identify the different types of casting and forging among the ornaments used in the cemetery, relating ancient foundry characteristics, thought laboratorial characterization, in order to subside conservation and restoration studies.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 SELECTION OF STUDY OBJECTS

Due to the great number of metal ornaments on the Soledade Cemetery, a selection was necessary to the research. The sampling was based on preservation and conservation guidelines, in which only mausoleums and tombs that presented lacunae were selected. Gates and grids were also chosen in order to represent the various types of ornament design, as many are repeated and possibly from the same origin.

Among the metal ornaments present on the cemetery, the following were chosen: 10 mausoleums; 04 grids; and 02 metal artifacts found on the site. The ornaments chosen present at least one of the two types of casting found on the cemetery, i.e. cast and wrought iron.

Considering the previous criteria, 21 (twenty-one) samples were collected: 09 (nine) cast iron; 03 (three) wrought iron; and 09 (nine) plane sheets. Table 01 shows the type of ornaments chosen for the research.

Table 01- Samples collected from the metal ornaments selected, indicating their type, name and number.

ORNAMENTS	SAMPLE NAME	Nº OF SAMPLES
CAST IRON	B26, C10, C15, C23, G27, G31, K14, L08, O7	09
WROUGHT IRON	C07, F17, K20	03
PLANE SHEETS	B34, C07, C10, C23, C30, G08, G27, K14, K20	09

The samples were named based on a work previously developed by the Brazilian National Preservation Institute, IPHAN (*Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional*), in 2009, that divided the site in areas named from A to Z, and tombs and mausoleums were named after the area and its localization (Figure 03).

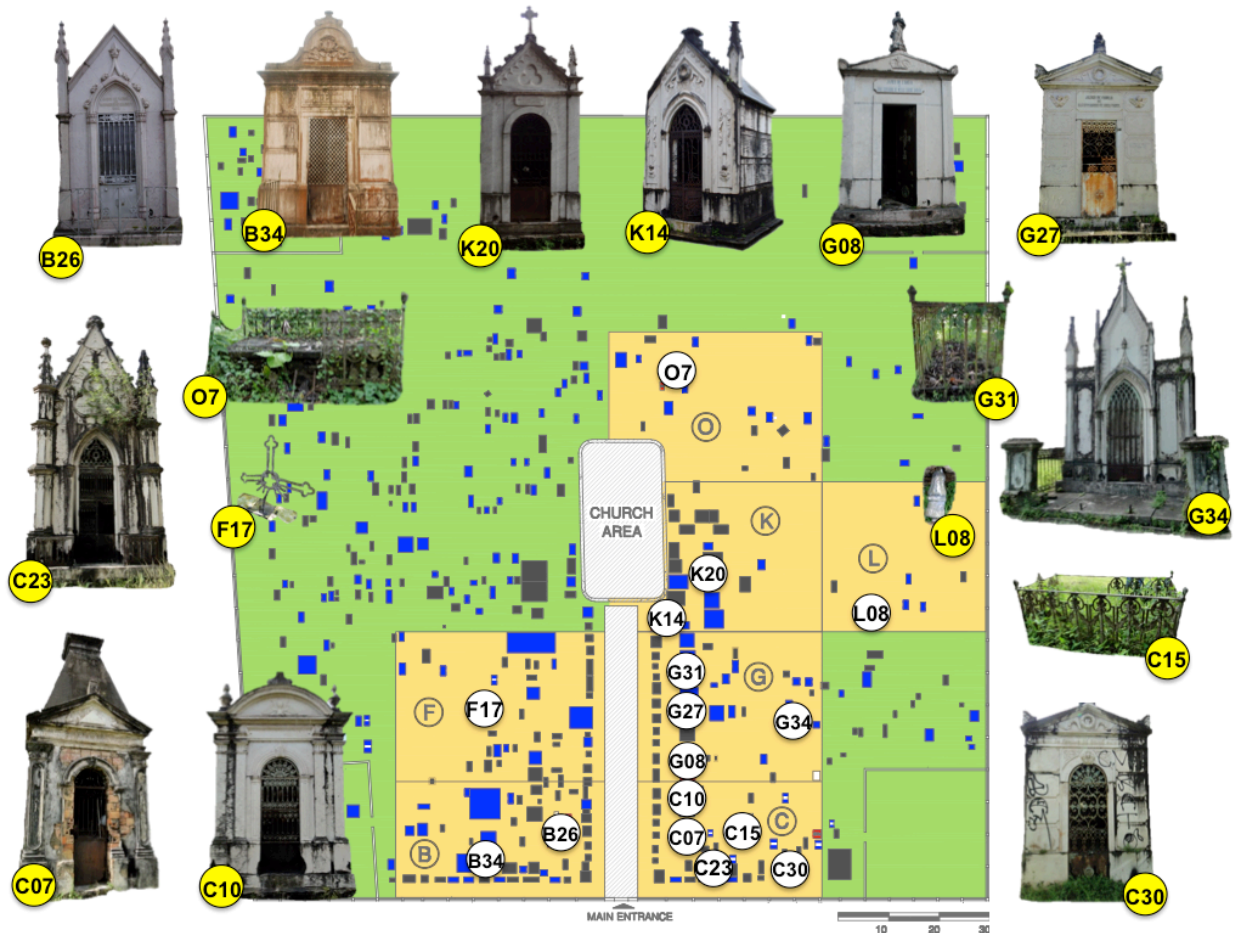


Figure 03 - Map with the localization of all mausoleums/tombs in the cemetery (gray color), with the metal ornaments featured in blue. Highlights of the areas on the cemetery where the study objects are located (yellow), their localization in the map (white numbered circles), and their respective photograph.

Among the selected ornaments, only four mausoleums gates present their possible origin, according to the name of the author and craftsman, written on stonework. The ornaments are: C10, C23, K14 and G27, from Lisbon (Portugal).

However, the authors of the mausoleums are different, in which: C10 was crafted by *José Rato*; C23 by *Rato e Filhos*, in which the craftsmen were José Ratos' sons; K14 by *J.J. Castelo*; and G27 by *A.D. Gonçalves*.

2.2 SAMPLING

Sampling was allowed by IPHAN, and carefully carried out in small areas of the ornaments, specially the areas that present lacunae (Figure 04).



Figure 04 - Examples of areas where the samples were collected, presenting lacunae.

2.3 LABORATORIAL ANALYSIS

The Scanning Electron Microscopy (SEM) images and EDS analysis were obtained at an accelerating voltage of 20 kV using a LEO equipment, model 1430 VP. The samples were coated with gold on EMILECH K550X auto fine coater. All equipment belong to the *Universidade Federal do Pará (UFPA)*.

The samples for SEM were built-in polyester resin for analysis in the section areas, in order to show the thickness of the materials analyzed. They were finished with the usage of sandpaper of different grain sizes (200, 400, 600 and 1200 mesh), and lubricated in velvet paper and alumina. The samples were prepared using equipment from the Laboratory of Restoration, Conservation and Rehabilitation (LACORE) in the Institute of Technology at UFPA.

The mineralogical composition of the samples was determined by Powder X-ray Diffraction Analysis (XRD), using a PANalytical X'Pert PRO MPD (PW3040/60, θ/θ) diffractometer with a ceramic X-ray tube (Cu anode, $K\alpha_1=1.540598 \text{ \AA}$), $K\beta$ Ni filter, and an X'celerator PSD (Position-Sensitive Detector). Instrumental conditions used are as follow: scan range from 5 to 100°, y, tube power of 40 kV and 30 mA, step size of 0.02°, time/step of 60 s, divergence slit of 1/8°, anti scattering slit of 1/4°, mask of 10 mm, and sample spinning with a rotation time of 1.0 s. The equipment belongs to the Laboratory of Mineral Characterization (LCM), from the Institute of Geosciences at UFPA.

For the XRD analysis, micro-preparation was used, in which small amounts of the samples were powdered and placed on a Silicon (zero-background) sample holder. This type of preparation was used due to the low amount of each sample, which makes difficult the use of typical powder analysis that requires at least 2g of sample.

3. RESULTS

3.1 CAST IRON ORNAMENTS

Cast iron ornaments exhibited iron matrix with disperse graphite flakes and grains of various sizes, typical characteristics of gray cast iron [3, 4, 5]. The matrix is chemically constituted mostly by Fe and Si; graphite flakes are composed mainly by C, as the lower atomic element in the matrix [6, 7]; and grains formed by Mn and S.

The presence of carbon, silicon, manganese and sulfur are expected in cast iron [8, 9], as well as grains of Mn and S [10], combined to form MnS [11]. Carbon and Silicon strongly affect the degree of graphitization in cast iron [12], and MnS grains promote the formation of microstructural development with the formation of austenite [3].

Despite its similarities, cast iron ornaments presented different pattern concerning different kinds of graphite morphology. The graphite shapes are differently organized and have various sizes, as well as variations in chemical composition were identified. These differences might be related to different foundries temperatures and addition of various elements on its composition [13].

Due to those variations, the metal ornaments were organized in four different patterns according to its microstructure characteristics. It is important to point out that the samples showed two or more types of graphite flakes and organization. For that reason, the ornaments were grouped relating to the most frequent type of microstructure type, named as A, B and E [5].

a) Type A cast iron

The samples from this group present graphite flakes randomly organized, and occupy most of the iron matrix. This type of distribution of is related to Type A cast iron [14]. Despite de lack of graphitic nuclear organization, it is possible to identify some graphite flakes in nucleation, and surrounding grains, constituted by Mn and S, according to EDS analysis (Figure 05).

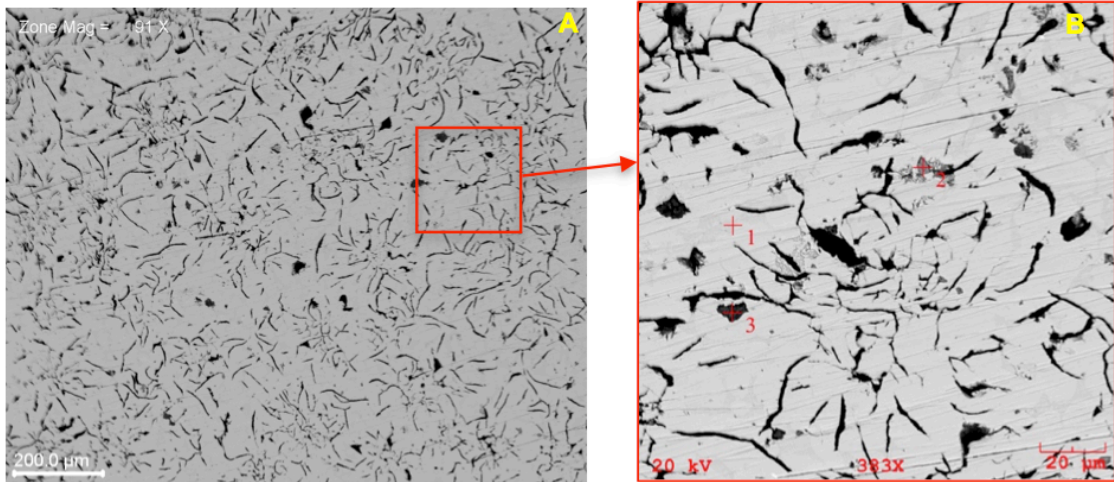


Figure 05 - SEM image from sample O7, indicating graphite flakes randomly organized (A), as well as some areas of nucleation and presence of grains (B).

However, in some samples, a large grain texture in the iron matrix is exhibited, as show in Figure 06. The matrix is formed by grains of different shapes and shades of gray, which the lighter gray has Fe and Si composition, and the darker gray present Fe and P. The presence of phosphorus is probably due to its segregation into areas in the melt during cast iron solidification [15, 2] (Figure 06).

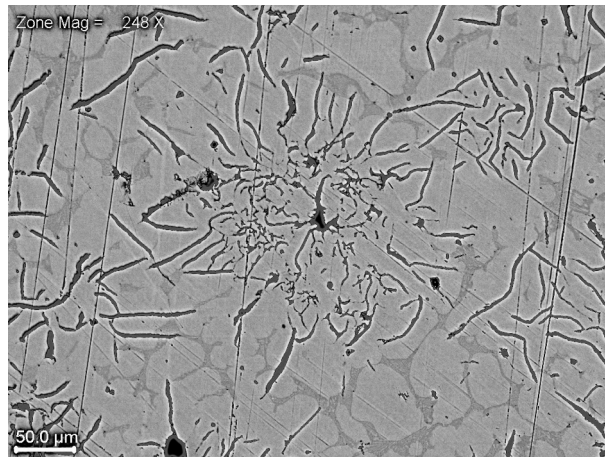


Figure 06 - SEM image from sample C15, which exhibit large grain texture on the iron matrix.

b) Type B cast iron

Type B cast iron samples exhibited on SEM image a pattern similar found by McCowana et al (2011) and Palacios et al (2014) [17,16], typical of gray cast iron used on ornaments in historical metal buildings. It presents graphite flakes organized as lamellae, indicating nucleation, as show in Figure 07. The iron matrix is constituted also by Mn and P, and the lamellae are constituted by Al, Fe and C.

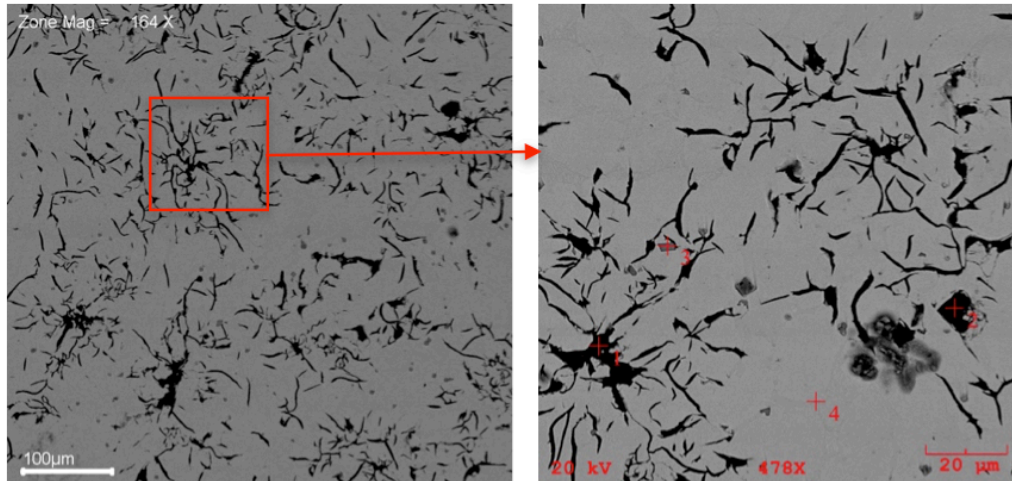


Figure 07 - SEM image from sample C10, indicating graphite flakes organized in lamellae.

However, some samples showed different sized lamellae, which are denser and does not show typical radial form. SEM images show the graphite flakes organized in nearly spherical shapes and uniform distribution (Figure 08), as already described by Fan (2014) [10], which may represent eutectic solidification of the cast iron ornament [14,18]. The lamellae are formed by Fe, C, Si, Al and Ca, and the grains also constituted of Mn, S, Al and also Ti.

Titanium is present in ornamental cast iron alloys possibly due to pig iron [19], and probably form titanium containing compounds such as titanium nitride, carbides and carbonitrides [11].

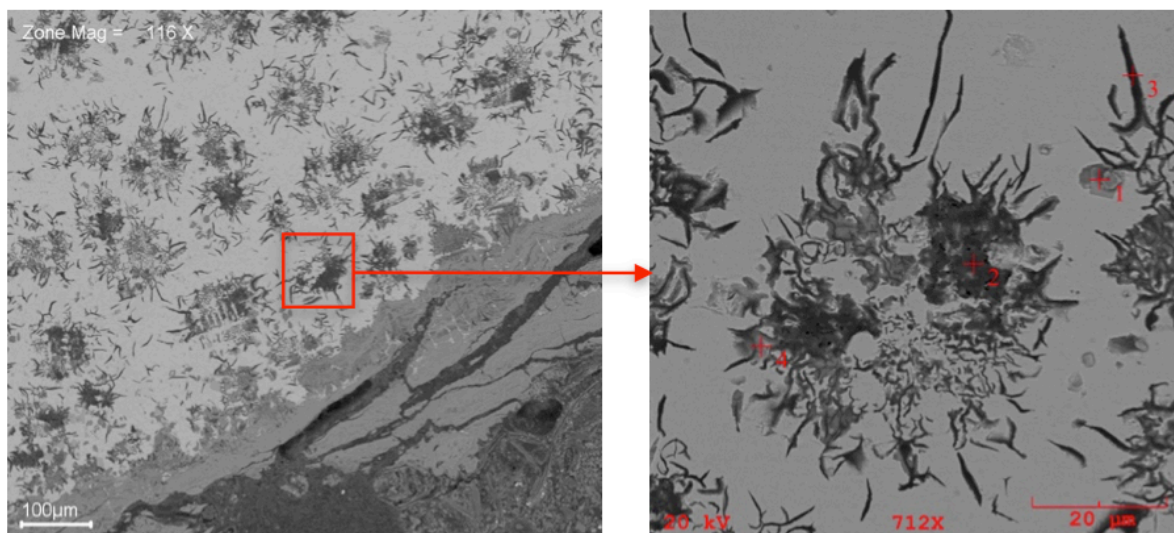


Figure 08 - SEM image from sample G27, showing graphite organized in nearly spherical shape.

c) Type D cast iron

Ornaments from this group also showed graphite flakes uniformly grouped along the matrix. However, they are no longer organized in lamellae. The graphite flakes are exhibited in groups of crossed flakes as shown in Figure 09. This type of graphite flakes organization is related to Type D cast iron [4, 20].

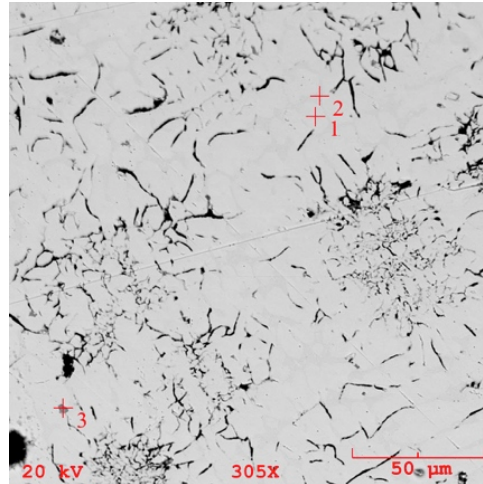


Figure 09 - SEM image from sample K14, indicating graphite flakes uniformly grouped along the matrix.

However, some differences were found among the samples concerning grain formation (Figure 10). It was possible to observe on SEM image the different shades of gray on the matrix formed by grains, as already described in samples from Type B cast iron. The lighter gray is formed by Fe and Si, and darker gray constituted also by P, as already exhibited in previous samples.

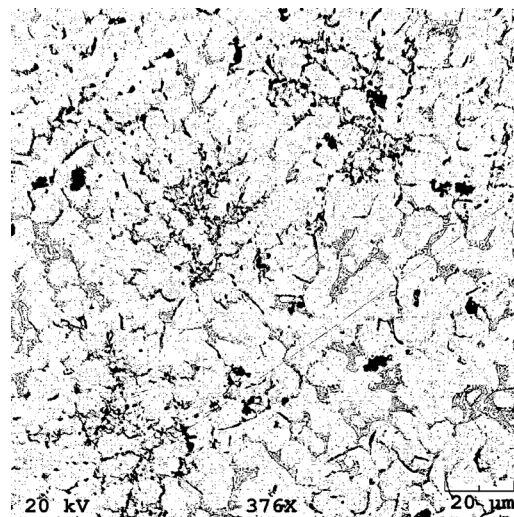


Figure 10 - SEM image from sample G31 which exhibit large grain texture on the iron matrix.

On some samples, two types of grain were observed in the matrix along with the graphite flakes (Figure 11). The first one is MnS formed grain, shown in SEM images in dark gray, and also present in several samples. The second one is lighter and formed by Fe, Ca, Mg, O and Si, chemical elements currently used in foundry processes.

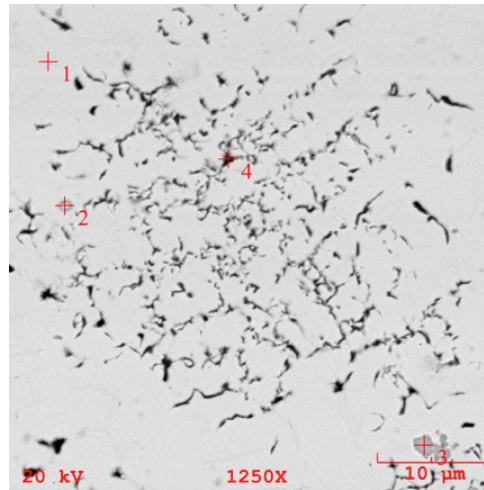


Figure 11 - SEM image from sample C23, exhibiting two types of grain in the iron matrix.

3.2 WROUGHT IRON ORNAMENTS

Wrought iron ornaments are mainly composed by Fe as major chemical component, and ferrite as the main mineral phase. However, samples presented inclusions of different shapes, probably due to slag, typical characteristic of wrought iron production [1, 17].

Many slag morphologies can be produced according to furnace structure, raw materials and many other parameters [20]. In wrought iron samples, slag formation showed 03 (three) shapes variations: 1) circular; 2) irregular; 3) traces (Figure 12).

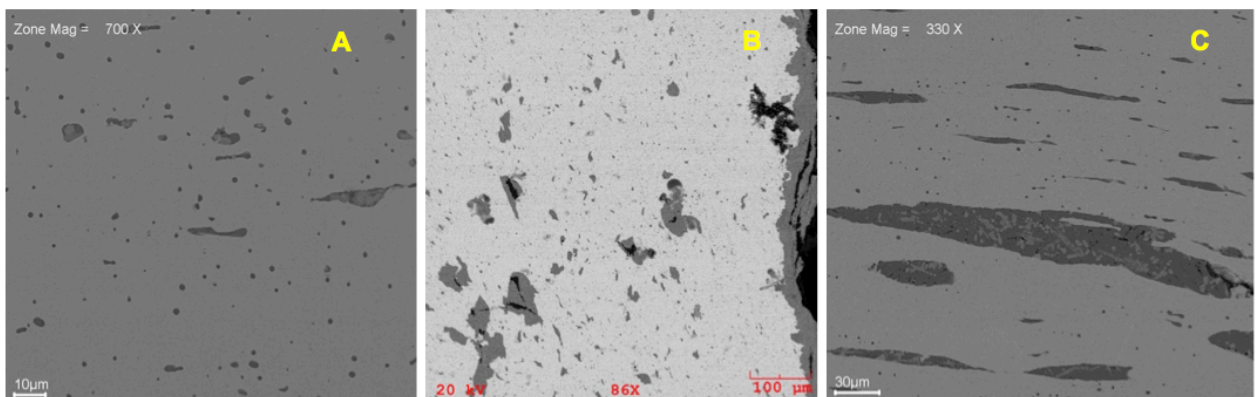


Figure 12 - SEM images from samples C07 (A), F17 (B) and K20 (C), presenting different slag inclusions.

Circular and irregular shaped inclusions present the same composition as the matrix. However, traces inclusions exhibited different inner morphology and composition, which present double phase inclusions, shown in SEM as two different shades of gray (Figure 13), similar to micrograph images of ancient alloys described by Liu (2014) and McCowana (2011) [21,17]. Darker gray grains are formed by Fe, Mn, S, P, Si and O, and lighter grains are composed of Fe, Mn, S, P, Si and Ca.

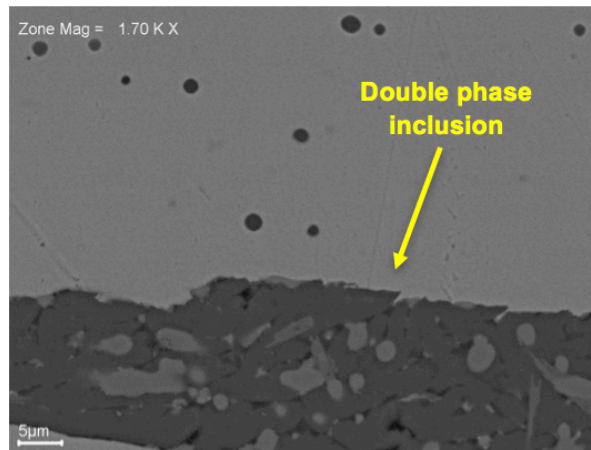


Figure 13 - SEM image from sample K20, exhibiting two phased inclusions.

3.3 PLANE SHEETS

Plane sheets ornaments are also mainly constituted by Fe as major chemical component, and ferrite as the main mineral phase, as well as also exhibited three different patterns of slag inclusions along the iron matrix, which are: 1) circular shaped inclusions; 2) double phased inclusions; and 3) no inclusions.

During smiting process of plane sheets, slag formation does not show the same patterns and chemical composition, due do rudimentary processes and many other operating parameters [20, 22], which may be the case of the plane sheets on different mausoleums.

a) Circular inclusions

Some ornaments showed circular shaped inclusions along the matrix, as well as slag inclusions (Figure 14). Circular inclusions are normally related to nodular cast iron, used for structural purposes on architectural structures [7, 16], and possibly not current on ornamental use, due to its characteristics.

On the other hand, slag inclusions, cracks and air nodules are current on ancient iron specimens [20, 22] and exhibited on this group of ornaments, which are constituted by Ca, P and Mn.

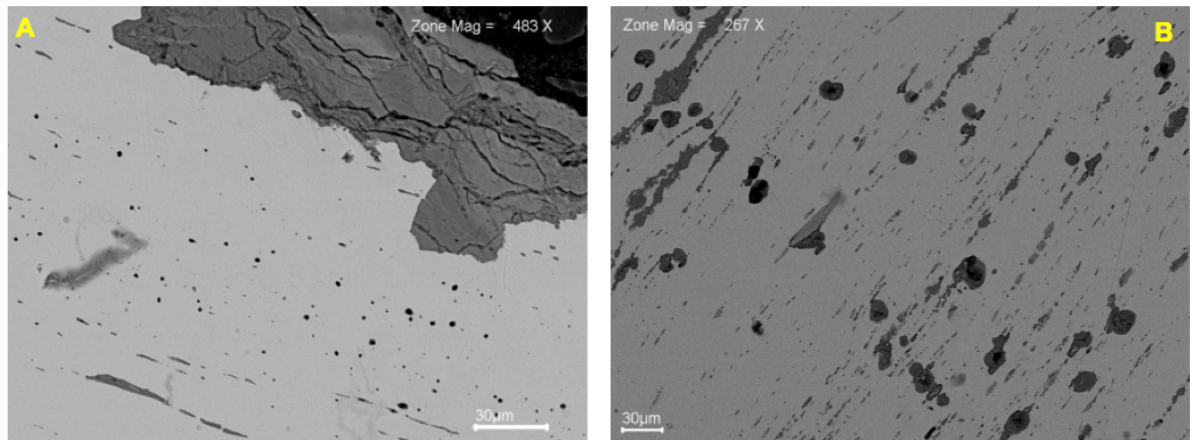


Figure 14 - SEM image from samples G08 (A) and G27 (B), indicating circular shaped inclusions

b) Double phase inclusions

Several ornaments presented matrix containing irregular doubled phase slag inclusions, normally found in ancient specimens of iron alloys [17, 21, 23] (Figure 15). The slag inclusions present chemical elements such as Ca, P, and Mn, typical elements in foundry processes.

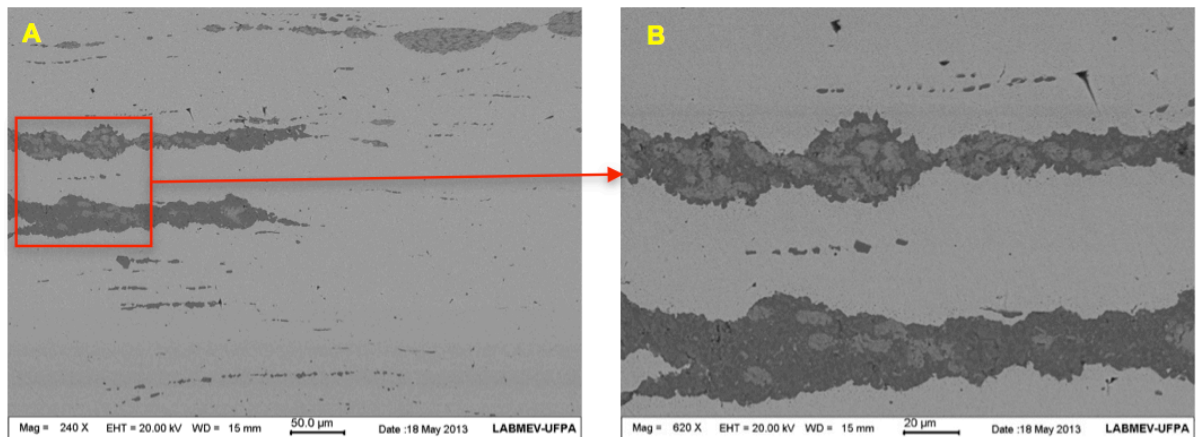


Figure 15 - SEM image from sample C23, showing double phase inclusions.

c) No inclusions

Some ornaments presented no inclusions along the iron matrix (Figure 16), as well as smooth and dense texture, a typical characteristic of wrought iron ornaments, described in Palacios et al (2014) and Balos (2009) [16, 23] in architectural and archeological specimens.

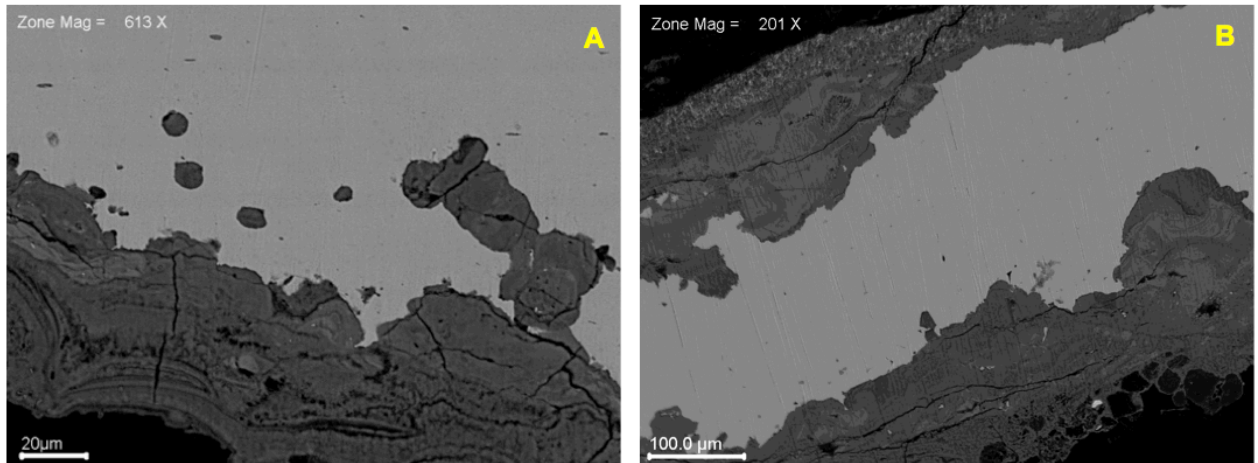


Figure 16 - SEM image from samples C10 (A) and B34 (B), exhibiting no inclusions on the iron matrix.

4. DISCUSSIONS

According to the results obtained in this research, it is possible to confirm the diversity of types of iron microstructure in the Soledade Cemetery. The diversity of micrographically expected on this work was mainly directed to the differences among the types of forging: cast, wrought, and plane sheets. However, many differences were exhibited among the sampling groups, which is probably due to different proveniences and various types of foundries, as they were not the same in European countries during the 19th century [24].

4.1 CAST IRON

Cast iron samples from the Soledade Cemetery presented three types of microstructure among the nine samples studied (Table 02). However, Palacios et al (2014) and McCowana (2011) [16, 17] described only Type B cast iron on ornaments used on buildings from the 19th and 20th century.

Table 02 - Cast iron samples organized according to their pattern and type of gray cast iron.

CAST IRON SAMPLES	
TYPE OF GRAY CAST IRON	SAMPLE
A	C15, O7
B	C10, G27
D	B26, C23, G31, K14, L08.

The diversity of cast iron may indicate, besides different proveniences, the lack of preoccupation in applying the best type of casting in the ornament. There was no concern in

relating, for example, forging temperature and chemical composition to the ornament duration.

Also, among cast iron samples, it was possible to observe the differentiation of foundry from the same provenience. Mausoleum C10 was produced by José Moreira Rato, from Portugal, and Mausoleum C23 was produced by his sons (*Rato e Filhos*), whom continued in mortuary design later on. C10 present Type A microstructure, and C23 exhibit Type D, which shows a preoccupation with durability of the iron ornaments, with the usage of a more durable alloy in newer ornaments.

4.2 WROUGHT IRON

Wrought iron samples exhibited differences possibly due to the iron making processes [23]. Different application of pressure during casting and many other parameters may interfere on the presence or expulsion of slag, since these types of ornaments were possibly made through the hand-made deformation of an iron bar [20].

4.3 PLANE SHEETS

Plane sheets samples presented also three types of microstructures among the nine samples analyzed, as shown in Table 03.

Table 03 - Plane sheets samples organized according to their pattern.

PLANE SHEET	
PATTERN	SAMPLE
Circular	G08, G27
Double phase	C07, C23, C30, K14, K20
No inclusions	B34, C10

Ancient plane sheets specimens are not widely studied, since it is mostly used only buildings, and not usually present on several types of iron artifacts. However, it is possibly to observe that the different types of inclusion, as well as its absence, is possibly related to the evolution of casting industry, which allowed the elimination of slag [20].

However, some disparities were found on samples from mausoleums C10 and C23, both from the same origin and lineage of production. C10 was probably casted prior to C23 (see item 4.1), but does not show any slag inclusions. The presence of slags on newer plane sheets from the same factory, may indicate the lack of preoccupation of producing plane

sheets of high quality or the standardization of its production [24], since they do not show any ornamental design and main esthetical importance.

5. CONCLUSION

According to the results of this research, the Soledade Cemetery ornaments holds up many patterns of cast, wrought and plane sheets, not found in iron architecture imported to the Amazon. Many other ornaments of metallic historical buildings exported to Belém do not exhibit this type of diversity [16], which indicate the importance of mortuary iron ornaments for historical and architectural studies.

Due to its diversity of iron alloys, produced by manual and industrial foundries, the Soledade Cemetery may be characterized as one of the most important historical sites of ancient metal ornaments in the Amazon. Through the analysis of many patterns of micrography, as well as different chemical and mineralogical composition, it is possible indicate the evolution of iron ornaments imported to Belém, which is not possible to achieve only through the study of metal buildings.

The work on the iron ornaments from the Soledade Cemetery is part of a larger research of historical iron architecture in the Amazon. Through the results of this research it is possible to subsidize conservation and restoration procedures, specially on the confection of replicas. According to Light (2000) [1], the aim of the replication of iron ornaments is to understand how it was made, and in which conditions it was produced. These characteristics are important historical and architectural information.

This work developed significant results on 19th century metallurgy imported to the Amazon. However, further steps need to be taken in order to complete this study, such as the definition of the ornaments origin using historical data along with laboratorial results.

Acknowledgments

To IPHAN, for allowing the sampling for this research; to LabMEV, from the Geoscience Institute at UFPA, for the SEM/EDS analysis; to CNPq for a PhD scholarship for the first author, besides financial support for this research.

REFERENCES

- [1] J. D. Light. Observations concerning the hand forging of wrought iron. *Materials Characterization* (45), 2000, 327 – 340.
- [2] D. Starley. Determining the Technological Origins of Iron and Steel. *Journal of Archeological Science* (26), 1999, 1127-1133.
- [3] M. Ferry, W. Xu. Microstructural and crystallographic features of ausferrite in as-cast gray iron.

Materials Characterization (53), 2004, 43–49.

- [4] W. Xu, M. Ferry, Y. Wang. The effect of ausferrite formation on the mechanical properties of gray iron. *Scripta Materialia* (51), 2004, 705–709.
- [5] L. Collini, G. Nicoletto, R. Konecná. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* (448), 2007, 529 – 539.
- [6] S. Lathabai . An SEM study of mild-to-severe wear transition in gray cast iron during dry sliding. *Scripta Materialia*, (38), 1998, 1557–1562.
- [7] M.F. de Campos, L.C. Rolim Lopes, P. Magina, F.C. Lee Tavares, C.T. Kuniوشي, H. Goldenstein. Texture and microtexture studies in different types of cast irons. *Materials Science and Engineering A* (398), 2005, 164–170.
- [8] C. Thomas, R. Hunter, R. Gordon. Internal oxidation of cast iron artifacts from an 18th-century steel cementation furnace. *Journal of Archaeological Science* (39), 2012, 2714 – 2721.
- [9] W. Xu, M. Ferry, Y. Wang. Influence of alloying elements on as-cast microstructure and strength of gray iron. *Materials Science and Engineering A* (390), 2005, 326–333.
- [10] K.L. Fan, G.Q. He, M. She, X.S. Liu, Q. Lu, Y. Yang, D.D. Tian, Y. Shen. High-temperature low cycle fatigue behavior of a gray cast iron. *Materials Characterization* (98), 2014, 37–46.
- [11] D. Zeng, Y. Zhang, J. Liu, H. He, X. Hong. Characterization of Titanium-Containing Compounds in Gray Iron. *Tsinghua science and technology*, v.13, n. 2, 2008.
- [12] P.A. Blackmore, K. Morton. Structure – property relationships in graphitic cast iron. *International Journal of Fatigue*, 1982, 149-155.
- [13] J. Radzikowska. Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures. *Materials Characterization*, 2005, 287–304 .
- [14] G.L. Rivera, R.E. Boeri, J.A. Sikora. Solidificaton of gray cast iron. *ScriptaMaterialia* (50), 2004, 331-335.
- [15] H.R. Abbasi, M. Bazdar, A. Halvae. Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* (444), 2007, 314–317
- [16] F.O. Palacios, R.S. Angelica, T.A.B.C Sanjad. The metal alloys from the XIX century and weathering action in the Mercado de Ferro do Ver-o-Peso building, northern Brazil: Identification with the usage of laboratory analysis. *Materials Characterization* (96), 2014, 225-233.
- [17] C.N. McCowana, T.A. Siewerta, J.D. McColskeya, K. Hildebrandb, D.L. Olsonc. United States Capitol dome: Characterization of cast and wrought materials. *Materials Characterization* (62), 2011, p 807-816.
- [18] G. Rivera, P.R. Calvillo, R. Boeri, Y. Houbaert, J. Sikora . Examination of the solidification macrostructure of spheroidal and flake graphite cast irons using DAAS and EBSD. *Materials Characterization* (59), 2008, 1342–1348
- [19] L. E. Samuels. The Metallography of Cast Iron Relics from the Bark Endeavour. *Metallography* (13), 1980, 345 – 355.
- [20] E. Blakelock, M. Martínón-Torres, H.A. Veldhuijzen, T. Young. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *Journal of Archaeological Science* (36), 2009, 1745–1757.
- [21] H. Liu, J. Chen, J. Mei, J. Jia, L. Shi. A view of iron and steel making technology in the Yan region during the Warring States period and the Han dynasty: scientific study of iron objects excavated from Dongheishan site, Hebei province, China. *Journal of Archaeological Science* (47), 2014, 53 – 63.
- [22] P. Dillmann, M. L’Héritier. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science* (34), 2007, 1810 – 1823.
- [23] S. Balos, A. Bencoter, A. Penseb. Roman mystery iron blades from Serbia. *Materials Characterization* (60), 2009, 271–276.
- [24] M. de Bouw, I. Wouters, J. Vereecken, L. Lauricks. Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 – A complex and confusing situation resolved. *Construction and Building Materials* (23), 2009, 2775 – 2787.

5. CONCLUSÕES

Acredita-se que esta pesquisa tenha atingido seus objetivos, vide que foi possível compreender, de forma aprofundada, os diferentes exemplares da arquitetura de ferro, e suas variações micromorfológicas, química e mineralógica, bem como seus respectivos processos de degradação. A partir dos resultados da caracterização dos edifícios / ornamentos abordados neste trabalho, notam-se quatro fatores relevantes no entendimento nos metais ferrosos históricos em Belém, identificados por meio de análises laboratoriais:

- 1) as diferentes formas de produção, identificadas nas variações microestruturais, químicas e mineralógicas, confrontando alguns aspectos históricos, e indicando a utilização de diferentes tipos de ferro de acordo com a arquitetura do edifício;
- 2) evolução dos processo de produção;
- 3) identificação de processos de intemperismo;
- 4) estabelecimento de relações temporais dos edifícios e ornamentos da arquitetura de ferro de Belém, a partir dos fatores explicados a seguir.

5.1 VARIEDADE NAS FORMAS DE PRODUÇÃO E A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE FERRO EM RELAÇÃO À ARQUITETURA

Segundo relatos históricos, os edifícios metálicos dos séculos XIX e início do XX, foram confeccionados em ferro ou aço, sem maiores especificações. Entretanto, a partir da caracterização de diferentes ligas metálicas, primeiramente do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, foram identificadas variações nas ligas de ferro, dentre fundidos, forjados e laminados.

As diferentes morfologias de ligas no Mercado de Ferro do Ver-o-Peso está relacionada a diferenciação de funções das peças nos edifícios, tais como: estruturas, vedações, telhas e ornamentos. Esta diferenciação indica um processo de fabricação evoluído, datado do início do século XX, e que leva em consideração a durabilidade e forças mecânicas das peças no edifício.

Na caracterização das ligas metálicas do chalé de ferro desmontado foi encontrada a mesma tecnologia de fundição, seguindo a diferenciação de peças segundo sua função. Entretanto, observa-se que há diferenças referentes à organização das precipitações e elementos químicos não-usuais, indicando processos de fundição mais antigos, relacionados à idade do edifício, que data de 1886.

No que tange a diferenciação, por exemplo, a utilização do ferro fundido nodular para as estruturas que sofrem grande compressão no sistema construtivo, tais como pilares, é

adequado, por ser um tipo de ferro de alta resistência. A aplicação de demais ligas, tais como tipo E para vedações é adequada por ser uma liga de maior maleabilidade e de fácil compressão; ao passo que o uso de ferro fundido do tipo B e ferros forjados nos ornamentos é usual por serem ligas de menor resistência mecânica.

Essa diferenciação de tipos de ferro apenas ocorreu nos edifícios, relacionada a produção majoritariamente industrial. Além da diferenciação, ocorrem poucos erros de produção e a pequena presença de materiais indesejados (*slags*). No entanto, apesar da semelhança de tecnologia de fundição entre os dois edifícios, relacionando micromorfologia com função arquitetônica, foram encontradas diferenças em especial de cunho textural nas ligas metálicas dos grupos de ornamentos e vedações.

Tais diferenças foram notadas também nos diversos ornamentos e chapas metálicas do Cemitério da Soledade, o mais antigo entre o elenco da pesquisa, em que não há diferenciação ou padronização de ligas por tratarem-se de ornamentos sem função, além da ornamental. As ligas aplicadas são as variações de ferro fundido cinzento, laminado e forjado.

Dessa forma, os resultados microestruturais dos ornamentos do Cemitério da Soledade indicam diversos tipos de ligas para vedações e ornamentos, não encontrados na arquitetura de ferro de edifícios de grande porte. Foram identificados diversos tipos de precipitações na matriz ferrosa das amostras, bem como falhas de fundição, indicando processos de fundição ainda mais antigos, mesclando métodos industriais e manuais.

5.2 EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO

A caracterização das ligas metálicas dos três exemplares da arquitetura de ferro indicam a evolução do processo de fundição frente à idade do edifício ou ornamento.

O processo de evolução das ligas metálicas europeias importadas para Belém é notório, em especial, nos ornamentos e chapas, que foram as amostras que mais indicaram diversidade de micromorfologia. Essa evolução do processo de fabricação é observado nos ferros fundidos, ferros forjados e ferros laminados.

Nas ligas de ferro fundido, em especial do tipo B, comum à todo o elenco da pesquisa, a evolução da produção é caracterizada, principalmente, pelo formato e organização das lamelas, a forma de nucleação da grafita e a composição química.

Nas amostras do Cemitério da Soledade, por exemplo, a nucleação das lamelas é mais disforme, ao passo que as do chalé desmontado possuem nucleação e organização das lamelas

mais próximos à formas radiais. E por fim, as inclusões nas amostras do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso exibem formato radial definido, mais compatível às ligas atuais.

Estas diferenças de organização de grafita indicam temperaturas diferenciadas de fundição, em que as mais elevadas são referentes à melhor formação de lamelas radiais, bem como de velocidade de resfriamento, nos quais as mais lentas são mais adequados.

Na Figura 29, observa-se a evolução das peças do ferro fundido cinzento do tipo B, segundo sua micrografia, de acordo com a idade do elenco da pesquisa e as características previamente discutidas.

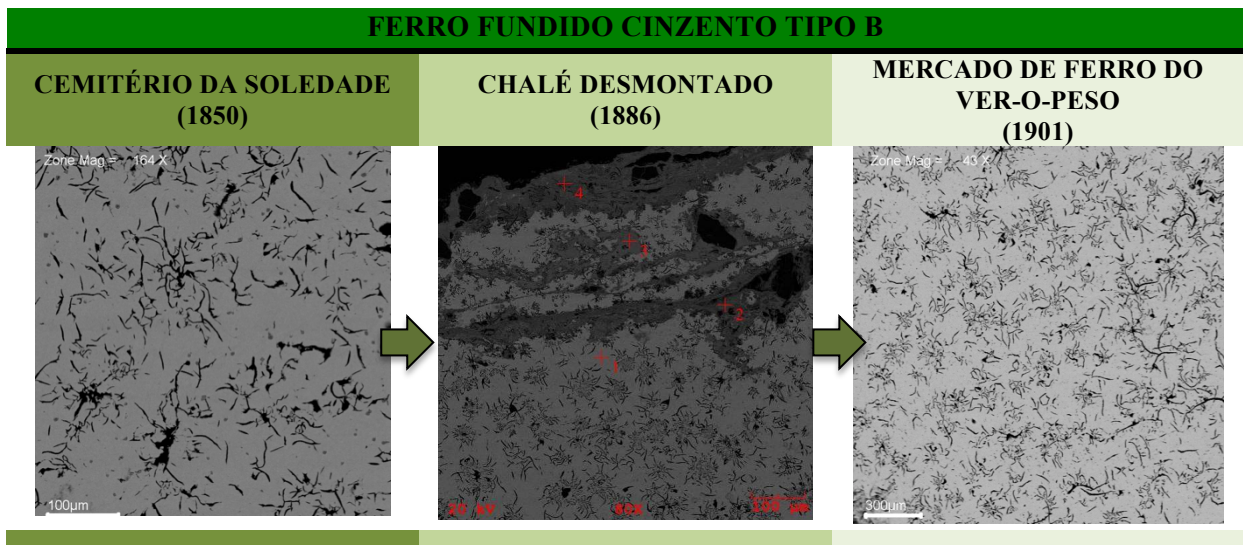


Figura 29 - Evolução das ligas de ferro Tipo B nas diferentes amostras de ornamentos nos exemplares da pesquisa.

Nas peças de ferro forjado, a principal característica de evolução das ligas é a presença de inclusões de impurezas, identificadas como *slags*. Nas amostras dos ornamentos forjados mais antigos, do Cemitério da Soledade, nota-se a presença de muitas impurezas, inclusive a formação de inclusões bifásicas (*double phase inclusions*), compostos por Fe, Mn, S, P, Si e Ca.

Por outro lado, nas amostras de ornamentos forjados do chalé desmontado há a presença de inclusões de impurezas compostas apenas por Fe, Si e C, não bifásicas. Por fim, nas peças do Mercado de Ferro do Ver-o-Peso, não há inclusões e apenas o Fe como elemento químico único.

A variação da presença de impurezas indica a evolução do processo de forja relativo à pressão e força aplicadas nas barras metálicas, que pode ser de cunho manual, indicando a presença maior de inclusões, e semi-industrial, sem a presença de inclusões. Na Figura 30 está

indicada a evolução das forjas dos edifícios e ornamentos estudados na tese, de acordo com idade e presença de inclusões.

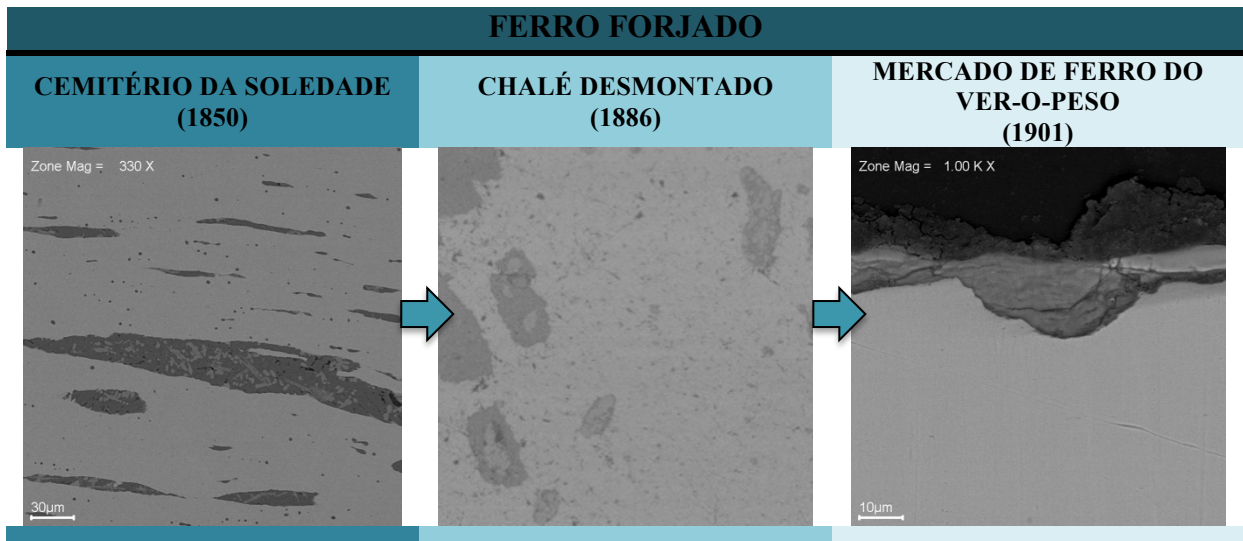


Figura 30 - Evolução das ligas de ferro forjado nos diferentes exemplares da pesquisa.

Nas chapas em ferro laminado, a característica principal de evolução das ligas também é relativa à presença de inclusões de impurezas (*slags*) identificadas nas amostras (Figura 31). Nas peças do Cemitério da Soledade é possível observar inclusões bifásica (*double phase inclusions*) compostas por Fe, Mn, S, P, Si e Ca.

No chalé desmontado e no Mercado de Ferro do Ver-o-Peso as inclusões presentes nas amostras são mais delgadas, não apresentam diferentes fases e são compostas principalmente por Al e Ca.

Assim como nas amostras ferros forjados, a presença de diversas formas de impurezas está relacionada aos diferentes processos de prensagem aplicados nas chapas, que pode ser manual, com presença de inclusões bifásicas, ou industriais, com inclusões mais delgadas (Figura 31).

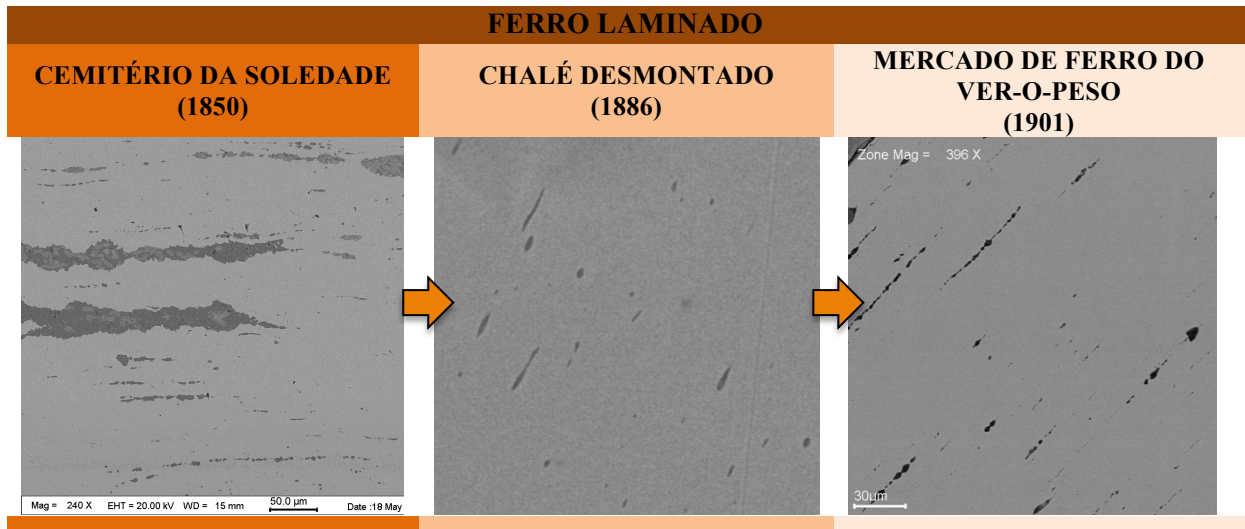


Figura 31 - Evolução das ligas de ferro laminado nos diferentes exemplares da pesquisa.

5.3 IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INTEMPERISMO

Nesta pesquisa foi possível observar duas variações de produtos de intemperismo na arquitetura de ferro na Amazônia: 1) produtos clássicos provenientes da corrosão; 2) produtos de alterações relativos aos extratos de tinta remanescentes nos edifícios e ornamentos.

Em análises ao MEV de amostras contendo produtos de corrosão, é possível observar que a camada mais próxima do metal sadio é mais concisa e menos granulada que a camada mais externa, que já sofre destacamento, perda de material e apresenta grãos desagregados (Figura 32). Segundo as análises laboratoriais, os grãos são em grande parte formados por hematita e goethita, produtos clássicos da oxidação do ferro metálico.

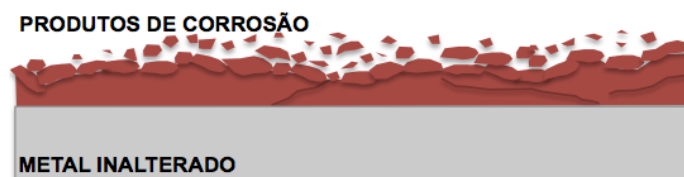


Figura 32 - Imagem esquemática representativa de produtos de corrosão.

Em relação às amostras que apresentam extratos de tinta remanescentes, ao MEV, são caracterizadas por camadas sucessivas, com texturas diferenciadas e representadas especialmente por zincita e hidrozincita (Figura 33).

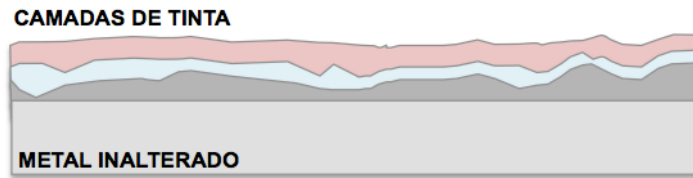


Figura 33 - Imagem esquemática representativa de produtos do intemperismo da tinta, apresentando textura em camadas.

Em alguns casos, foram notadas a formação de uma camada de produtos de corrosão entre a camada de revestimento e o metal (Figura 34). Isto indica que a tinta antiga não protege mais as peças dos edifícios. Logo, é ilusório tentar sanar os processos de corrosão na arquitetura de ferro sem a retirada das tintas históricas para o tratamento completo das peças. Por possuírem valor histórico, as tintas devem ser documentadas por meio de análises laboratoriais, para a salvaguarda da história, antes de sua remoção.

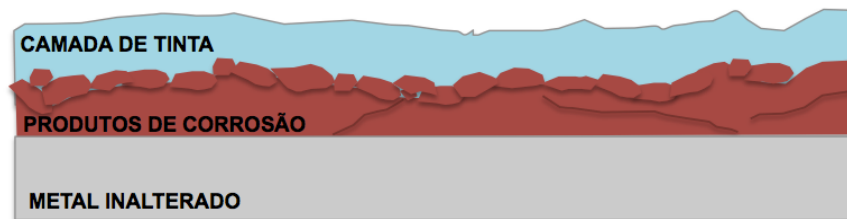


Figura 34 - Imagem esquemática indicando a presença de camada de corrosão entre o metal sem alteração intempérica e a camada de tinta.

5.4 RELAÇÕES TEMPORAIS DOS EDIFÍCIOS E ORNAMENTOS

Em função da comparação de diversas estruturas históricas de ferro por meio de análises laboratoriais e informações de pesquisas históricas anteriores (Palácios, 2011), foi possível estabelecer uma “linha do tempo” esquemática da arquitetura de ferro em Belém, entre os anos 1850 e 1909, relacionando: 1) tempo/ idade; 2) proveniência; 3) evolução das estruturas e microestruturas; 4) diferenciação de ligas; 5) durabilidade dos metais (Figura 35).

A partir do desenvolvimento da linha do tempo, pode-se observar que a Inglaterra foi a maior exportadora de edifícios metálicos para a capital paraense. A *Walter McFarlane's*, famosa pela exportação de ornamentos para Belém e muito citada em fontes históricas, não foi a única fábrica de grande notoriedade na arquitetura de ferro. Dentre os edifícios fora do âmbito desta fundição, estão o complexo da Estrada de Ferro de Bragança, Reservatório de São Brás, o Mercado de Ferro do Ver-o-Peso e os Galpões da CDP (Companhia das Docas do Pará), que são edifícios famosos no contexto belenense.

A Inglaterra foi pioneira na aplicação das estruturas em ferro na cidade. Observa-se que os demais países, tais como Bélgica e França, somente iniciaram as exportações em 1886, possivelmente em função da produção menos especializada em relação às fábricas inglesas.

A evolução exponencial das fundições inglesas é notada em especial nas tipologias arquitetônicas, em que atingiu grande complexidade estrutural. Os edifícios belgas e franceses, por exemplo, não chegaram ao porte das construções inglesas, mesmo que bem estruturados e complexos.

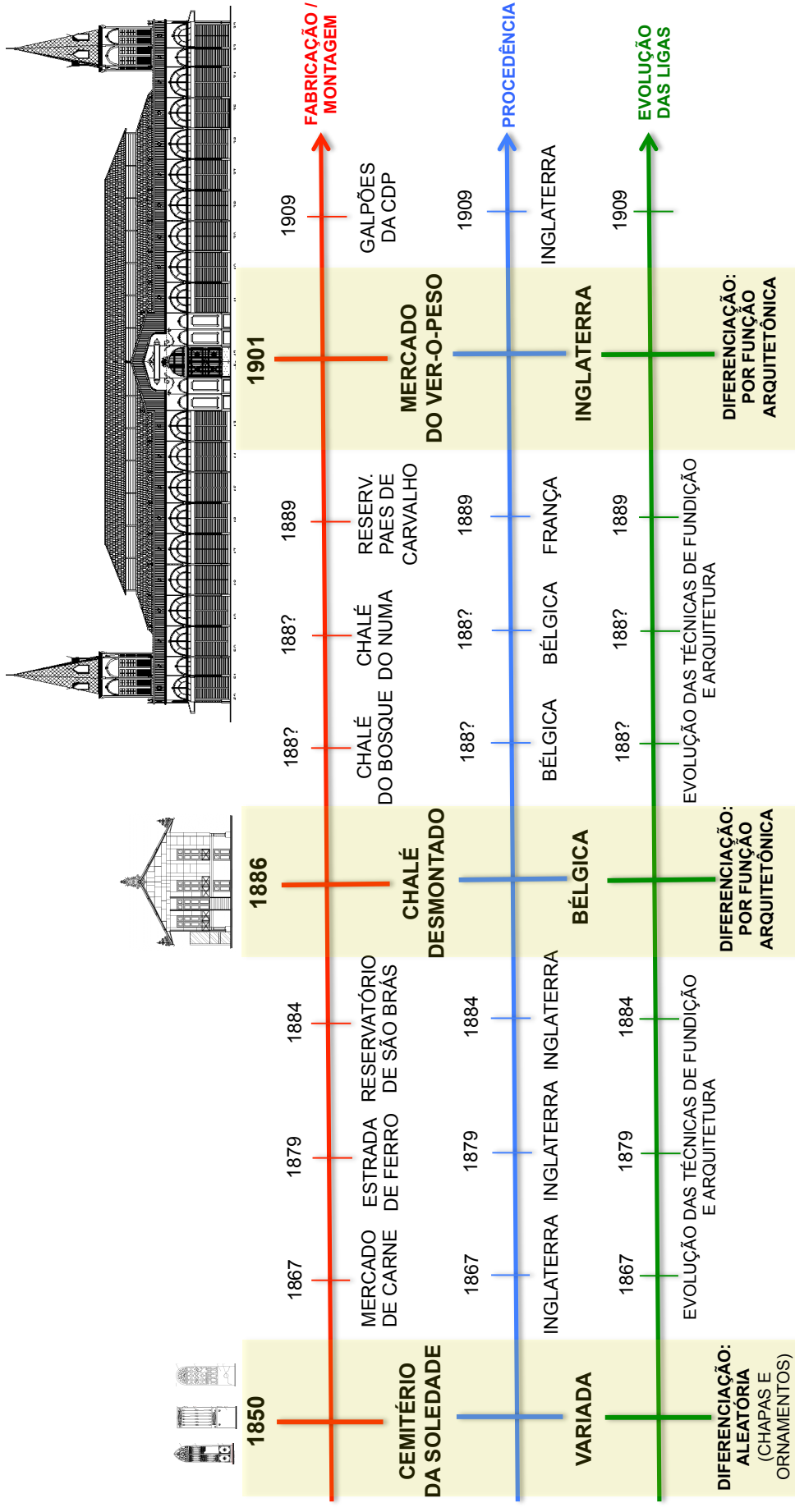


Figura 35 – Linha do tempo esquemática da arquitetura de ferro de Belém

Este trabalho é apenas o início do que pode ser denominado como uma nova linha de pesquisa voltada para a ciência dos materiais da arquitetura de ferro dos séculos XIX e XX em Belém, com o intuito de subsidiar a conservação e restauro da arquitetura de ferro, tais como nas ações limpeza, confecção de réplicas, escolha da melhor camada de tinta a ser aplicada, dentre outros. De acordo com Light (2000), o conhecimento aprofundado do material é a chave para o entendimento de sua produção, uma característica importante para a história e técnica da arquitetura.

Outra contribuição desta pesquisa é de poder servir como base de identificação para peças de ferro de função não identificada na arquitetura histórica, tais como as encontradas em sítios arqueológicos ou peças remanescentes de grandes estruturas, por meio da análise microscópica. A partir da diferenciação de peças relacionadas à função encontrada nessa pesquisa, bem como a variedade de tipos de produção, é possível determinar, por comparação, a função de peças que não tiveram suas formas identificadas por inspeção visual ou pesquisa histórica.

Apesar desta pesquisa ter gerado resultados importantes para subsidiar a conservação e restauro da arquitetura de ferro do século XIX e XX, ainda há a necessidade de investigar mais a fundo as características dos materiais desta modalidade arquitetônica, tais como determinação da procedência de elementos de origem não identificada. Muitas vezes a identificação não é possível a partir apenas de análises laboratoriais ou somente pesquisa histórica, havendo a necessidade do cruzamento de dados de diversas áreas do conhecimento, abrangendo o campo das pesquisas interdisciplinares.

Desta forma, a continuidade deste estudo visa cruzar informações históricas com análises laboratoriais, inserindo a arquitetura de ferro em temas interdisciplinares.

REFERÊNCIAS

- Abbasi H.R., Bazdar M., Halvae A. Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. **Materials Science and Engineering A**, n. 444, p. 314–317, 2007.
- Andrieux, Jean-Yves. *Les travailleurs du fer*. Paris: Gallimard, 1991.
- Aronson A., Ashkensazi D., Barkai O., Kahanov Y. Archeometallurgical investigation of the iron anchor from the Tantura F shipwreck. **Materials Characterization**, n. 78, p. 108 – 120, 2013.
- Balos S; Bencoter A; Penseb A. Roman mystery iron blades from Serbia. **Materials Characterization**, n. 60, p. 271–276, 2009.
- BENTES, Dionysio Ausier. **Mensagem apresentada ao Congresso Legislativo do Estado, em sessão solenne de abertura da 1ª reunião de sua 13ª legislatura, a 7 de Setembro de 1927, pelo Governador do Estado Dr. Dionysio Ausier Bentes, 1927**. Belém: Oficinas Graphicas do Instituto Lauro Sodré, 1927.
- Blackmore, P. A., Morton, K. Structure – property relationships in graphitic cast iron. **International Journal of Fatigue**, p. 149-155, 1982.
- Blakelock E., Martínón-Torres, M., Veldhuijzen, H. A., Young T. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. **Journal of Archaeological Science**, n. 36, p. 1745–1757, 2009.
- Bouchar M., Foy E., Neff D., Dillmann P. The complex corrosion system of a medieval iron rebar from the Bourges’ Cathedral - Characterization and reactivity studies. **Corrosion Science**, n. 76, p. 361–372, 2013.
- Bouw M. de, Wouters I., Vereecken J., Lauricks, L.; Iron and steel varieties in building industry between 1860 and 1914 – A complex and confusing situation resolved. **Construction and Building Materials**, n.23, p. 2775 – 2787, 2009.
- Campos, M.F. de, Lopes, L.C., Magina, P., Tavares F.C., Kuniوشي, C.T., Goldenstein, H. Texture and microtexture studies in different types of cast irons. **Materials Science & Engineering A**, n. 398, p. 164-170, 2005.
- Carbonara, Giovanni (org.). **Tratatto di restauro archilettonico**, v. 2. Torino: UTET, 1996.
- Carneiro, Justino Ferreira. **Relatório com que a sua Exc. o Sr. Dr. Justinho Ferreira Carneiro passou a administração da Província do Pará no dia 25 de Agosto de 1882**. Belém: Typ. do Liberal do Pará ,1882.
- Collete, Q., Sire S., Vermes W. J., Mesler V. J.; Wouters I. Experimental investigations on hot-driven structural rivets in historical French and Belgian wrought-iron structures (1880s-1890s). **Construction and Building Materials**, n. 54, p. 258-269, 2014.
- Collini L., Nicolletto G., Konecná R. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. **Materials Science and Engineering A**, n. 448, p. 529 – 539, 2007.

- Colpaert, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.
- Cvikel D., Ashkenazib D.; Sternc A.; Kahanova Y.; Characterization of a 12-pdr wrought-iron cannonball from the Akko 1 shipwreck. **Materials Characterization**, n. 83, p. 198–211, 2013.
- Derenji, Jussara da Silveira. **Arquitetura do ferro: memória e questionamento**. Belém: CEJUP, 1993.
- Dillmann P.; L'héritier M. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. **Journal of Archaeological Science**, n. 34, p. 1810 – 1823, 2007.
- Dillmann P.; Watkinson D.; Angelini E.; Adeiaens A. Introduction: conservation versus laboratory investigation in preservation of metallic heritage artifacts. In: **Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- Fan K.L., He G.Q., She M., Liu X.S., Lu Q., Yang Y., Tian D.D., Shen Y. High-temperature low cycle fatigue behavior of a gray cast iron. **Materials Characterization**, n. 98, p. 37–46, 2014.
- Ferry M., Xu W. Microstructural and crystallographic features of ausferrite in as-cast gray iron. **Materials Characterization**, n. 53, p. 43–49, 2004.
- Fontinha, Isabel Rute; Salta, Maria Manuela. **Componentes Metálicos na Construção – comportamento à corrosão e sua prevenção**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007
- Gentil, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- Gahremaninezhad A., Ravi-Chandar K. Deformation and failure in nodular cast iron. **Acta Materialia**, n. 60, p. 2359–2368, 2012 .
- Gil M.L.A., Santos A., Bethencourt M., García T., Fernández-Bastero S., Velo A., Gago-Duport L. Use of X-ray and other techniques to analyze the phase transformation induced in archaeological cast iron after its stabilization by the electrolytic method. **Analytica Chimica Acta**, n. 494, p. 245-254, 2003.
- Guesser, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blucher, 2009.
- Gideon, Sigfrido. **Espacio, tiempo y arquitectura**. Barcelona: Editorial Cientifico - Medica, 1968.
- Kuhl, Beatriz Mugayar. **Arquitetura do ferro e arquitetura ferroviária em São Paulo – reflexões sobre a sua preservação**. São Paulo: Ateliê Editorial, 1998.
- Lathabai S. An SEM study of mild-to-severe wear transition in gray cast iron during dry sliding. **Scripta Materialia**, n. 38, p. 1557–1562, 1998.

LEMOINE, Bernard. **L'Architecture du fer**. France: XIXe siècle. Paris: Champ Vallon, 1986.

Lemos, Antônio. **Relatório do Intendente do Pará**, v. 1. Belém: [s.n] 1902.

Light J. D. Observations concerning the hand forging of wrought iron. **Materials Characterization**, n. 45, p. 327 – 340, 2000.

Liu H., Chen J., Mei J., Jia J., Shi L. A view of iron and steel making technology in the Yan region during the Warring States period and the Han dynasty: scientific study of iron objects excavated from Dongheishan site, Hebei province, China. **Journal of Archaeological Science**, n. 47, p. 53 – 63, 2014.

Malcher, José Gama. **Relatório em que o Exm. Sr. Dr. Gama Malcher, 1º Vice-Presidente da Província, passou a administração da mesma ao Exm. Sr. Dr. Manoel Pinto de Souza Dantas Filho, em 27 de Abri de 1881**. Belém: Typ. do Diário de Notícias, 1881.

Maumené, M. Albert. **Maisons pour tous**, n. 4. Paris: Société Nouvelle de Publicité, 1925.

McCowana, C.N., Siewerta, T.A., Mccolskeya, J.D., Hildebrandb K., Olsonc D.L. United Stated Capitol dome: Characterization of cast and wrought materials. **Materials Characterization**, n. 62, p. 807-816, 2011.

Montagni, Claudio et al. **Materiali per il restauro e la manutenzione**. Torino: UTET, 1999.

Monnier J., Neff D., Reger S.; Dillmann P., Bellot-Gurlet L., Leroy E., Foy E., Legrand L., Guillot I. A corrosion study of the ferrous medieval reinforcement of the Amiens cathedral. Phase characterization and localization by various microprobes techniques. **Corrosion Science**, n. 52, p. 695-710, 2010.

Monnier J., Guillot I., Legrand L., Dilmann P. Reactivity studies of atmospheric corrosion of heritage iron artefacts. In: **Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

Montenegro, Augusto. **Mensagem dirigida em 7 de Setembro de 1908 ao Congresso Legislativo do Pará pelo Dr. Augusto Montenegro, Governador do Estado**. Belém: Imprensa Official do Estado do Pará, 1908.

Moonesan M., Honarbakhshraouf A., Madah F., Habibollahzadeh, A. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron. **Journal of Alloys and Compounds**, n. 520, p. 226–231, 2012.

O LIBERAL, Belém: [s.n], [198-?].

Palácios, F.O. **Estudo tecnológico do chalé da IOEPA**: subsídios para a salvaguarda da arquitetura de ferro. 2011. xiii, 247f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Salvador, 2011.

Palacios F.O., Angelica R.S., Sanjad T.A.B.C. The metal alloys from the XIX century and weathering action in the Mercado de Ferro do Ver-o-Peso building, northern Brazil: Identification with the usage of laboratory analysis. **Materials Characterization**, n. 96, p. 225-233, 2014.

- Peregrino, Umberto. **Imagens do Tocantins e da Amazônia**. Rio de Janeiro: Companhia Editora Americana, 1942.
- Pontes, Lilia Fonseca de Brito; Reis, Liana Magalhães; Duarte, Lucia Montenegro. **Chalé de ferro**. 1978. 32f. Trabalho Final de Graduação (Graduação) – Universidade Federal do Pará, 1978.
- Radzikowska J. Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures. **Materials Characterization**, p. 287–304, 2005.
- Ramanathan, Lalgudi V. **Corrosão e seu Controle**. Editora Hemus, 2007.
- Réguer S., Dillmann P.; Mirambet F. Buried iron archaeological artefacts: Corrosion mechanisms related to the presence of Cl-containing phases. **Corrosion Science**, n. 49, p. 2726–2744, 2007.
- Rivera G.L., Boeri R.E., Sikora J.A. Solidification of gray cast iron. **Scripta Materialia**, n. 50, p. 331-335, 2004.
- Rivera G., Calvillo P.R., Boeri R., Houbaert Y., Sikora J. Examination of the solidification macrostructure of spheroidal and flake graphite cast irons using DAAS and EBSD. **Materials Characterization**, n. 59, p. 1342–1348, 2008.
- Samuels, L. E. The Metallography of Cast Iron Relics from the Bark Endeavour. **Metallography**, n. 13, p. 345 – 355, 1980.
- Scott, D.A. The usage of metallographic and metallurgical investigation methods in the preservation of metallic heritage artefacts. In: **Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- Seabra, Antera V. de; Cravo, Maria do Rosário. **Casos de Corrosão de Materiais**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970
- Segurado, José Emilio dos Santos. **Elementos de Metalurgia**. Biblioteca de Instrução Profissional. Portugal: [19-?]
- Silva, Geraldo Gomes da. **Arquitetura de ferro no Brasil**. São Paulo: Nobel, 1987.
- Starley, D. Determining the Technological Origins of Iron and Steel. **Journal of Archaeological Science**, n. 26, p. 1127-1133, 1999.
- Thomas C., Hunter R., Gordon, R. Internal oxidation of cast iron artefacts from an 18th-century steel cementation furnace. **Journal of Archaeological Science**, n. 39, p. 2714 – 2721, 2012.
- Xu W., Ferry M., Wang Y. The effect of ausferrite formation on the mechanical properties of gray iron. **Scripta Materialia**, n. 51, p. 705–709, 2004.
- Xu W., Ferry M., Wang Y. Influence of alloying elements on as-cast microstructure and strength of gray iron. **Materials Science and Engineering A**, n. 390, p. 326–333, 2005.
- Zeng D., Zhang Y., Liu J., He H., Hong X. Characterization of Titanium-Containing Compounds in Gray Iron. **Tsinghua Science and Technology**, v.13, n. 2, 2008.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA



PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de **FLÁVIA OLEGÁRIO PALÁCIOS**

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **FLÁVIA OLEGÁRIO PALÁCIOS**, orientanda do Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA), composta pelos professores doutores Marcondes Lima da Costa (UFPA), Roberto de Freitas Neves (UFPA), José Carlos Cardoso Filho (UFPA), Vanda Porpino Lemos (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada **“DOS MINERAIS AOS MATERIAIS DE ARQUITETURA E PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO: EDIFÍCIOS E ORNAMENTOS METÁLICOS DOS SÉCULOS XIX E XX EM BELÉM DO PARÁ”** emite o seguinte parecer:

A candidata realizou sua apresentação de forma clara, organizada e segura no tempo hábil de 53 minutos. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma de três artigos, sendo um já publicado e os outros dois submetidos a periódicos de impacto internacional, que atendem às exigências básicas para uma tese de doutorado.

Dessa forma, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado com distinção.

Belém, 16 de junho de 2015.

Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (Orientador - UFPA)

Prof. Dra. Vanda Porpino Lemos (UFPA)

Prof. Dr. José Carlos Cardoso Filho (UFPA)

Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

Prof. Dr. Roberto de Freitas Neves (UFPA)