UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Adna Lúcia Rodrigues de Menezes

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS EXISTENTES NA USINA DE ILHA BELA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CEARÁ MIRIM/RN

Natal
2019

Adna Lúcia Rodrigues de Menezes

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS EXISTENTES NA USINA DE ILHA BELA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CEARÁ MIRIM/RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

Natal
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Menezes, Adna Lúcia Rodrigues de.
Caracterização das argamassas históricas existentes na Usina de Ilha Bela localizada no município de Ceará Mirim/RN / Adna Lúcia Rodrigues de Menezes. - 2019.
95f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.
Orientador: Dr. Kleber Cavalcanti Cabral.

1. Argamassas antigas - Dissertação. 2. Conservação - Dissertação. 3. Restauro - Dissertação. I. Cabral, Kleber Cavalcanti. II. Título.

RN/UF/BCZM CDU 624

Elaborado por Raimundo Muniz de Oliveira - CRB-15/429

Adna Lúcia Rodrigues de Menezes

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS EXISTENTES NA USINA DE ILHA BELA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CEARÁ MIRIM/RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral – Orientador

_____

Profª. Drª. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Externa ao Programa (UFRN)

_____

Profª. Drª. Erica Natasche de Medeiros Gurgel Pinto – Externa à Instituição (UFERSA)

Natal/RN, 22 de fevereiro de 2019.

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS EXISTENTES NA USINA DE ILHA BELA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE CEARÁ MIRIM/RN

Adna Lúcia Rodrigues de Menezes

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

RESUMO

Procurando manter a identidade de uma sociedade, a busca pela conservação do patrimônio cultural é fundamental. As edificações históricas são partes integrantes deste patrimônio, pois guardam evidências sobre a história construtiva da edificação, bem como métodos e materiais, o que é de suma importância para atender aos princípios de restauro desses bens. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo caracterizar as argamassas de revestimento da Usina de Ilha Bela/RN. Para tal, foi realizada visita *in loco* para observação visual e registro fotográfico da edificação, e coleta de amostras de argamassas de revestimento para posterior caracterização físico-química e mineralógica por meio de análise visual e técnicas analíticas em laboratório, FRX, DRX, TG/DTG, determinação do teor de aglomerante por ataque ácido, granulometria, absorção de água por imersão e resistência à compressão. A partir das análises constatou-se que as argamassas estudadas são ricas em cal, com aglomerante de natureza calcítica e areia de origem silicosa, como agregado, com a presença de argila. As argamassas A01, A03, A04, A05 e A06 são constituídas de cal e areia, enquanto a argamassa A02 é constituída de cal, areia e argila. Cujas relações aglomerante/agregado são: 1:3 para as amostras A01 e A04, 1:8 para as amostras A02 e A03 e 1:6 para as amostras A05 e A06. Desse modo, a partir das informações sobre as argamassas existentes é possível projetar uma argamassa de reconstituição compatível para realização da conservação desses edifícios históricos, ressaltando valores históricos e culturais, contribuindo assim para a preservação desses monumentos do estado.

Palavras-chave: Argamassas antigas. Conservação. Restauro.

CHARACTERIZATION OF EXISTING HISTORIC MORTARS IN ILHA BELA PLANT LOCATED IN THE MUNICIPALITY OF CEARÁ MIRIM / RN

Adna Lúcia Rodrigues de Menezes

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

ABSTRACT

Seeking to maintain the identity of a society, the search for conservation of cultural heritage is fundamental. The historical buildings are integral parts of this heritage, as they keep evidence of the constructive history of the building, as well as methods and materials, which is of the utmost importance to meet the principles of restoration of these assets. In this context, this work aims to characterize the lime mortars of the Ilha Bela/RN. For that, an on-site visit was carried out for visual observation and photographic registration of the building, and collection of coating mortar samples for subsequent physical-chemical and mineralogical characterization through visual analysis and laboratory analytical techniques, FRX, XRD, TG/DTG, determination of binder content by acid etching, particle size distribution, water absorption by immersion and compressive strength. From the analyzes it was verified that the studied mortars are rich in lime, with agglomerant of calcitic nature and sand of silicosa origin, as aggregate, with the presence of clay. Mortars A01, A03, A04, A05 and A06 are composed of lime and sand, while mortar A02 consists of lime, sand and clay. The agglomeration/aggregate ratios are: 1:3 for samples A01 and A04, 1:8 for samples A02 and A03 and 1:6 for samples A05 and A06. Thus, based on information on existing mortars, it is possible to design a compatible restoration mortar for the conservation of these historic buildings, highlighting historical and cultural values, thus contributing to the preservation of these state monuments.

Keywords: Old mortars. Conservation. Restoration.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre esteve do meu lado, me dando forças e coragem para alcançar todas essas conquistas.

Aos meus pais, Ana Lúcia e Alber, por todo incentivo, apoio, confiança e amor em mais uma jornada.

Ao meu irmão, Adson Bruno, por toda assistência durante esta caminhada.

Ao meu namorado, Fábio Maia, por todo carinho, paciência e palavras de estímulo.

Ao meu orientador, Kleber Cabral, por toda orientação, disponibilidade, incentivo, paciência e pelo patrocínio de equipamentos e materiais utilizados na pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil por todo conhecimento disseminado.

Aos amigos do mestrado pelo apoio e esclarecimentos que precisei nas disciplinas e desenvolvimento da pesquisa.

Ao LABCIM, pela disponibilização da estrutura laboratorial e ensaios.

A toda estrutura laboratorial disponibilizada pela UFRN.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

Introdução 1

1.1 Objetivos da pesquisa 3
1.1.1 Objetivo geral 3
1.1.2 Objetivos Específicos 3

CAPÍTULO 2 4

Fundamentação Teórica 4

2.1 Contexto histórico geral da região açucareira 4
2.1.1 Construções antigas da região açucareira do Rio Grande do Norte 4
2.1.1.1 Usina Ilha Bela 7
2.2 Argamassa histórica 10
2.2.1 Definição e constituição de argamassa histórica 10
2.2.2 Caracterização das argamassas históricas 11
2.2.3 Técnicas de Caracterização das argamassas históricas 12
2.2.3.1 Difração de raio X (DRX) 13
2.2.3.2 Fluorescência de raio X (FRX) 13
2.2.3.3 Espectroscopia no Infravermelho por refletância total atenuada (ATR-IR) 14
2.2.3.4 Análises Térmicas (TG/DTA) 14
2.2.3.5 Microscopia Óptica (MO) 15
2.2.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS (MEV-EDS) 15
2.2.3.7 Teor de aglomerante por ataque ácido 15
2.2.3.8 Análise Granulométrica 16
2.2.3.9 Resistência à compressão 16
2.2.3.10 Absorção de água por imersão 16
2.3 Histórico de caracterização de argamassas históricas 17

CAPÍTULO 3 23

Metodologia da pesquisa 23

3.1 Análise do estado de conservação da Usina de Ilha Bela 24
3.2 Caracterização das argamassas históricas da Usina de Ilha Bela 26
3.2.1 Coleta das amostras 27
3.2.2 Preparação das amostras para análise 28
3.2.3 Técnicas de Caracterização 29
3.2.3.1 Fluorescência de raios X (FRX) 29
3.2.3.2 Difração de raios X (DRX) 29
3.2.3.3 Análise termogravimétrica (ATG) 30
3.2.3.4 Teor de aglomerante 30
3.2.3.5 Análise granulométrica após o ataque ácido 33
3.2.3.6 Absorção de água por imersão 35
3.2.3.7 Resistência à compressão 36

CAPÍTULO 4 41

Apresentação e análise dos resultados 41
4.1 Caracterização das argamassas da Usina Ilha Bela 41
4.1.1 Análise visual das amostras 41
4.1.2 Fluorescência de raios-X 45
4.1.3 Difração de raios-X 47
4.1.4 Análise Termogravimétrica 50
4.1.5 Teor de aglomerante e agregado 58
4.1.6 Análise granulométrica 61
4.1.7 Absorção de água por imersão 63
4.1.8 Resistência à compressão 67
CAPÍTULO 5 72
Conclusões 72
Referências Bibliográficas 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa adaptado do litoral oriental do RN..... 5
Figura 2.2 – Paisagem da Usina Ilha Bela..... 8
Figura 2.3 – Fábrica da Usina Ilha Bela..... 9
Figura 2.4 – Balança da Usina Ilha Bela..... 9
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa..... 23
Figura 3.2 – Usina Ilha Bela..... 24
Figura 3.3 – Prédio administrativo da Usina Ilha Bela..... 25
Figura 3.4 – Fábrica da Usina Ilha Bela..... 25
Figura 3.5 – Balança da Usina Ilha Bela..... 26
Figura 3.6 – a) Amostras na estufa e b) Amostra após 24h em estufa..... 31
Figura 3.7 – a) Amostra com ácido clorídrico e b) Amostra com ácido clorídrico após repouso por 24hs..... 32
Figura 3.8 – Drenagem da solução ácida..... 32
Figura 3.9 – a) Amostras drenadas após 24h em estufa e b) Pesagem do filtro drenante mais a amostra..... 32
Figura 3.10 – a) Procedimento da Análise granulométrica e b) Amostra no conjunto de peneiras..... 34
Figura 3.11 – Amostras para ensaio de absorção de água..... 35
Figura 3.12 – Amostras em imersão de água por 72 horas..... 36
Figura 3.13 – Equipamento para obtenção de corpos de prova das argamassas antigas para ensaio de resistência à compressão..... 37
Figura 3.14 – Corpos de prova das argamassas antigas para ensaio de resistência à compressão..... 37
Figura 3.15 – Corpo de prova das argamassas retificado..... 38
Figura 3.16 – Corpo de prova das argamassas sendo ensaiado..... 38
Figura 3.17 – Polinômio do fator de correção e relação h/d indicados na Tabela da NBR 13279..... 39
Figura 4.1 – Aspecto visual da amostra A01 pertencente ao Prédio administrativo. 41
Figura 4.2 – Aspecto visual da amostra A02 pertencente ao Prédio administrativo. 42
Figura 4.3 – Aspecto visual da amostra A03 pertencente a Balança..... 42
Figura 4.4 – Aspecto visual da amostra A04 pertencente a Balança..... 43
Figura 4.5 – Aspecto visual da amostra A05 pertencente a Fábrica..... 43
Figura 4.6 – Aspecto visual da amostra A06 pertencente a Fábrica..... 44

Figura 4.7 – a) Difratograma da argamassa A01; b) Difratograma da argamassa A02. 48

Figura 4.8 – a) Difratograma da argamassa A03; b) Difratograma da argamassa A04 48

Figura 4.9 – a) Difratograma da argamassa A05; b) Difratograma da argamassa A06.....49

Figura 4.10 – TG/dTG da amostra A01..... 51

Figura 4.11 – TG/dTG da amostra A02..... 52

Figura 4.12 – TG/dTG da amostra A03..... 53

Figura 4.13 – TG/dTG da amostra A04..... 54

Figura 4.14 – TG/dTG da amostra A05..... 55

Figura 4.15 – TG/dTG da amostra A06..... 56

Figura 4.16 – Curvas granulométricas da areia de todas as amostras da Usina..... 62

Figura 4.17 – Absorção de água por imersão das amostras do prédio administrativo da Usina..... 64

Figura 4.18 – Absorção de água por imersão das amostras da balança da Usina... 64

Figura 4.19 –– Absorção de água por imersão das amostras da fábrica da Usina.. 65

Figura 4.20 – Absorção de água das amostras de argamassas da usina..... 66

Figura 4.21 – Resistência à compressão das argamassas do Prédio Administrativo..... 68

Figura 4.22 – Resistência à compressão das argamassas da Balança..... 68

Figura 4.23 – Resistência à compressão das argamassas da Fábrica..... 69

Figura 4.24 – Resistência à compressão das amostras de argamassas da Usina... 70

Figura 4.25 – Resistência à compressão vs absorção de água por imersão das argamassas da Usina..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Descrição dos principais aspectos constatados na análise visual de cada amostra de argamassa da Usina..... 44

Tabela 4.2: FRX das argamassas da Usina..... 46

Tabela 4.3: Composição mineralógica das argamassas por DRX e sua intensidade..... 50

Tabela 4.4: Estimativa de porcentagem dos materiais e do teor aglomerante/agregado das argamassas da Usina Ilha Bela pelo resultado da TG.. 58

Tabela 4.5: Estimativa de percentagem do teor aglomerante das argamassas da Usina Ilha Bela pela TG e pelo ataque ácido..... 59

Tabela 4.6: Estimativa da quantidade (g) do agregado e aglomerante e do teor aglomerante/agregado das argamassas da Usina Ilha Bela..... 59

Tabela 4.7: Relação aglomerante:agregado das argamassas pelos métodos TG e ataque ácido..... 60

Tabela 4.8: Distribuição granulométrica do agregado das amostras do prédio administrativo, A01 (revestimento externo) e A02 (revestimento interno)..... 61

Tabela 4.9: Distribuição granulométrica do agregado das amostras da balança da usina, A03 (revestimento externo) e A04 (revestimento interno)..... 61

Tabela 4.10: Distribuição granulométrica do agregado das amostras do prédio da fábrica da usina, A05 (revestimento externo) e A06 (revestimento interno)..... 62

Tabela 4.11: Propriedades físicas do agregado..... 63

Tabela 4.12: Dados do ensaio de resistência à compressão das argamassas da Usina Ilha Bela..... 67

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Nomenclatura, substrato e local de extração das amostras da Usina.. 29

Quadro 3.2: Conjuntos de peneiras utilizado no ensaio de granulometria..... 36

Quadro 3.3: Dados do ensaio de resistência à compressão das argamassas da Usina..... 42

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1.....33
Equação 3.2.....36
Equação 3.3.....39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATR-IR – Espectroscopia no Infravermelho por refletância total atenuada

DRX – Difração de raios X

DTA – Análise Térmica Diferencial

DTG – Derivada primeira da TG

EAA – Espectrofotometria de absorção atômica

FJA – Fundação José Augusto

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

LABCIM – Laboratório Anexo ao Laboratório de Cimentos

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MEV-EDS – Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva

MO – Microscopia Óptica

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

TG/DTA – Análise Termogravimétrica

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1

Introdução

Edificação histórica é definida como uma construção que apresenta características de grande valor arquitetônico, cultural e histórico (SOUSA, 2014). Este conceito está ligado ao Patrimônio histórico edificado, que se elege por ser um bem cultural que é produzido por um determinado povo, nação ou civilização, representando de melhor maneira seu passado (ROSA, 2016).

Dessa forma, é imprescindível a preservação do patrimônio cultural nacional, uma vez que este simboliza a identidade de uma sociedade. E assim, esse conjunto de valores próprios culturais e históricos do país será mantido de geração em geração (SOUSA, 2014).

Compreender os edifícios históricos significa também entender e conhecer os materiais existentes desde décadas e séculos passados. As argamassas antigas que compõem estes monumentos guardam evidências acerca da história construtiva da edificação, os métodos e os materiais. Portanto, estas devem ser preservadas a fim de servir como parâmetro para definição de argamassas de reconstituição para manter e conservar periodicamente o edifício histórico (KANAN, 2008).

Na conservação e reabilitação de edifícios, as argamassas de revestimento desempenham um papel essencial e devido à sua exposição e atribuição de proteger o substrato, são os primeiros elementos do edifício no qual é perceptível a degradação (DAMAS, VEIGA e FARIA, 2016).

Para exercer essa função de proteção da edificação de agentes climáticos e ações externas em geral, os materiais empregados no revestimento eram mais porosos e deformáveis comparados aos utilizados nos dias de hoje, e sua capacidade de resistência e de proteção era assegurada basicamente por meio de sua espessura (VEIGA e TAVARES, 2002).

Eram predominantes na composição dos materiais das argamassas de revestimento antigo dois componentes, o aglomerante (cal) e o agregado (areia), podendo ainda conter aditivo de material pozolânico ou material orgânico (SOUSA, 2014). No entanto, os métodos construtivos de paredes eram diferentes de uma

região para outra, e, além disso, a constituição destes materiais passou por modificação ao longo dos anos (VEIGA, 2012).

Atualmente, a preocupação sucessiva em reabilitar os edifícios tem levado a tomada de decisões indevidas, geralmente resultando na remoção de argamassas antigas, com perda do seu valor entre outros, o técnico e estético, e sua substituição por argamassas novas (FARIA, HENRIQUES e RATO, 2008).

Maravelaki-Kalaitzaki et al., (2005) relatam ainda que comumente essa intervenção para restauração aplica materiais à base de cimento e polímeros, tendo seu uso justificado por apresentar uma boa adesividade e métodos fáceis de aplicação. Porém, não obedecem aos requisitos fundamentais de compatibilidade física e química com o substrato, propiciando muitas vezes um dano maior. À vista disso, pesquisas recentes enfocam o uso de materiais compatíveis com substratos originais (TAGLIERI et al., 2017).

No Brasil, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) é o órgão federal de preservação que se encarrega do exercício preservacionista no país. Ele foi criado em 1937, e o primeiro tombamento do Rio Grande do Norte foi realizado no ano de 1949 (IPHAN, 2017). Além deste, existe no Rio Grande do Norte a Fundação José Augusto (FJA) que também tem a finalidade de promover a restauração, conservação e manutenção de monumentos históricos e artísticos do Rio Grande do Norte.

A lista de bens tombados por ambos, IPHAN e FJA, no Rio Grande do Norte ainda não abrange todas as edificações históricas existentes. Pouca atenção foi dada ao Vale do Ceará-Mirim, que carrega um passado de tradições de uma economia rural e patriarcal, no qual os engenhos, distribuídos no decurso do vale desenham a paisagem açucareira da região.

A transição deste período de progresso da atividade açucareira é notável por meio da presença de patrimônio material na região. Constatam-se inúmeras construções arquitetônicas associadas a esse momento histórico no decorrer do vale, muitas delas já em ruínas (BERTRAND, 2010).

Dentre os engenhos instalados ao longo do vale do rio Ceará-Mirim, o engenho Ilha Bela se destacou por apresentar uma implantação singular. Suas atividades tiveram início entre os anos 1888 e 1889, e posteriormente foi transformado em usina para produção de açúcar cristal. Diante desse contexto, essa pesquisa tem como objeto de estudo caracterizar as argamassas de revestimento da

Usina Ilha Bela/RN, contribuindo para preservação e restauração desses monumentos históricos.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo geral

Essa pesquisa tem como principal objetivo caracterizar fisicamente as argamassas de revestimento da Usina Ilha Bela/RN.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Fornecer informações sobre o aspecto visual das amostras de argamassa históricas da Usina Ilha Bela;
- Identificar o aglomerante e o agregado utilizado na argamassa de revestimento da Usina;
- Fornecer informações sobre a composição química e mineralógica das argamassas existentes;

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Contexto histórico geral da região açucareira

O açúcar está entre os primeiros produtos econômicos do Brasil. Sua produção, através dos antigos engenhos, foi a responsável pela ocupação de grande parte da costa brasileira, principalmente da região que hoje se define territorialmente como Nordeste, no qual o cultivo da cana e a produção de açúcar ainda possuem relevância econômica. Desse modo, foram sendo povoados, tanto o litoral, lugar onde foram implantados os engenhos de açúcar, quanto o sertão do Brasil, onde tinha a concentração de fazendas de gado (CRUZ, 2015).

Na região Nordeste, os primeiros engenhos implantados se concentraram de início em dois pontos: Olinda, expandindo-se para o sul, até Penedo e para o norte, até Goiana, chegando até a Paraíba e o Rio Grande do Norte; e Salvador, se espalhando para todo o Recôncavo Baiano (ANDRADE, 2007).

Os estudiosos designaram essa expansão de “civilização do açúcar”, pois determinou de forma decisiva o modo de surgimento e desenvolvimento dos núcleos de povoamento urbanos e rurais.

2.1.1 Construções antigas da região açucareira do Rio Grande do Norte

No Rio Grande do Norte (RN), a instalação dos primeiros engenhos de açúcar aconteceu no início do século XVII, quando começou o processo de colonização efetiva do seu território pela coroa portuguesa, e as fazendas de gado acompanharam o desbravamento das terras sertanejas. Todavia, a cultura canavieira teve sua expansão tardia, consequentemente a produção de açúcar norte-rio-grandense era reduzida quando comparada com a de grandes centros produtores, como Pernambuco e Bahia. Entretanto, engenhos foram construídos no decorrer da história no território do Rio Grande do Norte e desde os primórdios da

sua colonização a produção açucareira foi praticamente ininterrupta. E ainda hoje, a cana-de-açúcar é cultivada nas terras norte-rio-grandenses, principalmente no litoral oriental, no qual, canaviais e estruturas remanescentes dos engenhos antigos evidenciam a paisagem dessa região (CRUZ, 2015).

Cruz (2015) estabelece esse termo litoral oriental voltando-se para definição da região mais primitiva de ocupação portuguesa do território potiguar, no qual, teve a concentração de cultivo da cana e a produção de açúcar no Rio Grande do Norte. A Figura 2.1 apresenta um mapa adaptado do litoral oriental do RN.

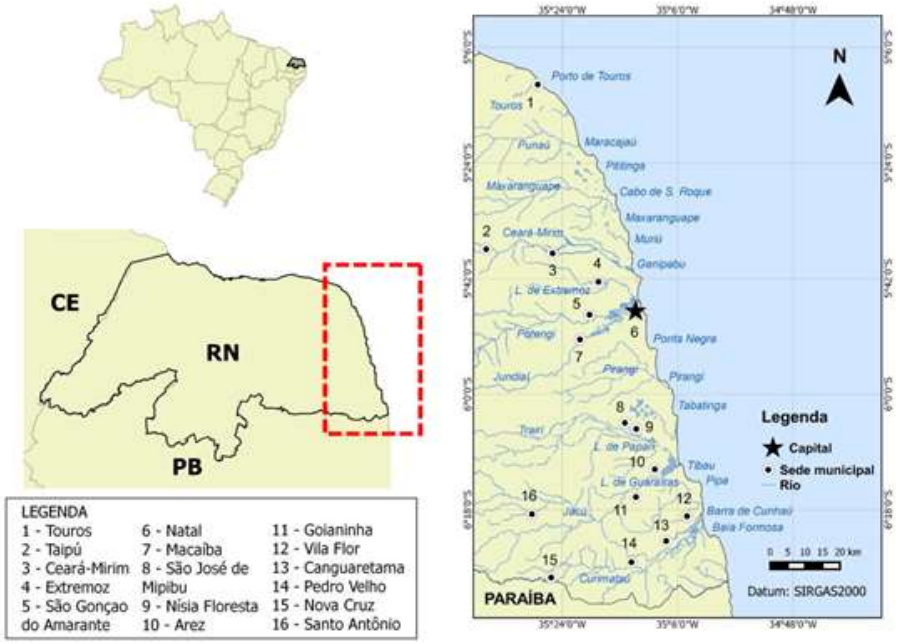


Figura 2.1 – Mapa adaptado do litoral oriental do RN.
Fonte: Cruz (2015).

Devido às condições climáticas e ambientais, os engenhos de açúcar se aglomeraram especificamente na parte leste do estado, nos vales férteis e úmidos dos rios do litoral oriental do Rio Grande do Norte, região esta, que engloba a sua costa desde Touros, na divisa entre o litoral setentrional e o oriental, a Baía Formosa, no limite com o estado da Paraíba (CRUZ, 2015).

Os primeiros engenhos instalados na capitania do Rio Grande eram oriundos das capitanias vizinhas, principalmente Pernambuco, para outras regiões (MONTENEGRO, 2004).

Em meados do século XIX, fatores naturais e econômicos conduziram transformações no cenário econômico norte-rio-grandense. A seca nos anos de 1844-1846 devastou o rebanho bovino, desarticulando essa atividade econômica no estado, levando os proprietários rurais a busca de uma economia mais sólida, investindo no cultivo da cana de açúcar (BERTRAND, 2010).

Foi quando o Rio Grande do Norte apontou um número mais expressivo de engenhos, com a instalação de engenhos centrais e o surgimento das primeiras usinas, iniciando um processo de modernização e melhoramento do processo de cultivo do açúcar para desdobrar a crise açucareira. Então, perante estas dificuldades, a produção de açúcar potiguar persiste no cultivo de cana-de-açúcar alcançando o vale do rio Ceará-Mirim, área que se tornou principal produtora de açúcar da província, passando para 173 engenhos no ano de 1860. A cidade de Ceará-Mirim ganhou relevância por apresentar terras próximas ao rio com condições favoráveis a plantação de cana de açúcar (CRUZ, 2015).

Os engenhos antigos constituíam unidades rurais complexas dotadas de um conjunto de edificações com diversas funções. Tinha a casa-grande, a senzala, a capela e a fábrica. A implantação dos edifícios nos sítios e os materiais diferentes empregados em cada edificação retratavam os valores da época e a hierarquia social. Cruz (2015) relata mais, que os materiais utilizados na construção da casa-grande e da capela eram mais duráveis, como a pedra e cal ou alvenaria de tijolos, e que estas edificações eram localizadas na parte mais elevada do terreno a fim de vigiar e controlar as atividades do engenho. Portanto, importa ressaltar que a apropriação e estruturação territorial do vale de Ceará-Mirim foram desenvolvidas pela produção econômica.

O IPHAN/RN (2013) fez um Inventário de conhecimento dos antigos engenhos/usinas de açúcar do litoral oriental do Rio Grande do Norte. Essa análise identificou 81 engenhos disseminados ao decorrer do litoral oriental potiguar. Desses, 62 inventariados e 21 não foram inventariados, devido seu estado de degradação avançado e descaracterização. Os 62 estão distribuídos: 1 em Arez, 1 em Baía Formosa, 6 em Canguaretama, 22 em Ceará-Mirim, 7 em Goianinha, 3 em Macaíba, 4 em Nísia Floresta (antiga Papari), 2 em Pedro Velho, 3 em São Gonçalo do Amarante, 11 em São José de Mipibu, 1 em Vila Flor e 1 em Tibau do Sul.

Quando analisados particularmente o estado de conservação e preservação das Casas-Grandes, Fazendas, Capelas, Fábricas e as Primeiras Usinas, pode-se inferir que o conjunto de antigos engenhos/usinas mais expressivo do Rio Grande do Norte, o do vale do Ceará-Mirim, é também o mais degradado (IPHAN, 2013).

Dando ênfase as primeiras usinas do vale do Ceará-Mirim, foi observado pelo inventário do IPHAN/RN (2013) que poucos exemplares, ou quase nenhum, das unidades fabris das antigas usinas do litoral oriental potiguar foram preservados. Ele identificou 6 usinas: Estivas em Arez, Ilha do Maranhão em Canguaretama, São Francisco, Ilha Bela, Guanabara e Santa Terezinha em Ceará-Mirim. Destas, duas não foram inventariadas, pois se encontram completamente descaracterizadas: as usinas Estivas em Arez e a São Francisco em Ceará-Mirim. Ambas tiveram como origem antigos banguês e se transformaram em usinas em 1929. Todavia, suas instalações fabris atuais são construções contemporâneas. A usina Ilha do Maranhão em Canguaretama, primeira construída em terras potiguares, e a usina Ilha Bela em Ceará-Mirim, construída na década de 1930, encontram-se em ruína e em arruinamento, respectivamente. E as usinas Guanabara, construída em 1929, e Santa Terezinha, instalada em 1947, possuem apenas a chaminé como estrutura remanescente da antiga fábrica.

2.1.1.1 Usina Ilha Bela

Dentre as Usinas do vale do Ceará-Mirim que não foi descaracterizada e que ainda possui ruínas de sua estrutura, ressalta-se a Usina Ilha Bela (Figura 2.2). Desse modo, o trabalho se restringe a Usina Ilha Bela como objeto de estudo para destacar o valor histórico desta no que se refere aos antigos engenhos potiguares da produção de açúcar no Rio Grande do Norte.

Figura 2.2 – Paisagem da Usina Ilha Bela.
Fonte: Bertrand (2010).

O engenho de Ilha Bela, propriedade do Barão do Ceará-Mirim, foi instalada em meados do século XIX na planície de inundação do rio Ceará-Mirim, especificamente na área que está livre das ações das cheias do rio. Este engenho ganha relevância entre as demais por apresentar uma implantação singular, na qual a usina foi instalada em uma elevação de terra na planície de inundação do rio Ceará-Mirim, formando uma espécie de ilha no meio do canavial conhecida como Ilha dos Cavalos. O início das atividades como engenho Ilha Bela se deu entre os anos de 1888 e 1889, administrado pelo tenente-coronel José Felix da Silveira Varela. Mas, no ano de 1929, o engenho foi transformado em usina para produzir açúcar cristal, e passou a produzir açúcar mais fino. A produção anual de açúcar chegou a 12.000 sacos de 60 kg (BERTRAND, 2010).

Em 1949, a usina Ilha Bela foi comprada pelo grupo Paraibano Ribeiro Coutinho, proprietário de usinas na Paraíba e da Usina Estivas em Arêz no Rio Grande do Norte, tornando-se o grande concorrente da Usina São Francisco na região. No ano de 1973, devido à produtividade baixa, as duas usinas se juntam, com o apoio do Grupo Especial para a Racionalização da Agroindústria Canavieira do Nordeste (LOUREIRO, 2009).

Bertrand (2010) coloca que nas pesquisas de campo não foram encontrados vestígio material que esteja associado ao período de instalação do engenho. As edificações existentes na área se referem ao período de funcionamento como usina, ilustradas nas Figuras 2.3 e 2.4.

Figura 2.3 – Fábrica da Usina Ilha Bela.
Fonte: Bertrand (2010).

Figura 2.4 – Balança da Usina Ilha Bela.
Fonte: Bertrand (2010).

Os prédios encontrados foram referentes a fábrica e ao lado o prédio administrativo da usina (Figura 2.3) e outra edificação onde funcionava a balança (Figura 2.4).

2.2 Argamassa histórica

2.2.1 Definição e constituição de argamassa histórica

Argamassas de cal foram utilizadas na construção desde tempos imemoriais até as primeiras décadas do século XX. Elas são uma parte de quase todos os edifícios antigos, desempenhando diferentes papéis: funções estruturais quando empregadas para unir blocos e pedras em paredes de alvenaria estrutural; proteção das paredes contra a água e impactos quando usadas em rebocos; material de colagem para mosaicos e ladrilhos cerâmicos; finalidades decorativas quando aplicadas em acabamentos coloridos, pintura mural, estuques e tantas técnicas decorativas diferentes (VEIGA, 2017).

Essas argamassas de cal dos edifícios históricos que sobreviveram até os dias atuais possuem composições bastante diversificadas, em proporções, natureza e qualidade dos principais componentes e em tipos de adições. Uma análise mostrou que são encontrados proporções volumétricas aglutinante:agregado principalmente na faixa de 1:1 a 1:2,5, proporções ricas em cal, ou também mais pobres, como, 1:3 a 1:4 (VEIGA, 2017). Segundo Garijo et al., (2018) a proporção volumétrica que tem sido apontada como referência para dosagem de uma argamassa de cal é a 1: 3 (cal: areia), o que também foi mencionado nos antigos tratados de Bênçãos de Vitrúvio, Alberti, Paladio e Benito (1973 e 2011). Essa é a proporção de aglutinante-agregado recomendada para a síntese de argamassas de cal para restauração (MOROPOULOU et al., 2002).

Para Veiga (2006), as argamassas antigas são constituídas em geral de cal aérea e areia, com o uso ou não de adições minerais e orgânicas. Botas, Veiga e Velosa (2017) citam em sua pesquisa que as argamassas encontradas nas fachadas exteriores do século XIX eram argamassas comuns de cal e areia, sendo a areia extraída de áreas vizinhas e, em alguns casos, essa areia apresenta pequenas quantidades de partículas de argila.

Pedaços brancos de cal em argamassas antigas são frequentemente visíveis, por vezes atribuídas a cal viva não hidratada, mas que também pode ser devido a pó

hidratado mal misturado ou massa de cal, ou mesmo à re-precipitação do carbonato de cálcio (VEIGA, 2017).

2.2.2 Caracterização das argamassas históricas

Para permitir que as futuras gerações desfrutem da diversidade cultural de nossa sociedade, devemos dedicar-se a conservação e preservação do patrimônio construído. Dessa forma, o conhecimento de materiais e técnicas tradicionais é uma questão indispensável para se obter um critério de seleção do mais apropriado em qualquer circunstância (BARRERA et al., 2014).

O estudo de argamassas antigas fornece informações essenciais a respeito das tecnologias de construção utilizadas no passado, características dos materiais de construção, fases de construção, questões de procedência, avaliação da relação aglutinante/agregado, bem como composição para objetivos de restauração (LEZZERINI et al., 2018).

Veiga (2012) reforça a importância da caracterização das argamassas históricas quando destaca que entre as razões para tal estão: registro histórico, avaliação do estado de degradação da argamassa e ainda, seleção e formulação de argamassas de reparação compatíveis.

As argamassas de substituição mais compatíveis são aquelas que possuem características químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas semelhantes às originais (VEIGA et al., 2010). Para assegurar a compatibilidade, é imprescindível determinar, em primeiro lugar, as características dos materiais existentes. Portanto, uma matriz de conhecimento bem fundamentada pode ser desenvolvida para apoiar futuras intervenções de conservação e reforma (DAMAS et al., 2018).

Quando se trata de imóveis de valor histórico expressivos, a primeira opção de conservação do revestimento antigo deve ser por meio de técnicas para sua manutenção. Caso isso não seja viável, opta-se por uma operação de consolidação. Ainda assim, se o nível de degradação deste lugar já estiver avançado deve-se escolher a substituição parcial desse revestimento. Em último caso é aconselhado à substituição total do revestimento (VEIGA, 2006).

Ocorreram vários exemplos de intervenções de conservação ou restaurações que aceleraram o dano à estrutura histórica autêntica, isto porque foram aplicados materiais e tratamentos incompatíveis. Portanto, é imprescindível o desenvolvimento e utilização de técnicas de avaliação para um tratamento de conservação apropriado (AVDELIDIS e MOROPOULOU, 2004).

A caracterização das argamassas é geralmente realizada combinando observações macroscópicas, técnicas minero-petrográficas e microquímicas. Primeiro é feita a análise preliminar de amostras a olho nu, posteriormente, estudos em seções delgadas, o que permite obter informações básicas sobre as principais características e propriedades desses materiais artificiais. Os dados obtidos por fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), microscopia de varrimento electrónico com espectroscopia de raios-X de energia dispersiva (MEV-EDS) e análise termogravimétrica (TGA) complementam muito as informações obtidas pelos estudos preliminares, permitindo obter uma caracterização completa das frações aglomerante e agregada (LEZZERINI et al., 2018).

Mais especificamente, é preciso compreender a composição química e mineralógica, a textura, a microestrutura e a distribuição do tamanho dos grãos, para gerar um produto final de efetiva conservação (MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2005).

2.2.3 Técnicas de Caracterização das argamassas históricas

Com o intuito de conhecer a composição aproximada das argamassas históricas, ou seja, proporções de cal e areia (aglomerante e agregado) são necessários utilizar amostras íntegras e representativas das argamassas e/ou de rebocos antigos, incluindo ou não os acabamentos pictóricos. O primeiro passo é a avaliação preliminar do estado de conservação e natureza das argamassas. Para tal, é feito uma inspeção visual das áreas por meio de instrumentos simples (lupas) para obter informações completas acerca das amostras e identificar sua estratigrafia, como também do edifício histórico (KANAN, 2008).

Posterior a essa etapa têm-se as determinações analíticas das argamassas. Através de análises mais avançadas é possível determinar características físicas

(microestrutura, distribuição dos poros) e mineralógicas, identificar e diferenciar os componentes químicos semelhantes, obtendo uma caracterização mais completa e precisa dessas argamassas (KANAN, 2008). Entre as técnicas que têm sido mais utilizadas na caracterização de argamassas antigas e em argamassas de reconstituição, estão: Difração de raio X (DRX), fluorescência de raio X (FRX), espectroscopia no infravermelho por refletância total atenuada (ATR-IR), Análises térmicas (TG/DTA), microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura com EDS (MEV-EDS), teor de aglomerante por ataque ácido, análise granulométrica, resistência à compressão e absorção de água por imersão.

2.2.3.1 Difração de raio X (DRX)

Essa técnica possibilita estudar a fase cristalina das argamassas. A difração de raios X é uma das técnicas de caracterização de materiais que permite determinar a composição mineralógica dos vários constituintes cristalinos (BLEICHER e SASAKI, 2000). Além disso, fornece informações sobre os minerais presentes em uma amostra (DAMAS et al., 2018).

Como em estado sólido os átomos de alguns materiais podem assumir arranjos geométricos diferentes, conforme a natureza de cada átomo presente e do tipo de ligação atômica possível, estes arranjos podem compor uma matriz periódica que se repede no percurso de grandes distâncias atômicas, o que forma um padrão tridimensional recorrente, no qual os átomos estão estruturados em planos cristalinos. O número de planos cristalinos possíveis, e as distâncias interplanares (medidas em termos de comprimento de onda) são próprios de cada material, e podem ser obtidos por um equipamento de DRX (CALLISTER, 2006). Dessa maneira, é possível se distinguir os tipos de agregados como a areia, aglomerantes como gesso e também as argamassas de cimento, mistas ou de cal.

2.2.3.2 Fluorescência de raio X (FRX)

A fluorescência de raios X possibilita estudar a composição química (principais elementos) de uma amostra de argamassa (DAMAS et al., 2018). Essa

técnica tem como objetivo determinar as quantidades de componentes químicos (óxidos) maiores e menores presentes nas amostras de argamassas em forma de pó analisadas, utilizando um espectrômetro de raios X sob as condições instrumentais estabelecidas (LEZZERINI et al., 2018).

2.2.3.3 Espectroscopia no Infravermelho por refletância total atenuada (ATR-IR)

A espectroscopia no infravermelho baseia-se na observação de que as ligações químicas apresentam frequências específicas de vibração associadas à níveis de energia bem definidos. Essas frequências de vibração ou frequências de ressonância variam com a forma da molécula, dos seus níveis de energia e da massa dos seus átomos constituintes. Portanto, essa técnica tem como objetivo submeter uma radiação eletromagnética na amostra na faixa de frequências do infravermelho e, o material absorve as frequências (energias) correspondentes às frequências vibracionais naturais das moléculas presentes na amostra, as quais são ocasionadas pela combinação, sobreposição e absorção de vibrações fundamentais. Assim, é possível identificar-se os tipos de ligações presentes no material, as quais são referentes ao tipo de composto presente na amostra (PAVIA, 2010).

2.2.3.4 Análises Térmicas (TG/DTA)

A análise termogravimétrica fornece informações sobre o conteúdo dos componentes voláteis existentes na amostra, diante ao comportamento de decomposição do material à alteração de temperatura, medindo ao mesmo tempo sua massa em atmosfera controlada. Esta técnica contribui para a definição qualitativa e quantitativa de constituintes orgânicos e inorgânicos, na determinação de umidade e a estabilidade térmica de uma amostra. Assim sendo, essa análise permite monitoração de qualquer reação que inclui a presença de uma fase gasosa, como também a oxidação ou desidratação do material. As curvas de TG, ou termogramas e suas derivadas DTG, interligam a perda de massa da amostra versus a temperatura ou o tempo durante o ensaio, concebendo informações sobre as

velocidades de reação, e ainda, a composição e estabilidade térmica da amostra (RODRIGUES, 2013).

2.2.3.5 Microscopia Óptica (MO)

A microscopia óptica é uma ferramenta essencial na caracterização mineralógica e petrográfica dos constituintes da argamassa, bem como na observação das suas fases minerais. Essa técnica se destaca por fornecer informação de forma rápida e não ser onerosa. As informações podem ser obtidas através de iluminação de luz refletida e/ou luz transmitida, onde são acopladas câmeras para registrar fotograficamente as imagens. Com essa técnica podem-se analisar sólidos e alguns líquidos (CALLISTER, 2006).

2.2.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS (MEV-EDS)

A Microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilita a aquisição de informações sobre a composição microestrutural (morfologia e textura) das amostras em forma de imagem eletrônica e, com o auxílio de uma sonda EDS acoplada ao microscópio, é possível realizar também a análise química das amostras por espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Essa análise por EDS é uma ferramenta básica do MEV que caracteriza os materiais, identificando a composição química elementar da amostra, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem (CRUZ et al., 2006).

2.2.3.7 Teor de aglomerante por ataque ácido

O intuito desta técnica é obter proporções aproximadas do agregado e do aglomerante. Isto é feito através da dissolução da argamassa em solução ácida, para relacionar quantitativamente o aglomerante e o agregado, originando duas frações distintas, uma solúvel formada por aglomerante e outra insolúvel formada por agregado (DAMAS et al., 2018; KANAN, 2008; MOTTA, 2004).

2.2.3.8 Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos agregados é de suma importância, principalmente em obras de restauro de argamassas históricas. Isso porque, ela propicia a compatibilidade percentual dos diâmetros dos grãos na distribuição analítica entre o agregado da argamassa existente (argamassa histórica) e a argamassa de teste (MOURA, 2013). A distribuição de tamanho dos grãos são fatores essenciais para o bom desempenho das argamassas de cal (VEIGA, 2017).

2.2.3.9 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das características mais relevantes a serem avaliadas em argamassas antigas de revestimento de cal, pois esta permite estabelecer os limites de resistência a serem respeitados para garantir a compatibilidade entre as argamassas antigas e as de substituição (DAMAS et al., 2018).

É a propriedade das argamassas de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos de variadas origens e que se expressa em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2010).

2.2.3.10 Absorção de água por imersão

De acordo com Bauer (2008), a absorção de água está relacionada com a presença de poros existentes nos grãos e é expressa pelo teor de água absorvida no estado “saturado superfície seca” (sss) em porcentagem do peso da amostra seca, conforme a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001).

2.3 Histórico de caracterização de argamassas históricas

O primeiro passo antes de se realizar obras de restauro em edifícios históricos é conhecer o estado de conservação, e, consequentemente a composição da argamassa existente. Vários pesquisadores realizaram diferentes técnicas de caracterização em argamassas históricas dessas edificações a fim de colaborar para uma adequada reabilitação.

Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas e Moropoulou (2003) estudaram as argamassas de monumentos de vários períodos em Creta, quanto à composição mineralógica e química, distribuição granulométrica, matérias-primas e resistência à tração, com o intuito de avaliar sua durabilidade em um ambiente marinho e úmido. A tecnologia e as matérias-primas de cal, independentemente dos vários períodos históricos, diversificam os compósitos finais em argamassas, tais como: cal, cal hidráulica, cal com brita, e cal com material pozolânico. Estes apresentam ligantes em quantidades que variam de 22% (argamassas pozolânicas) a 29% (argamassas de cal). Compostos hidráulicos, como silicato de cálcio/hidratos de aluminato e resistência à tração, são maiores nas argamassas pozolânicas, seguidas de cal de tijolos triturados, cal hidráulica e argamassas de cal.

Ingo et al., (2004) realizaram a caracterização microquímica e minero-petrográfica de argamassas utilizadas em Tharros (oeste da Sardenha, Itália) para o revestimento das paredes de cisternas fenício-púnicas, por meio do uso combinado de análise térmica diferencial - termogravimetria (DTA-TG), difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura + espectrometria de energia dispersiva (MEV + EDS) e microscopia óptica (MO). Os resultados indicam que a calcita é o principal constituinte da matriz, classificando as argamassas como típicas argamassas de cal. Os resultados térmicos e microquímicos obtidos através da investigação MEV + EDS, DRX, MO e DTA-TG convergem para revelar a natureza hidráulica das argamassas de cal usadas para o revestimento das cisternas fenício-púnicas de Tharros, as quais, parecem apresentar metodologias de produção ligeiramente diferentes para preparar a mistura de cal e materiais cerâmicos pulverizados.

Lanas et al., (2004) prepararam cento e oitenta argamassas diferentes feitas com cal hidráulica natural e diferentes tipos de agregados para serem utilizadas em

obras de restauração. Foram estudados os fatores que afetam o comportamento mecânico no teste de longo prazo. As resistências à compressão e à flexão dos espécimes foram discutidas de acordo com o tempo de cura, as relações aglutinante/agregado, atributos dos agregados e porosidade. Três fases de endurecimento foram estabelecidas em função da composição química: o C_3S contribui para a força em idades precoces, já o C_2S e o processo de carbonatação contribui para a força à longo prazo. Os resultados revelaram também que os espécimes com maiores quantidades de ligante exibiram maior porosidade e resistência. E ainda, que os agregados de calcário contribuem para a força. Agregados com pequeno tamanho de grão mostram uma boa coesão na interface melhorando a resistência.

Maravelaki-Kalaitzaki et al., (2005) realizaram a caracterização físico-química das argamassas e rebocos originais e desenvolveram argamassas de reparo que foram aplicadas em obras de restauração de uma alvenaria histórica em Creta, na Grécia. As argamassas de restauro foram preparadas com cal hidráulica natural, como material ligante e areia siliciosa e tijolo triturado como agregados. Foram determinados em estágios iniciais e após 1 ano de cura, a absorção de água por capilaridade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, porosidade e distribuição de tamanho de poros. A argamassa de reparação apresentou distribuição de tamanho de poro e coeficiente de absorção capilar semelhante com a argamassa e a pedra originais. A argamassa de reparação exibiu uma resistência à compressão inferior à da pedra, mas este valor encontra-se em gamas aceitáveis para tal aplicação, uma vez que as argamassas de reparação exibem um módulo de elasticidade semelhante à pedra. A ausência de sais solúveis na argamassa de reparo após um período de aplicação de 3 anos, juntamente com o desenvolvimento de fases hidráulicas como o silicato de cálcio hidratado, e a consistência observada entre estrutura antiga e reparada favorece ainda mais o emprego de argamassas hidráulicas de cal.

As argamassas históricas de nove edificações de Santa Catarina, no Brasil, foram caracterizadas por Gleize et al., (2009), através de técnicas de difração de raios-X, análise termogravimétrica, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e espectroscopia de absorção atômica. Os autores concluíram com as análises, que as argamassas têm como ligante principal a cal

calcítica fabricada a partir de conchas, as quais foram totalmente carbonatadas. Foram identificadas em algumas argamassas, cales com impurezas, provavelmente devido à produção. Ainda foi identificado na mistura a presença de barro e pequenos fragmentos cerâmicos.

Bartz et al., (2012) investigaram as argamassas usadas no gesso de esgrafite de duas cores, datadas do século XVII, para caracterizar completamente o material e avaliar o estado de sua preservação. Foram desenvolvidos ensaios não destrutivos “in situ” compreendendo imagens térmicas e radar de penetração no solo, e posteriormente, testes destrutivos por microscopia ótica, análise química, análise granulométrica, difratometria de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia no infravermelho e análise térmica/termogravimétrica diferencial. Os resultados revelaram que a decoração é formada por duas camadas separadas de reboco de cal: (1) o gesso primário e (2) o gesso de esgrafite. Ambos pareciam ser uma mistura de ligante de cal (cal aérea) e areia fina a média, com adição de pequenas quantidades de pedaços de tijolos e carvão.

Yaseen et al., (2013) estudaram as argamassas de edificações antigas da cidade de Jerash, na Jordânia, com uso de microscopia petrográfica, MEV e análise de DRX e FRX. Foi verificado como aglomerante principal a cal de natureza calcítica, com presença de nódulos de cal, o que pode ser devido à baixa quantidade de água utilizada na hidratação da cal ou ao processo incompleto de carbonatação da cal. A análise no microscópio petrográfico mostrou uma coesão aglomerante/agregado e alta reatividade da cal, o que pode ser devido a queima suave do calcário cru. Os resultados apresentaram dois tipos de agregados. Algumas argamassas possuem agregados de calcita, gesso e quartzo, enquanto outras amostras são constituídas por agregados formados de calcita, gesso, argila e pozolana esmagada.

Sousa (2014) caracterizou as argamassas de revestimento do Grupo Escolar Augusto Severo, na cidade de Natal/RN, por meio de análise visual e laboratorial, FRX, DRX, TG/DTG e MEV-EDS. A partir das observações realizadas, foram identificadas manifestações patológicas como: fissuras, desprendimento do revestimento, sujidade, eflorescência, mofo e bolor, além da utilização de material inadequado à base de cimento. Os resultados das técnicas em laboratório indicaram que as argamassas estudadas são à base de cal, de natureza calcítica, e agregado

silicoso, com presença de argila em duas amostras. Das amostras coletadas, duas são compostas por cal, areia e argila e duas por cal e areia.

Silva, Pinto e Gomes (2014) avaliaram a influência do teor de cal hidráulica nas propriedades de misturas de argamassas de cal-hidráulicas. Para isso, foram testadas argamassas compostas de cal aérea e diferentes porcentagens de cal hidráulica natural. Suas propriedades no estado fresco, resistência mecânica na idade precoce (28 dias) e estrutura de poros, absorção de água, comportamento de secagem e permeabilidade ao vapor de água a longo prazo (3 anos) foram estudados. Argamassas misturadas com teores de cal hidráulica superiores a 25% apresentaram maior resistência mecânica inicial e maiores taxas de absorção e dessorção de água do que a argamassa de cal aérea, com ligeira redução da permeabilidade ao vapor de água. Assim, essas argamassas revelaram-se mais promissoras para serem utilizadas como argamassas de reparo do que a de cal hidráulica.

Hormes et al., (2016) investigaram três amostras de argamassa de diferentes fases de construção da Catedral de Paderborn (Alemanha) entre 1220 A.C. utilizando três técnicas diferentes e parcialmente complementares: difração de raios X convencional, fluorescência de raios X baseada em radiação sincrotron e espectroscopia de absorção de raios X na estrutura de borda próxima. Os resultados para a difração de raios X indicaram a calcita ($CaCO_3$) e o quartzo (SiO_2) como os compostos mais abundantes, o que também é confirmado pela espectroscopia de absorção de raios X, que revelam que a maioria do cálcio (Ca) existe como calcita.

Sala et al., (2016) desenvolveram materiais altamente compatíveis, livres de cimento, para o reparo estrutural e não estrutural de patrimônio histórico. Duas intervenções relevantes com diferentes requisitos de força/densidade são consideradas: enchimento da abóbada de alvenaria e revestimento não estrutural do piso de madeira. Diferentes tipos/conteúdos agregados leves são empregados em uma mesma argamassa para obter uma minimização da densidade. Os seguintes parâmetros principais são monitorados e comparados: resistência à compressão, módulo elástico e densidade. Os resultados indicaram que a substituição parcial ou total do peso normal agregado com o agregado leve permite reduções de peso entre 15% e 75%. E que o tipo de agregado leve influencia a resistência à compressão do material. A resistência à compressão é aumentada em cerca de 200%, aumentando

a relação aglutinante-agregado de 1:3 para 1:2. Concluindo no geral, que todas as argamassas com proporção agregado-ligante de 1:2 exibem desempenhos notavelmente melhores do que as das argamassas com proporção de 1:3.

Ortega et al., (2018) avaliaram o comportamento de argamassas de cal aéreas elaboradas com cal tradicional e realizou um estudo comparativo com argamassas de cal pré-dosadas em pó e em massa para sua aplicação em argamassa de reboco e argamassa de gesso. Os parâmetros de controle foram resistências mecânicas - elasticidade, velocidade de ultrassom, processo de carbonatação e distribuição de tamanho de poros e área de superfície por porosimetria de mercúrio. Concluíram que, o comportamento das argamassas de cal tradicionais, tanto em massa como em pó, depende da relação ligante/água, do tipo de agregados e do teor de calcário. Também, a importância da aplicação do produto no edifício, que influencia no comportamento da argamassa que é bastante sensível ao amassamento do conteúdo de água, definindo a plasticidade da argamassa. E ainda, que a carbonatação das argamassas tradicionais de cal não é lenta, ela pode ser concluída antes de 90 dias, se for submetida a condições ótimas de dosagens.

Damas et al., (2018) realizaram um levantamento aprofundado de dados da literatura sobre as características das argamassas que fixam os azulejos, do século XVI ao XX. Para além dos dados existentes, foi realizada uma caracterização física, mecânica, química e mineralógica de um conjunto de argamassas de revestimento de azulejos, dos séculos XVI a XIX, das cidades de Lisboa e Coimbra. Os resultados obtidos no estudo experimental foram analisados e comparados com os obtidos na literatura. Todas as argamassas mostraram-se compostas por cal aéreo e agregados silicosos, geralmente com adição de argila, sendo as argamassas de Lisboa compostas por um aglutinante de cal calcítico, com agregados silicosos e vestígios de argilominerais, e as argamassas de Coimbra um aglutinante de cal dolomítico, com agregados silicosos e, na maioria dos casos, uma quantidade significativa de minerais argilosos. Nas argamassas de Lisboa as relações de peso aglutinante encontradas foram principalmente entre 1:2 e 1:4, e para Coimbra, as proporções eram entre 1:2 e 1:6. Concluíram ainda que, em geral, as argamassas com menor teor de ligante correspondem a menores valores de força compressiva.

Lezzerini et al., (2018) estudaram argamassas de alguns edifícios da Praça dos Milagres (Pisa, Itália). Com base nas análises de MO, FRX, DRX, TG e SEM-

EDS, foram determinadas as principais características do aglutinante e agregado das argamassas, e algumas matérias-primas utilizadas para a produção dos materiais de ligação analisados foram identificadas. Os resultados mostram que os agregados exibem um tamanho de grão variando de médio a muito fino, formado por quartzo, feldspatos, fragmentos de rochas, incluindo também calcários e calcarenitos de Panchina, fragmentos de calcita, filossilicatos e granada rara, epídoto, turmalina e zircão. Os dados químicos revelam uma composição de argamassas rica em cálcio e em sílica.

CAPÍTULO 3

Metodologia da pesquisa

O procedimento experimental da pesquisa compreendeu duas etapas. Primeiro foi realizada uma análise do estado de conservação da edificação, seguido da caracterização das argamassas históricas de cada prédio pertencente a Usina de Ilha Bela. O esquema apresentado na Figura 3.1, ilustra a metodologia utilizada na pesquisa.

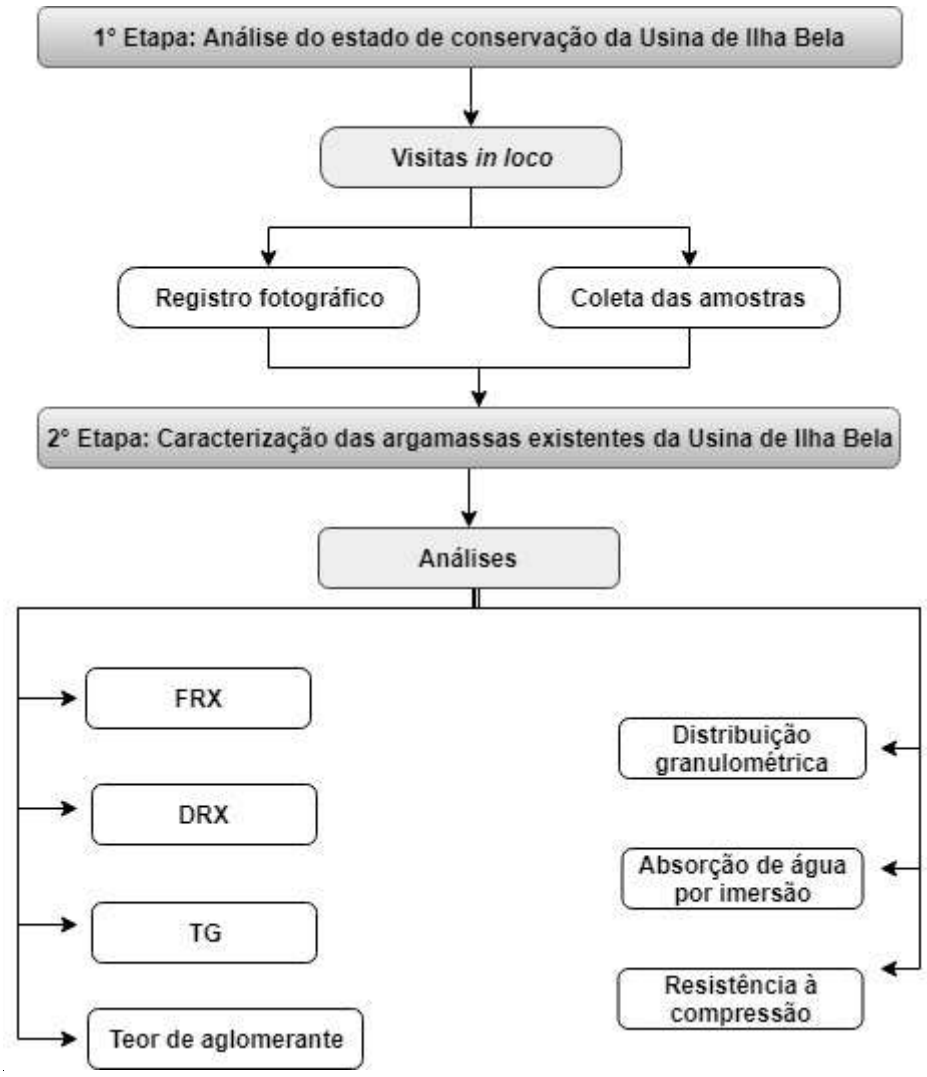


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.

Fonte: Autor (2019).

3.1 Análise do estado de conservação da Usina Ilha Bela

As práticas preservacionistas das alvenarias históricas exigem o entendimento dos materiais que sobreviveram e dos que vão ser usados na reconstituição, portanto, conhecer o estado de conservação da edificação é importante. Para isso, foram realizadas visitas *in loco* na Usina (Figuras 3.2 a 3.5) para verificar a situação atual da edificação, assim como, identificar os diferentes ambientes e a possível existência de intervenções que esta possa ter recebido no decorrer dos anos.

Figura 3.2 – Usina Ilha Bela.
Fonte: Autor (2019).

Figura 3.3 – Prédio administrativo da Usina Ilha Bela.
Fonte: Autor (2019).

Figura 3.4 – Fábrica da Usina Ilha Bela.
Fonte: Autor (2019).

Figura 3.5 – Balança da Usina Ilha Bela.
Fonte: Autor (2019).

Essa inspeção visual foi realizada atentando para as recomendações de Kanan (2008):

- Observação óptica;
- Registro fotográfico das alvenarias históricas da edificação;
- Coleta de amostras íntegras das argamassas antigas para análises posteriores;
- Armazenamento das amostras em recipientes limpos e secos e rotulação de cada amostra, identificando o edifício da qual foi retirada.

3.2 Caracterização das argamassas históricas da Usina Ilha Bela

Após a coleta das amostras, para se conhecer as características físicas e químicas da argamassa antiga, foram realizadas técnicas de caracterização dos materiais contidos na argamassa e de amostras íntegras dessa argamassa. Os diversos métodos se complementam e concedem informações sobre os materiais que foram utilizados na época, caracterizando a argamassa existente, o que é fundamental para uma execução futura da conservação da Usina.

Para isso, foram extraídas amostras íntegras das argamassas de revestimento dos ambientes externo e interno de cada prédio, tendo o devido cuidado de agredir o mínimo possível do monumento histórico. As técnicas de caracterização adotadas foram baseadas em trabalhos anteriores, dentre eles (Damas et al., 2018; Ortega et al., 2018; Damas, Veiga e Faria, 2016; Hormes et al., 2016; Lezzerini et al., 2016 e 2014; Sousa, 2014; Bartz et al., 2012; Gleize et al., 2009; Lanas et al., 2004) e mediante o que foi descrito no capítulo 2 a respeito da caracterização de argamassas históricas.

Dessa maneira, para análise mais complexa das argamassas de revestimento da Usina, foram realizadas as seguintes técnicas:

- Fluorescência de raios X (FRX);
- Difração de raios X (DRX);
- Análise termogravimétrica (TG);
- Teor de aglomerante e agregado;
- Distribuição granulométrica após o ataque ácido;
- Absorção de água por imersão;
- Resistência à compressão.

3.2.1 Coleta das amostras

A retirada das amostras de argamassas foi realizada conforme a metodologia de Kanan (2008), que indica a extração de amostras, isentas de deterioração e que sejam em quantia suficiente para as análises, para que não resulte em perdas e dano maior ao monumento.

Foram extraídas amostras da argamassa de revestimento externo e interno de cada prédio, com o auxílio de uma talhadeira e martelo, distribuídos entre 3 prédios existentes da Usina: Prédio administrativo, balança e fábrica.

As amostras foram retiradas a uma altura aproximada de 1,50m do nível do piso, sendo coletados 4 exemplares de cada prédio, tanto para o revestimento externo como interno.

As amostras do prédio administrativo foram extraídas em 4 pontos da parede frontal e em 4 pontos desta mesma parede na parte interna do prédio. Assim como foi a extração das amostras da Fábrica, em 4 pontos da parede frontal e em 4 pontos desta mesma parede na parte interna do prédio. Sendo estas paredes escolhidas, por apresentarem uma melhor conservação, comparada às demais paredes de cada prédio analisado. Já as amostras do prédio da Balança foram extraídas em paredes distintas, sendo as amostras de revestimento externo coletadas em 4 pontos da parede lateral direita e as amostras de revestimento interno extraídas em 2 pontos dessa mesma parede na parte interna do prédio, e além dessas, mais 2 amostras coletadas na parte lateral direita.

Em seguida, os materiais coletados foram armazenados em recipientes plásticos, limpos e secos e identificados individualmente. Como parte da observação visual, as amostras foram fotografadas, mostrando seções importantes desta para análise quanto a cor, textura, espessura e resistência (compacta ou quebradiça).

No Quadro 3.1 estão apresentados a identificação, o substrato e o local de retirada de cada amostra.

Quadro 3.1: Nomenclatura, substrato e local de extração das amostras da Usina.

Nomenclatura das amostras		**Substrato**	**Local de extração**
A01	Revestimento externo	Parede – tijolo de adobe	Prédio administrativo
A02	Revestimento interno	Parede – tijolo de adobe	
A03	Revestimento externo	Parede – tijolo de adobe	Balança
A04	Revestimento interno	Parede – tijolo de adobe	
A05	Revestimento externo	Parede – tijolo de adobe	Fábrica
A06	Revestimento interno	Parede – tijolo de adobe	

3.2.2 Preparação das amostras para análise

Logo após a coleta das amostras de argamassas, registro fotográfico e observação a olho nu, as amostras foram preparadas para análises em laboratório.

Para tal, parte da amostra foi desagregada cautelosamente com um almofariz de porcelana e um martelo de borracha (Figura 3.8).

Em seguida, uma porção do material foi destorroada até atingir uma fração mais fina, e então passar na peneira ∅= 0,075mm (#200). O material passante foi acondicionado em *eppendorfs* para serem encaminhados para análises de caracterização. E outra porção da amostra foi separada para determinação do teor de aglomerante.

3.2.3 Técnicas de Caracterização

3.2.3.1 Fluorescência de raios X (FRX)

Essa análise determina a composição química dos constituintes cristalinos presentes nas argamassas antigas, por meio da fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em um equipamento Shimadzu, modelo EDX- 720. Os espectros de fluorescência de raios X são adquiridos colocando o pó em um porta-amostra fabricado de um filme plástico de polietileno, que exibe absorção baixa de raios X na faixa de energia de interesse.

A análise química da argamassa (FRX) foi realizada no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.2.3.2 Difração de raios X (DRX)

Essa técnica determina a composição mineralógica das argamassas, ou seja, natureza do agregado e aglomerante que foi utilizado na argamassa antiga. O pó é colocado sob um porta amostra que gira em torno de um eixo, enquanto o feixe de raios X incide sobre ela. A identificação das fases presentes foi baseada na comparação dos resultados com os dados de difração padrão coletados.

Para isso, o aparelho utilizado foi o equipamento Shimadzu DRX - 7000 com fonte de radiação Cu – Kα, tensão de 40kV, corrente de filamento 30mA e filtro

monocromador de níquel, com velocidade de varreduras com 5º/min e leitura nos intervalos de varrimento 10º < 2θ < 80º. A análise de DRX foi desenvolvida no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.2.3.3 Análise termogravimétrica (ATG)

A análise termogravimétrica identifica as mudanças de massa da amostra com o aumento de temperatura, obtendo-se como resultado um gráfico (curva ATG). A partir da primeira derivada da curva ATG se traça a curva DTG, a qual permite detectar as temperaturas em que acontecem as reações que causam as mudanças de massa, ou seja, picos de desidratação e decomposição dos compostos.

Essa técnica foi realizada no Laboratório Multiusuário de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, utilizando o equipamento STA449 F3, de marca Netzsch. Para aplicação da técnica a amostra foi condicionada em um cadinho de alumínio e adotada as seguintes condições: atmosfera de nitrogênio com fluxo de 87mL/min e taxa de aquecimento de 10°C/min com intervalo de aquecimento de 30 a 900°C.

3.2.3.4 Teor de aglomerante

Como não existe um método padrão para medir o teor de aglomerante, e posteriormente, encontrar a relação aglutinante:agregado das argamassas históricas, foi feita uma adaptação de uma técnica combinada de tratamento térmico com dissolução em ácido clorídrico, cujo qual, promove a separação do ligante dos agregados siliciosos. Técnica esta utilizada por Damas et al., (2018), Kanan (2008) e Motta (2004), em suas pesquisas.

Essa técnica foi realizada no Laboratório Anexo ao Laboratório de Cimentos (LABCIM) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN. Para seu desenvolvimento, a amostra utilizada foi destorroada sem passar pelo processo de peneiramento, seguindo as etapas:

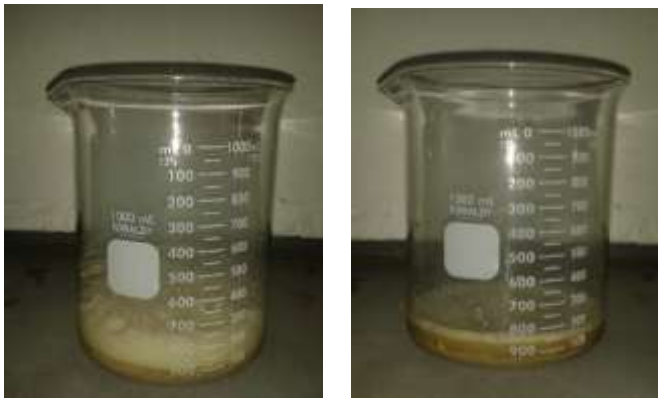
a) Secagem de 50 gramas da amostra de argamassa antiga, em estufa a (105±5) °C, durante 24 horas;
b) Registrou-se o peso da amostra (m_1) depois de retirada da estufa e depositou o material em um béquer;
c) Em seguida, adicionou-se 150 ml de ácido clorídrico, procedendo com agitação, e logo após a amostra ficou em repouso, durante 24 horas para ocorrer a diluição total da amostra;
d) Na sequência, drenou-se a solução ácida em um funil com papel filtro para aferição dos finos inertes, e posteriormente foi lavada com água, sendo a massa do papel filtro seco aferida previamente (m_2);
e) Posteriormente, secou-se o filtro de papel drenante com o resultante da ação térmica combinada com dissolução de ácido clorídrico, em estufa a uma temperatura de (105±5) °C, por 24 horas;
f) Ao final, aferiu-se a massa dos filtros drenantes para encontrar a quantidade de agregados (m_3), e assim descobrir o teor de aglomerante (M_{arg}).

As Figuras 3.6 a 3.9 a seguir apresentam todo o procedimento descrito anteriormente.

(a) (b)

Figura: 3.6 – a) Amostras na estufa; b) Amostra após 24h em estufa.

Fonte: Autor (2019).



(a) (b)

Figura: 3.7 – a) Amostra com ácido clorídrico; b) Amostra com ácido clorídrico após repouso por 24hs.

Fonte: Autor (2019).

(a) (b)

Figura: 3.8 – Drenagem da solução ácida.

Fonte: Autor (2019).

(a) (b)

Figura: 3.9 – a) Amostras drenadas após 24h em estufa; b) Pesagem do filtro drenante mais a amostra.

Fonte: Autor (2019).

Dessa forma, o teor de aglomerante foi calculado utilizando a seguinte Equação:

$$M_{arg} = \frac{m_1 - (m_3 - m_2)}{m_1} x100 \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Onde:

M_{arg}: teor de aglomerante (%);

m_1: massa inicial da amostra (g);

m_2: massa do filtro drenante (g);

m_3: massa de agregados após ação térmica e ataque químico (g);

Esse procedimento foi replicado para 3 amostras de cada exemplar de argamassa da Usina para se obter uma média. Após finalizar o ensaio, o material restante da dissolução em ataque ácido foi retirado do filtro cautelosamente e reservado em recipiente para ser utilizado posteriormente na análise granulométrica.

3.2.3.5 Análise granulométrica após o ataque ácido

A análise granulométrica dos agregados propicia a classificação das partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos dos grãos, podendo-se medir as frações correspondentes de cada tamanho. A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

A análise foi realizada na amostra de argamassa após a separação do aglomerante pela técnica de determinação do aglomerante por ataque ácido. O procedimento do ensaio foi uma adaptação do que é descrito pela ABNT NBR 248 (2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica, uma vez que a quantidade de amostra utilizada para o ensaio foi bem menor da exigida, por se tratar de uma argamassa antiga pertencente à um edifício histórico e evitar a sua degradação. Para tal, o agregado resultante do ataque ácido e após lavagem, foi seco em estufa, destorroado e depositado em um conjunto de peneiras (Figura 3.10) dispostas na seguinte ordem (Quadro 3.2).

Quadro 3.2: Conjuntos de peneiras utilizado no ensaio de granulometria.

Conjunto de peneiras	Abertura da malha
N° 4	4,75 mm
N° 8	2,36 mm
N° 16	1,18 mm
N° 30	0,600 mm
N° 50	0,300 mm
N° 100	0,150 mm
N° 200	0,075 mm

(a) (b)

Figura: 3.10 – a) Procedimento da Análise granulométrica; b) Amostra no conjunto de peneiras.

Fonte: Autor (2019).

Através do peneiramento foi determinada a composição granulométrica do agregado utilizado nas argamassas antigas da Usina e representado em forma de curva. Essa curva granulométrica possibilita a determinação das características físicas do agregado, como o módulo de finura e diâmetro máximo, permitindo assim uma compatibilidade percentual dos diâmetros dos grãos da argamassa antiga com uma argamassa de restauro.

O módulo de finura (Mf) do agregado indica a espessura deste, ou seja, quanto menor o valor do Mf, mais fino será o agregado. A partir do Mf é possível identificar em qual zona se encontra esse agregado e assim classificá-lo, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.2.3.6 Absorção de água por imersão

Com o intuito de se conhecer o comportamento da argamassa existente quanto ao volume de poros permeáveis, foi determinado a absorção de água por imersão nas amostras, conforme ensaio prescrito na norma NBR 9778 (ABNT, 2005) – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Esse ensaio foi realizado no LABCIM do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

Para a realização desse ensaio foi necessário realizar uma adaptação da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), já que as amostras coletadas não apresentavam o volume mínimo indicado por norma. Então, o ensaio foi realizado utilizando as amostras disponíveis (ilustradas na Figura 3.11) e seguiu-se a metodologia de execução do ensaio apresentada na norma.

Figura 3.11 – Amostras para ensaio de absorção de água.
Fonte: Autor (2019).

Para cada exemplar separou-se três amostras e colocou-as em estufa à temperatura 105 ± 5°C por um período de 72h, para que após o resfriamento, fosse possível determinar a massa das amostras seca (A). Em seguida, procedeu-se a imersão das amostras em água à temperatura de 23 ± 2°C, durante 72h, como ilustra a Figura 3.12.

Figura 3.12 – Amostras em imersão de água por 72 horas.
Fonte: Autor (2019).

Por fim, enxugou-se a superfície das amostras e determinou-se a massa B (massa da amostra saturada em água). A partir da obtenção desses valores, calculou-se o valor de absorção de água pela equação 3.2. E foi feita a média desses valores para cada exemplar de argamassa.

$$Absorção\ (\%) = \frac{B-A}{A} x100 \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde:

$Absorção\ (\%)$: absorção após imersão em água à temperatura de 23 ± 2°C, em porcentagem;

A: massa da amostra seca em estufa (g);

B: massa da amostra saturada em água à temperatura de 23 ± 2°C com superfície seca (g);

3.2.3.7 Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas foi determinada em corpos de prova adaptados, conforme procedimento descrito na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

Procedeu-se primeiramente com o preparo dos corpos de prova através de uma adequação nas amostras coletadas, por meio de uma serra copo diamantada com 460mm de diâmetro para obtenção de corpos de prova padronizados, como ilustram as Figuras 3.13 e 3.14.

Figura 3.13 – Equipamento para obtenção de corpos de prova das argamassas antigas para ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Autor (2019).

Figura 3.14 – Corpos de prova das argamassas antigas para ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Autor (2019).

Após obtenção dos corpos de prova em formato padrão, estes foram retificados e capeados com enxofre para fazer um ajuste de nivelação em suas extremidades, como mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15 – Corpo de prova das argamassas retificado.
Fonte: Autor (2019).

Feito isso, os corpos de prova foram posicionados sobre os dispositivos de apoio do equipamento, como mostra a Figura 3.16, e uma carga com velocidade de 0,25 MPa/s foi aplicada até a ruptura do corpo de prova. Esse procedimento foi triplicado para cada exemplar de argamassa em estudo da Usina para se obter uma média do valor de resistência à compressão de cada exemplar de argamassa antiga.

Figura 3.16 – Corpo de prova sendo ensaiado.
Fonte: Autor (2019).

Após submetido a um carregamento, foi calculado o valor da resistência à compressão pela equação 3.3.

$$f_c = \frac{4F}{\pi\, x\, D^2} \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Onde:

f_c: resistência à compressão (MPa);

F: força máxima alcançada (N);

D: diâmetro do corpo de prova (mm);

Como a relação h/d desses corpos de prova é menor que 1,94, a NBR 13279 (ABNT, 2005) recomenda que se multiplique o valor de f_c obtido por um fator de correção estabelecido por norma. Esse fator de correção varia conforme a relação h/d (altura/diâmetro) dos corpos de prova ensaiados. Como a relação h/d dos corpos de prova em análise estão fora dos valores estipulados na norma, foi necessário encontrar o fator de correção através da extrapolação polinomial, como mostra a Figura 3.17.

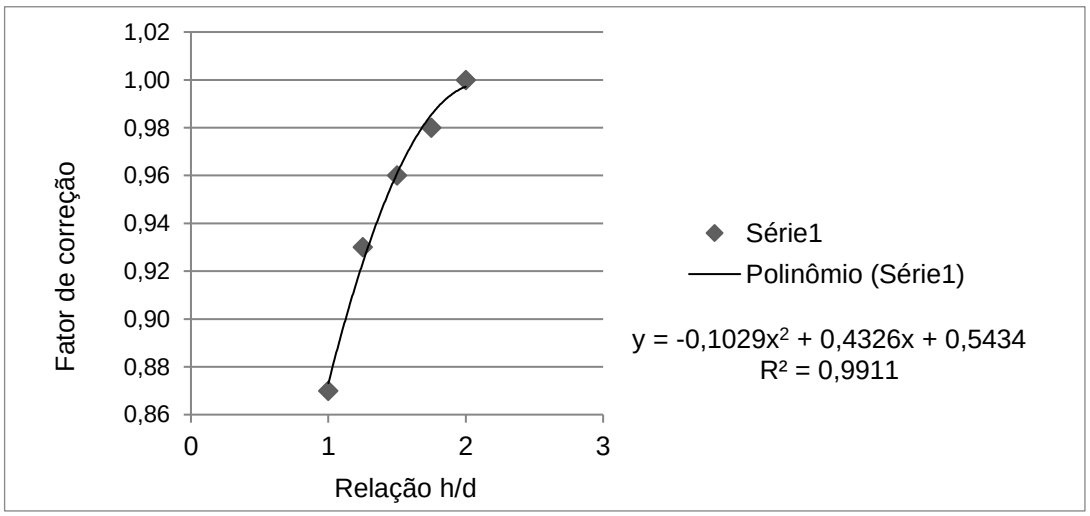


Figura 3.17 – Polinômio do fator de correção e relação h/d indicados na Tabela da NBR 13279.

Fonte: Autor (2019).

Com base no gráfico da Figura 3.17 foi possível se obter uma equação, na qual os valores reais da relação h/d dos corpos de prova em análise foram substituídos nesta, e conseguiu-se o fator de correção individual para cada amostra

de argamassa. O Quadro 3.3 apresenta os fatores de correção para cada relação h/d e amostra de argamassa.

Quadro 3.3: Dados do ensaio de resistência à compressão das argamassas da Usina.

Amostras de argamassas da Usina	Relação h/d	Fator de correção
A01	0,638	0,778
A02	0,630	0,775
A03	0,663	0,785
A04	0,826	0,831
A05	0,899	0,849
A06	0,652	0,782

A partir desses valores, foi permissível a obtenção dos valores de resistência à compressão.

CAPÍTULO 4

Apresentação e análise dos resultados

4.1 Caracterização das argamassas da Usina Ilha Bela

4.1.1 Análise visual das amostras

A seguir são apresentados os registros fotográficos nas Figuras 4.1 a 4.6 e o resultado da observação visual das argamassas coletadas na Usina Ilha Bela.

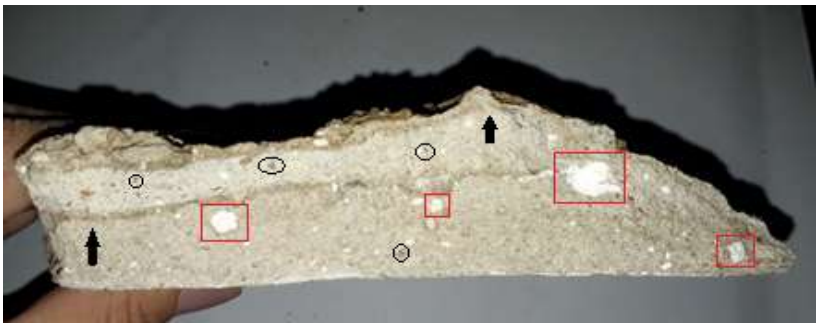


Figura 4.1 – Aspecto visual da amostra A01 pertencente ao Prédio administrativo.
Fonte: Autor (2019).

Visualmente a amostra de revestimento externo do prédio administrativo da Usina (A01), ilustrada na Figura 4.1, é constituída de duas camadas com cerca de 2,6 cm de espessura, como indica as setas. Apresenta uma coloração clara, com agregados de mesma cor e pode-se observar pequenos pontos pretos (indicados nos círculos) e nódulos de carbonato de cálcio de dimensão média (identificados nos quadrados vermelhos). A argamassa apresenta aspecto resistente e compacta à desagregação à mão.

Figura 4.2 – Aspecto visual da amostra A02 pertencente ao Prédio administrativo.
Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.2 ilustra a amostra A02, revestimento interno do prédio administrativo. Essa argamassa é constituída por uma camada, apresenta uma cor castanho claro, com cerca de 2,5 cm de espessura, com agregados de mesma cor e pequenos nódulos de carbonato de cálcio (identificados nos quadrados vermelhos), exibindo um aspecto quebradiço e pouco resistente à desagregação manual.

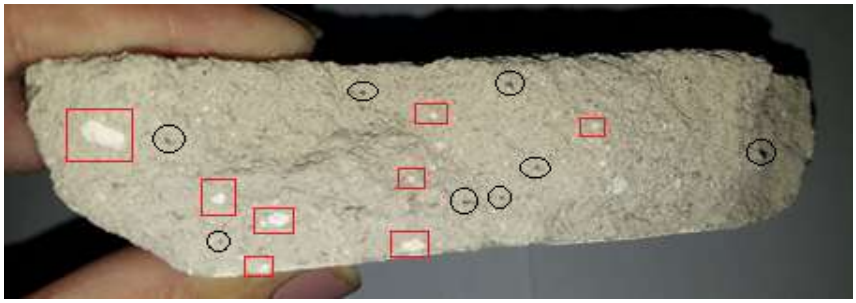


Figura 4.3 – Aspecto visual da amostra A03 pertencente a Balança.
Fonte: Autor (2019).

A amostra de revestimento externo da balança da Usina (A03), ilustrada na Figura 4.3, é constituída de uma única camada com cerca de 2,7 cm de espessura. Apresenta uma coloração clara, com agregados de mesma cor e pode-se observar pequenos pontos pretos (indicados nos círculos) e pequenos nódulos de carbonato de cálcio (identificados nos quadrados vermelhos). A argamassa apresenta um aspecto pouco resistente à desagregação à mão.

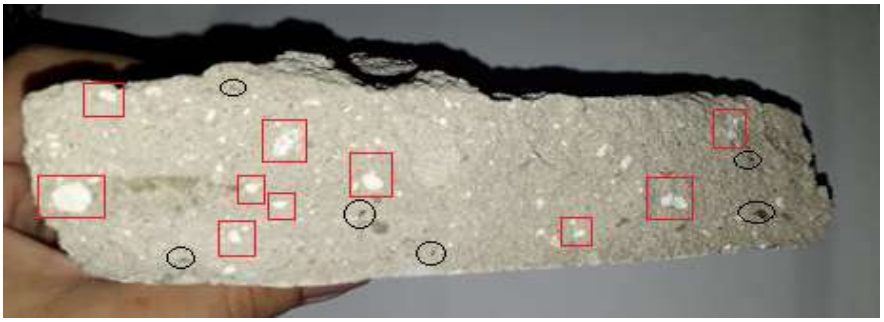


Figura 4.4 – Aspecto visual da amostra A04 pertencente a Balança.
Fonte: Autor (2019).

A Figura 4.4 apresenta a amostra de revestimento interno da balança da Usina (A03). Essa argamassa é constituída de uma única camada com cerca de 3,2 cm de espessura. Apresenta uma coloração clara, com agregados de mesma cor e é possível observar pequenos pontos pretos (indicados nos círculos) e nódulos de carbonato de cálcio (identificados nos quadrados vermelhos). A argamassa apresenta um aspecto compacto e resistente à desagregação manual.

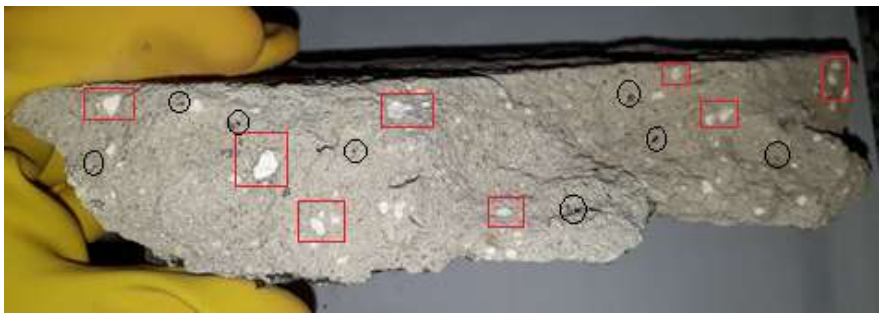


Figura 4.5 – Aspecto visual da amostra A05 pertencente a Fábrica.
Fonte: Autor (2019).

Visualmente a amostra de revestimento externo da fábrica da Usina (A05), ilustrada na Figura 4.5, é constituída de uma camada com cerca de 3,7 cm de espessura. Apresenta uma coloração clara, com agregados de mesma cor e pode-se observar pequenos pontos pretos (indicados nos círculos) e nódulos de carbonato de cálcio (identificados nos quadrados vermelhos). A argamassa apresenta aspecto pouco resistente à desagregação à mão.

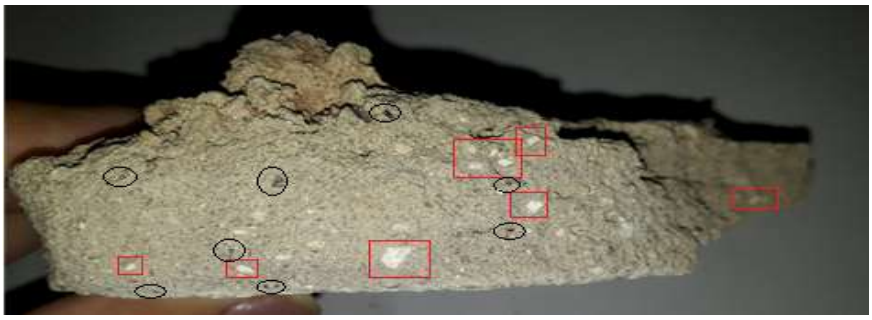


Figura 4.6 – Aspecto visual da amostra A06 pertencente a Fábrica.
Fonte: Autor (2019).

A amostra de revestimento interno da fábrica da Usina (A06), ilustrada na Figura 4.6, é constituída de uma camada com cerca de 3,5 cm de espessura. Apresenta uma coloração clara, com agregados de mesma cor e pode-se observar pequenos pontos pretos (indicados nos círculos) e nódulos de carbonato de cálcio (identificados nos quadrados vermelhos). A argamassa apresenta aspecto pouco resistente à desagregação manual.

Na Tabela 4.1 estão sintetizados os principais aspectos constatados nas amostras da Usina.

Tabela 4.1: Descrição dos principais aspectos constatados na análise visual de cada amostra de argamassa da Usina.

Amostras	N° de camadas	Cor	Espessura média (cm)	Outros aspectos
A01	2	Clara	2,6	Resistente à desagregação manual, compacta e médios nódulos de carbonato de cálcio
A02	1	Castanho claro	2,5	Pouco resistente, quebradiça e carbonato de cálcio
A03	1	Clara	2,7	Pouco resistente e pequenos nódulos de carbonato de cálcio
A04	1	Clara	3,2	Resistente, compacta e pequenos nódulos de carbonato de cálcio
A05	1	Clara	3,7	Pouco resistente e pequenos nódulos de carbonato de cálcio
A06	1	Clara	3,5	Pouco resistente e pequenos nódulos de carbonato de cálcio

Foi observado que as amostras A01 e A04 são semelhantes na cor e nas características visíveis, apresentam pontos pretos e nódulos de carbonato de cálcio e são compactas e resistente quanto à desagregação manual, no entanto, são diferentes no número de camadas e espessura. Observa-se uma semelhança também nas amostras A02 e A03 quanto à espessura, número de camadas, aspecto pouco resistente e presença de pequenos nódulos de carbonato de cálcio, porém na cor elas se divergem. A amostra A02 é a única que apresenta uma coloração diferente das demais, de castanho claro, justificando a presença de argila (barro) nessa argamassa, como será apresentado em seu resultado de FRX e DRX. E as amostras A05 e A06 são semelhantes na cor, número de camadas, espessura e aspectos característicos visíveis.

Esses nódulos de carbonato de cálcio visíveis nas amostras indicam, de acordo com Yaseen et al., (2013) que a cal não sofreu hidratação completa, isto é, sua hidratação foi com uma quantidade mínima de água, ou pode estar relacionado ainda a mistura insuficiente da massa de cal ou a uma re-precipitação do carbonato de cálcio de acordo com Veiga (2017). E os pontos pretos visíveis são justificados como resíduos de carvão oriundo do processo de fabricação da cal que podem ter sido incorporados na argamassa, conforme Sousa (2014).

4.1.2 Fluorescência de raios-X

Os resultados da fluorescência de raios-X (FRX) das amostras são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: FRX das argamassas da Usina.

Elementos	A01 (%)	A02 (%)	A03 (%)	A04 (%)	A05 (%)	A06 (%)
Ca	66,671	66,220	65,656	73,617	63,449	59,427
Si	14,379	12,295	13,621	10,928	15,459	14,575
Fe	7,018	13,921	6,165	5,335	7,531	6,446
Mg	3,419	-	3,528	2,858	1,575	5,416
Al	2,650	-	4,690	2,214	3,679	3,911
K	1,691	3,531	1,500	1,968	3,001	2,635
Zr	1,344	1,594	2,567	1,402	4,206	4,806
Ti	0,977	1,671	1,403	0,916	-	1,412
S	0,829	-	-	-	-	-
Sr	0,41	0,408	0,621	0,695	0,914	0,885
Y	-	-	0,166	-	-	0,193
Cu	-	-	-	-	-	0,087
Mn	0,081	0,287	0,084	0,065	0,135	0,131
Zn	0,441	0,074	-	-	0,051	0,079

As argamassas em sua totalidade apresentaram na análise de FRX o cálcio como elemento em maior quantidade, seguido da sílica e do ferro. O alto teor de cálcio aponta, de acordo com Yaseen et al., (2013), que as argamassas coletadas na Usina Ilha Bela são ricas em cal. E o teor elevado de sílica indica a presença de areia como agregado silicioso, que foi constatada diante a desagregação do material.

As argamassas A01, A03, A04, A05 e A06 apresentaram em seus resultados de FRX maior porcentagem de cálcio, seguido de sílica e ferro. Essas amostras apresentaram ainda magnésio, alumínio, potássio, zircônio, estrôncio, manganês, titânio (exceto para a amostra A05) e zinco (exceto para as amostras A03 e A04), o que sinaliza provavelmente a presença de argila nessas argamassas, como será confirmado nos resultados de difração de raios-X. Além dos elementos citados, foram identificados ainda, o enxofre na argamassa A01, o cobre na argamassa A06, e o ítrio nas argamassas A03 e A06.

A amostra interna A02 foi a argamassa que teve maior divergência quanto à composição química das demais, pois não apresentou magnésio e alumínio em seu resultado de FRX e depois da cal, o próximo elemento em maior quantidade é o ferro. Essa expressiva porcentagem de ferro, indica a presença do composto hematita, como será apresentado nos resultados de difração de raios-X, e explica a particularidade da cor mais escura dessa amostra quando comparada as demais,

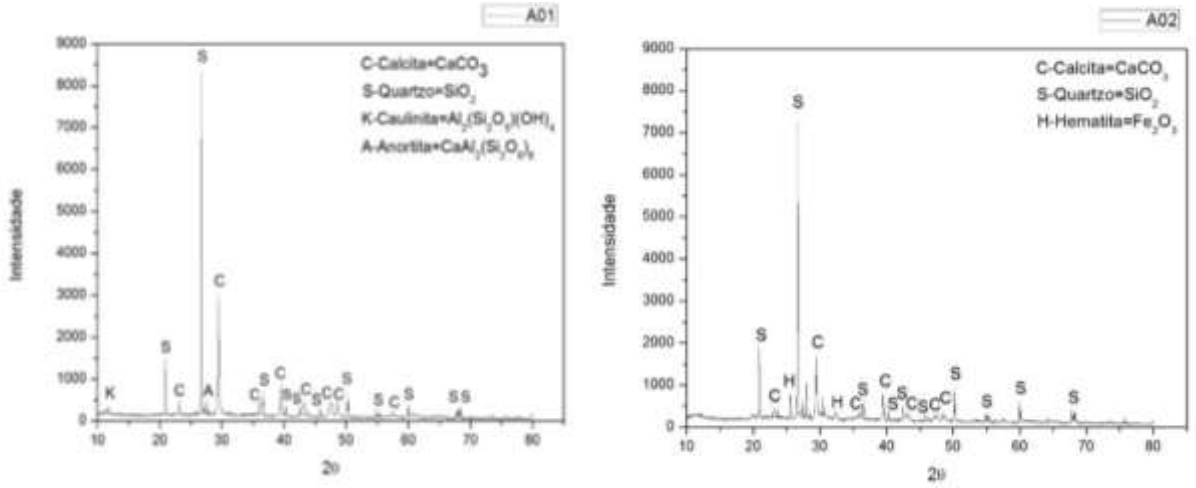
visto que, conforme Tavares (2009) e Veiga e Velosa (2008), a hematita confere as argamassas a cor vermelha.

Fazendo uma comparação dos resultados de FRX para as amostras de argamassa de revestimento externo, (A01, A03 e A05) pode-se observar que estas amostras apresentaram semelhança quanto à composição química, identificando o elemento com maior quantidade, o cálcio, e posteriormente, a sílica e o ferro. Já comparando os resultados de FRX das amostras de revestimento interno (A02, A04 e A06) pode-se observar uma semelhança maior entre as argamassas A04 a A06, uma vez que estas apresentaram além do cálcio, como elemento em maior quantidade, a sílica como elemento subsequente. E a amostra A02 apresentou depois do cálcio, o próximo elemento em termos de quantidade, o ferro, demonstrando uma diferença em sua composição química, equiparado às demais amostras de revestimento interno.

Portanto, a análise da composição química das argamassas utilizando o FRX revela que a cal e a sílica são os principais constituintes dessas argamassas, e que estas têm como estrutura a cal e um agregado silicioso, de acordo com Damas et al., (2018) e Bartz et al., (2012). Esses elementos constituintes também foram encontrados por Sousa (2014) em argamassas antigas do prédio do Grupo Escolar Augusto Severo, existente em região circunvizinha e do mesmo período de construção da Usina Ilha Bela.

4.1.3 Difração de raios-X

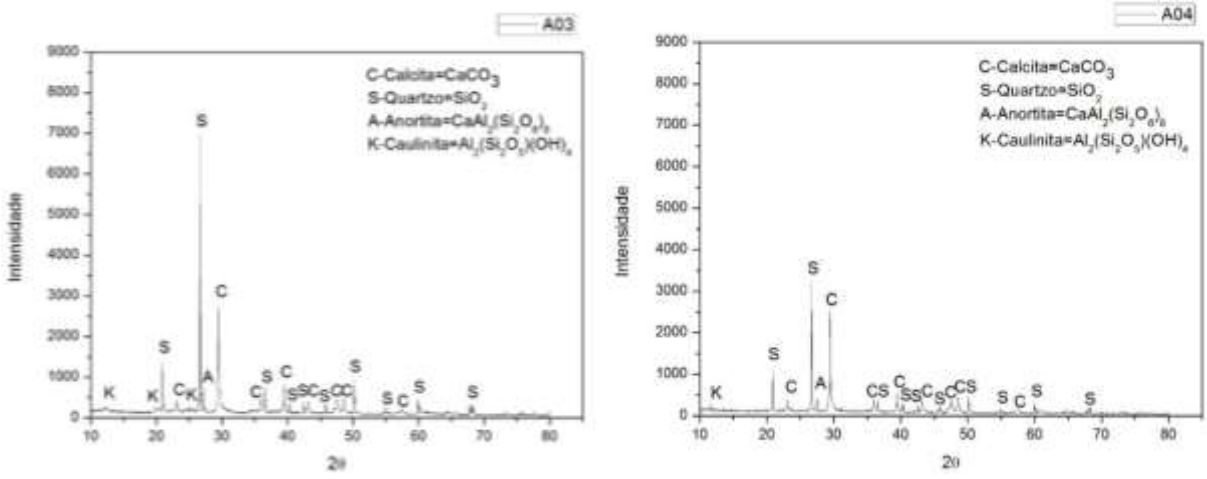
A análise dos difratogramas (DRX) das argamassas estão representados nas Figuras 4.7 a 4.9. Foi possível identificar em todas as argamassas analisadas o carbonato de cálcio de natureza calcita (C) e sílica na forma de quartzo (Q).



(a) (b)

Figura: 4.7 – a) Difratograma da argamassa A01; b) Difratograma da argamassa A02.

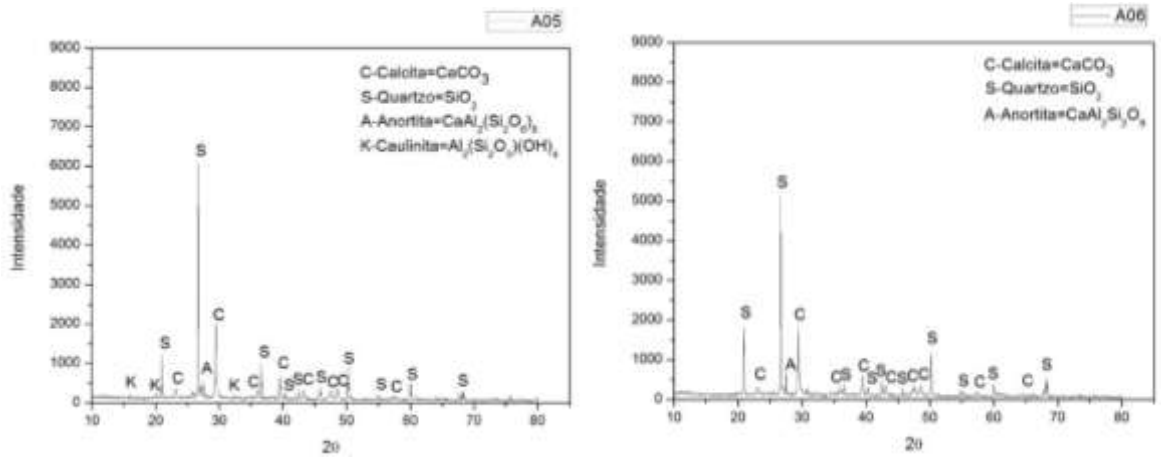
Fonte: Autor (2019).



(a) (b)

Figura: 4.8 – a) Difratograma da argamassa A03; b) Difratograma da argamassa A04.

Fonte: Autor (2019).



(a) (b)

Figura: 4.9 – a) Difratograma da argamassa A05; b) Difratograma da argamassa A06.

Fonte: Autor (2019).

Como pode-se observar, as composições mineralógicas identificadas em todas as argamassas são coerentes e adicionais aos resultados da análise de FRX de cada amostra, apresentados na Tabela 4.2.

O difratograma das argamassas (A01, A03, A04, A05 e A06), apresentaram resultados semelhantes, corroborando com o FRX destas. Os picos predominantes detectados correspondem ao quartzo (Q), à calcita (C) e, em menor intensidade, anortita (A) e caulinita (K), com exceção da A06. A caulinita, de acordo com Damas et al., (2018), pode ser confirmada pelo uso de areia não lavada na composição da argamassa, e, consoante com Sousa (2014), indica a presença de argila na argamassa. A existência de anortita, pode ser explicada devido a presença de cálcio e magnésio (ARAÚJO, 2017). Segundo Lavat, Trezza e Poggi (2009), a anortita é um produto resultante da calcinação de argilas bentoníticas, usadas como matérias primas na presença de calcita.

Já no resultado do difratograma da argamassa A02, é identificado o surgimento de hematita (H), além dos picos predominantes correspondentes ao quartzo (Q), à calcita (C). O aparecimento desse composto hematita, ratifica a existência da intensa quantidade de ferro nessa amostra e sua peculiar coloração, como já citado em seu resultado de FRX, tornando-a diferente das demais amostras de argamassa da Usina.

Na Tabela 4.3 estão apresentadas as argamassas conforme a identificação dos compostos cristalinos e sua intensidade, de acordo com os resultados do DRX.

Tabela 4.3: Composição mineralógica das argamassas por DRX e sua intensidade.

Compostos Cristalinos	A01	A02	A03	A04	A05	A06
Calcita	++	++	++	++	++	++
Quartzo	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Caulinita	+	-	+	+	+	-
Anortita	+	-	+	+	+	+
Hematita	-	+	-	-	-	-

Convenção: +++: intensidade forte; ++: intensidade média; +: intensidade fraca; - = não detectado.

Fazendo uma analogia entre as argamassas, pode-se verificar diante a Tabela 4.3, que as argamassas coletadas da Usina de Ilha Bela têm a calcita como composto químico em mais evidência, todavia, apesar do seu destaque, o composto que aparece com maior intensidade é o quartzo.

Portanto, os resultados de DRX indicaram que a calcita é o principal componente de todas as amostras da argamassa histórica da Usina, sendo ligante, e que o quartzo está presente nos agregados, composição mineralógica essa já encontrada em outros exemplares de argamassas antigas, entre eles por LEZZERINI et al., (2018); DAMAS et al., (2018); HORMES et al., (2016); LEZZERINI et al., (2014); SOUSA (2014); BARTZ et al., (2012); GLEIZE et al., (2009). Há presença ainda, em algumas amostras de argilominerais como a caulinita (Damas et al., 2018) e ambas, caulinita e anortita (GLEIZE et al., 2009).

4.1.4 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG/DTG) permitiu identificar as perdas de massa e os eventos endotérmicos das amostras de argamassas analisadas. As Figuras 4.10 a 4.15 ilustram as curvas TG e DTG de cada amostra de argamassa.

A partir dos dados obtidos de cada TG, foi feita uma análise aplicando o padrão convencional de faixas de temperatura relatado na literatura por Bakolas et al., (1995 e 1998), Bakolas et al., (1995), Moropoulou, Bakolas e Bisbikou (1995 e

2000), Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas e Moropoulou (2003), Ingo et al., (2004) e Genestar, Pons e Más (2006):

- T<120ºC: perda de água adsorvida da argamassa;
- 120-200ºC: perda de água a partir dos sais hidratados;
- 200-600ºC: perda de água quimicamente ligada, que indica à presença de compostos hidráulicos;
- T>600ºC: perda de CO_2 a partir da decomposição dos carbonatos.

A análise termogravimétrica da amostra de argamassa A01, é ilustrada na Figura 4.10.

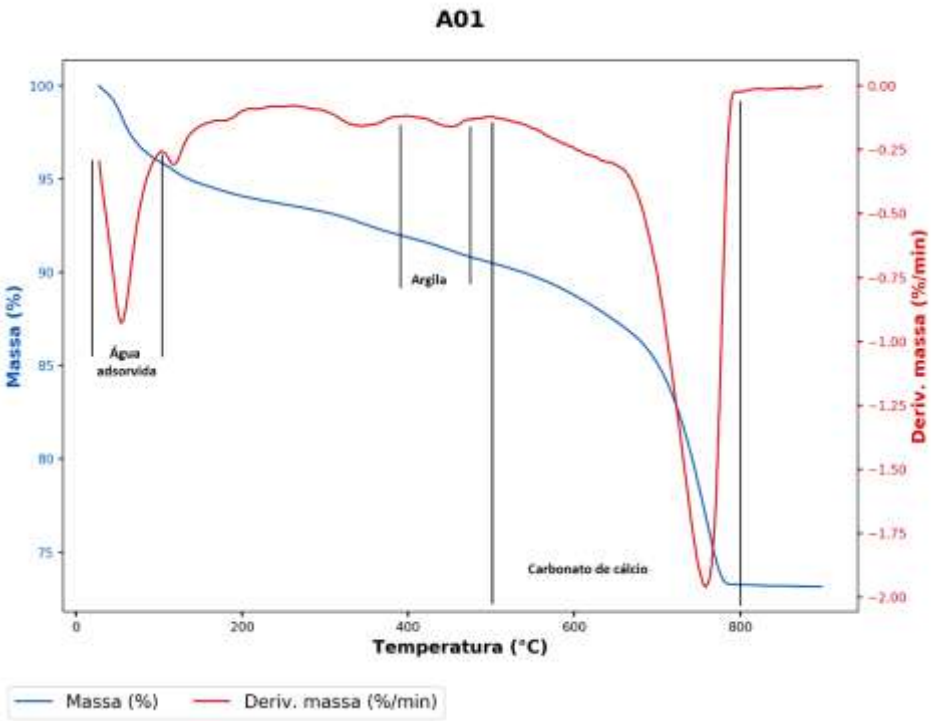


Figura 4.10 – TG/dTG da amostra A01.

Na análise termogravimétrica dessa amostra, observa-se um evento endotérmico bem superficial de desidratação da argila por volta de 450ºC, e um pico de maior intensidade em torno de 750°C, correspondente a decomposição da calcita.

A Figura 4.11 apresenta a análise termogravimétrica da amostra de argamassa A02.

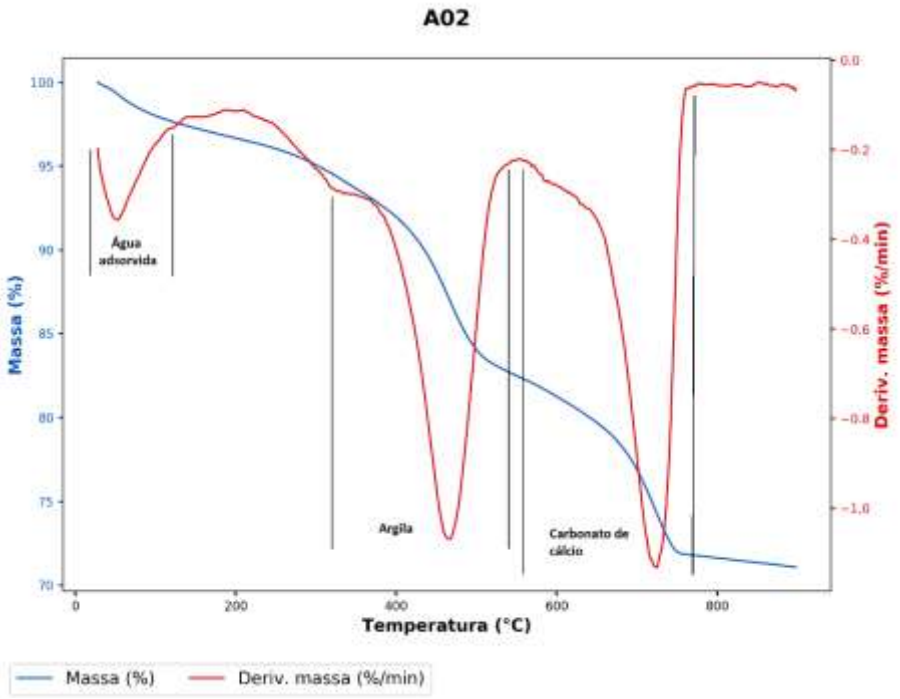


Figura 4.11 – TG/dTG da amostra A02.

Na análise termogravimétrica da amostra A02, pode-se verificar um evento endotérmico de alta intensidade por volta de 450°C, que equivale a desidratação da argila, e um pico de intensidade quase semelhante, em aproximadamente 730°C, que corresponde a decomposição da calcita.

A Figura 4.12, demonstra a análise termogravimétrica da amostra de argamassa A03.

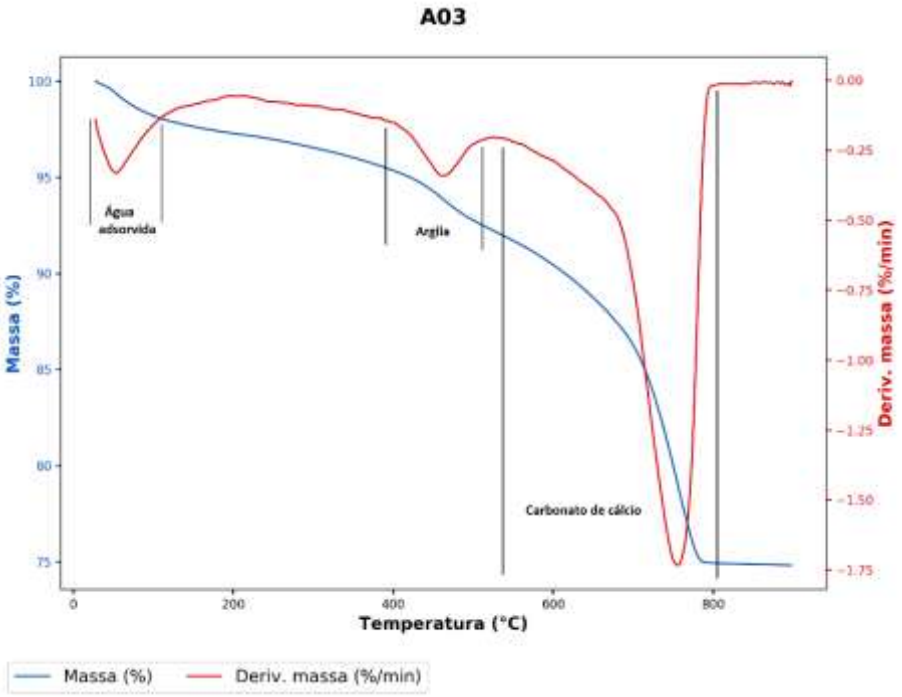


Figura 4.12 – TG/dTG da amostra A03.

Analisando os termogramas da amostra A03, podemos identificar eventos endotérmicos de baixa intensidade em 450°C, que representa a desidratação de argila, e um pico de alta intensidade correspondente a decomposição da calcita, em 750°C.

Na Figura 4.13 é apresentado o termograma da amostra A04.

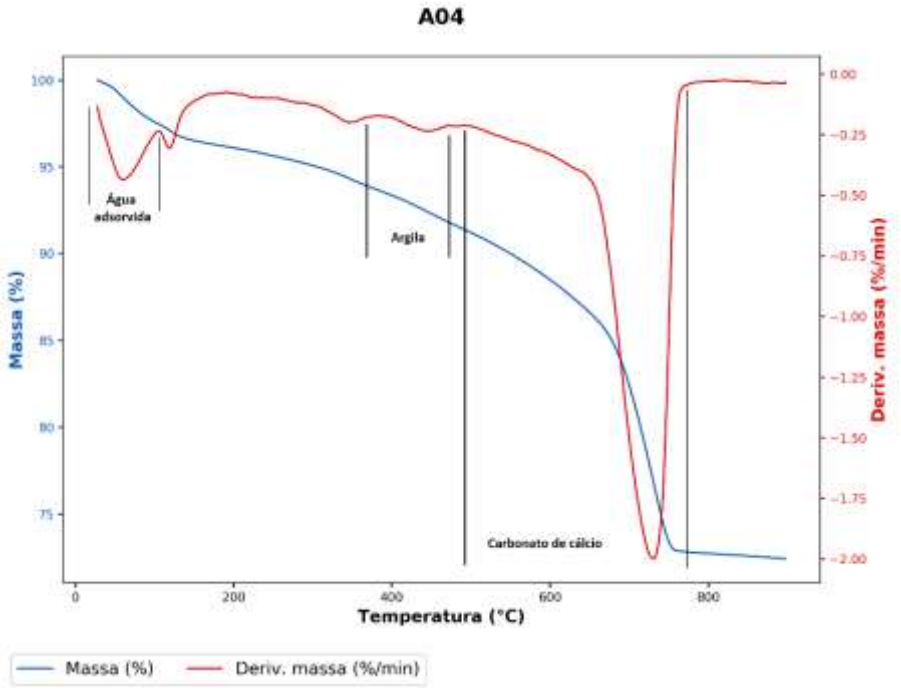


Figura 4.13 – TG/dTG da amostra A04.

Observa-se na análise termogravimétrica da amostra A04 um evento endotérmico de baixa intensidade em 450°C, que equivale a desidratação de argila e um pico de intensidade maior correspondente a decomposição da calcita, em 730°C.

A análise termogravimétrica da amostra de argamassa A05, é ilustrada na Figura 4.14.

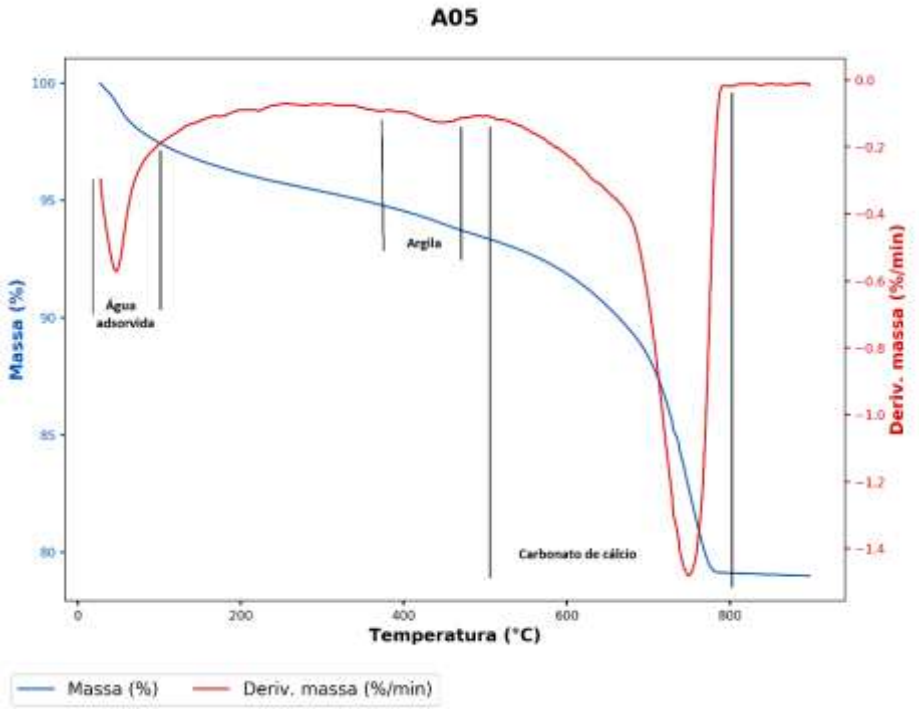


Figura 4.14 – TG/dTG da amostra A05.

Na análise termogravimétrica dessa amostra, observa-se um evento endotérmico bem superficial em 450°C, que indica a desidratação de argila, e um pico de alta intensidade, em 750°C, correspondente a decomposição da calcita.

Na Figura 4.15 é apresentado o termograma da amostra A06.

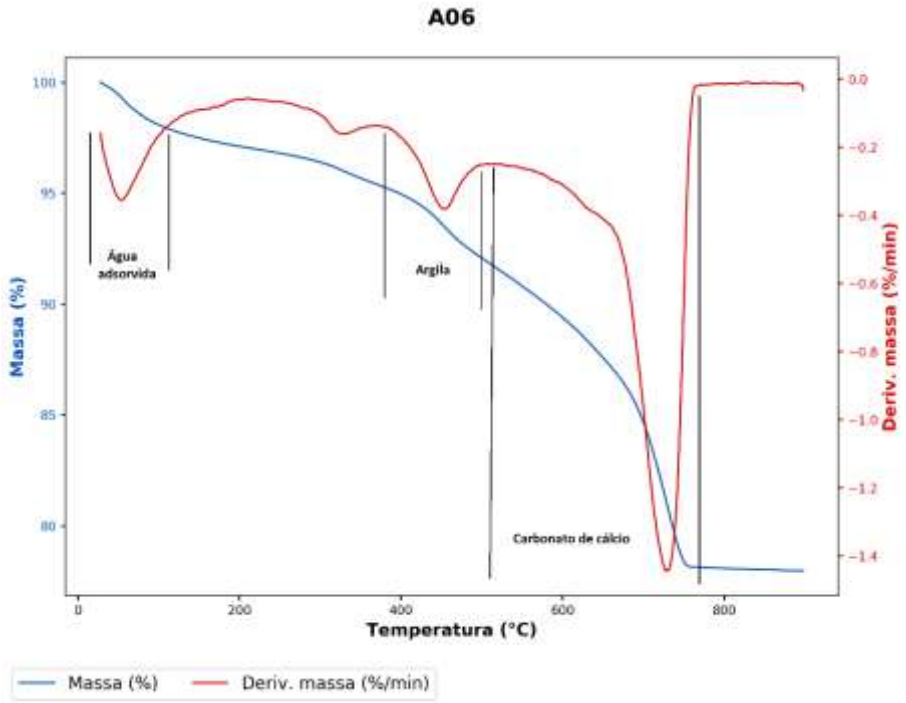


Figura 4.15 – TG/dTG da amostra A06.

Na análise termogravimétrica da amostra A06, é possível identificar um evento endotérmico em 450°C, que indica a desidratação da argila, e um pico de maior intensidade, equivalente a decomposição da calcita, em 730°C.

Diante do resultado de análise termogravimétrica de todas as argamassas é possível identificar eventos que são detectados na curva DTG acompanhados por uma perda de massa apresentada no TG, conforme descrito na literatura por Bakolas et al., (1995 e 1998), Bakolas et al., (1995), Moropoulou, Bakolas e Bisbikou (1995 e 2000), Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas e Moropoulou (2003), Ingo et al., (2004) e Genestar, Pons e Más (2006).

Foram detectados três eventos com suas perdas de massa para todas as amostras. O primeiro evento no intervalo de 50 a 120°C, indica uma perda de massa pertinente à água fisicamente adsorvida ao material. No intervalo de 350°C a 550°C aparece outro evento, que está relacionado a desidratação de argila ou de alguns argilominerais, como a caulinita, oriundos de impurezas presente na areia ou na cal utilizada na argamassa. E a partir de 600°C, são os eventos relacionados a presença de carbonatos, ou seja, quando acontece a decomposição de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), como a calcita.

O termograma das argamassas (A01, A03, A04, A05 e A06), apresentaram resultados semelhantes, corroborando com o FRX e DRX destas. Foi possível observar um pico de pequena intensidade que indica uma perda em pequena quantidade de massa, entre 350 e 550°C, representando a desidratação de argilominerais, do tipo caulinita, e um pico de alta intensidade, no intervalo de 730 a 750°C, que indica a perda de dióxido de carbono em decorrência da decomposição de $CaCO_3$, do tipo calcita, como observado nos resultados de DRX dessas amostras. Eventos térmicos esses também identificados por Damas et al., (2018) e Sousa (2014) em suas pesquisas. Damas et al., (2018) explica ainda que a presença de minerais argilosos pode ser justificada pelo uso de areias não lavadas.

O termograma da argamassa A02 se diferenciou dos demais, apresentando resultado condizente com o que já foi observado em seu resultado de DRX e FRX. Foi possível identificar em sua análise termogravimétrica um pico de alta intensidade, quando comparado com as demais argamassas, no intervalo de 350 a 550°C, que representa a desidratação em grande quantidade de argila, do tipo ferro, ratificando, portanto, a presença desse material na amostra. Esse é um dos argilominerais presente na composição da argila, e que aparece em forma de hematita somente nessa amostra. Observou-se ainda, um pico de intensidade semelhante, em 750°C, que indica a perda de dióxido de carbono devido a decomposição de $CaCO_3$, do tipo calcita, como observado nos resultados de DRX dessa amostra.

Perante os resultados vistos de TG, as argamassas A01, A03, A04, A05 e A06 podem se classificar em argamassas de cal e areia, e a A02 em argamassas de cal, areia e argila, conforme Damas et al., (2018), Botas, Veiga e Velosa (2017), Sousa (2014) e Veiga (2006) citam em suas pesquisas.

A partir das porcentagens de perda de carbonato de cálcio observadas em cada amostra pelo termograma, calculou-se a porcentagem de agregado e deste modo, foi possível estimar o teor aglomerante/agregado (traço), como apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Estimativa de porcentagem dos materiais e do teor aglomerante/agregado das argamassas da Usina Ilha Bela pelo resultado da TG.

Amostra	%$CaCO_3$	%Agregado	Aglomerante/agregado
A01	18%	82%	1:4,5
A02	10%	90%	1:9
A03	18%	82%	1:4,5
A04	19%	81%	1:4,3
A05	14%	86%	1:6,1
A06	14%	86%	1:6,1

Observa-se que o traço das amostras (A01, A03, A04, A05 e A06) apresentaram valores mais próximos, confirmando a semelhança entre essas amostras, sendo as amostras A01, A03 e A04 com o traço de 1:4 e as amostras A05 a A06 com traço de 1:6. Enquanto a amostra A02 apresentou o valor de traço mais distante, de 1:9 confirmando mais uma vez a diferença desta amostra quando comparada as demais.

4.1.5 Teor de aglomerante e agregado

Os teores de aglomerante das amostras de argamassas antigas da usina Ilha Bela foram encontrados também por outro método, além da estimativa por análise termogravimétrica.

Por meio de adaptação de tratamento térmico com dissolução em ácido clorídrico, o ataque do ácido na amostra de argamassa permitiu a obtenção da porcentagem de aglomerante de cada amostra (resíduo solúvel) e, por conseguinte, conceber outra estimativa de teor aglomerante:agregado (traço) (DAMAS et al., 2018; KANAN, 2008; MOTTA, 2004).

Na Tabela 4.5 estão apresentadas as porcentagens de aglomerante encontradas pela técnica do ataque ácido, fazendo uma comparação com a porcentagem de aglomerante obtidas pela análise termogravimétrica para as argamassas da Usina estudadas.

Tabela 4.5: Estimativa de percentagem do teor aglomerante das argamassas da Usina Ilha Bela pela TG e pelo ataque ácido.

Amostra	%$CaCO_3$ (TG)	%$CaCO_3$ (Ataque ácido)
A01	18,00%	23,30%
A02	10,00%	10,77%
A03	18,00%	10,97%
A04	19,00%	20,27%
A05	14,00%	13,98%
A06	14,00%	12,10%

Pode-se constatar, que o teor de ligante em porcentagem para cada uma das amostras por determinação com ataque de ácido apresentou, em sua maioria, resultado semelhante ao obtido pela análise termogravimétrica, o que ratifica a quantidade de aglomerante nessas amostras. Com exceção das amostras A01 e A03 que apresentaram um pouco de divergência em seus valores. Não foi possível explicar esse comportamento inesperado.

Na Tabela 4.6 estão apresentadas as relações aglomerante:agregado em peso, encontrados pela técnica do ataque ácido, a partir do teor de aglomerante e de agregado.

Tabela 4.6: Estimativa da quantidade (g) do agregado e aglomerante e do teor aglomerante:agregado das argamassas da Usina Ilha Bela.

Amostra	Aglomerante (g)	Agregado (g)	Aglomerante/ agregado	Aglomerante/ agregado equivalentes
A01	12,433	37,000	1:3,3	1:3
A02	5,367	44,433	1:8,2	1:8
A03	5,467	44,367	1:8,1	1:8
A04	10,000	39,333	1:3,9	1:4
A05	6,933	42,633	1:6,1	1:6
A06	6,033	43,833	1:7,2	1:7

Esses dados reafirmam a similaridade entre as argamassas analisadas, como já relatado no item 4.1.4, excetuando-se a amostra A03 que apresentou uma maior divergência, correlacionando este com os seus resultados anteriores.

As amostras A01 e A04 apresentaram um teor de aglomerante:agregado de 1:3 e 1:4, respectivamente, cujos traços são mais resistentes, atestando quanto ao aspecto resistente e compacto à desagregação manual, quando da observação

visual destas argamassas. A amostra A03 apresentou um traço em peso de 1:8, valor bem mais alto comparado ao traço obtido pela TG, mas, que certifica a análise visual dessa amostra, que indica um aspecto pouco resistente à desagregação à mão. A amostra A02, apresentou semelhança com a A03, com traço de 1:8, confirmando a observação visual dessa argamassa que exibe um aspecto pouco resistente e quebradiço à desagregação manual. Enquanto que as amostras A05 e A06 apresentaram teor de aglomerante/agregado de aproximadamente 1:6 e 1:7, conferindo um traço menos resistente que as amostras A01 e A04 e consequentemente, um aspecto menos resistente à desagregação manual dessas argamassas, como observado na análise visual.

Na Tabela 4.7 pode-se observar a relação aglomerante/agregado encontrado para as argamassas da Usina pelos métodos de análise termogravimétrica (TG) e determinação por ataque ácido.

Tabela 4.7 – Relação aglomerante:agregado das argamassas pelos métodos TG e ataque ácido.

Amostra	**Aglomerante:agregado**	
	TG	**Ataque ácido**
A01	1:4,5	1:3
A02	1:9	1:8
A03	1:4,5	1:8
A04	1:4,3	1:4
A05	1:6,1	1:6
A06	1:6,1	1:7

Portanto, analisando estes valores em termos de traço, é possível considerar que existem três tipos de argamassa na usina, em que a composição de aglomerante e agregados é semelhante, que são o traço (1:3) para as amostras A01 e A04, outro (1:8) para as amostras A02 e A03 e um terceiro traço (1:6) para as amostras A05 e A06.

4.1.6 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria do agregado presente nas amostras de argamassa antiga da usina Ilha Bela foi realizado a partir da amostra obtida após o ensaio de determinação do teor de aglomerante por ataque ácido.

A distribuição granulométrica do agregado silicioso, a areia, para cada prédio em análise da usina, está apresentada nas Tabelas 4.8 a 4.10, com suas respectivas massas retidas e porcentagem retida acumulada de cada peneira.

Tabela 4.8: Distribuição granulométrica do agregado das amostras do prédio administrativo, A01 (revestimento externo) e A02 (revestimento interno).

Diâmetro da peneira (mm)	Amostra A01		Amostra A02	
	Massa retida (g)	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida acumulada
4,8	0	0,00	0,14	0,10
2,36	0,16	0,15	2,35	1,87
1,18	3,96	3,75	9,92	9,33
0,6	13,57	16,09	23,53	27,02
0,3	29,88	43,28	39,95	57,06
0,15	32,05	72,44	33,93	82,57
0,075	20,27	90,88	18,7	96,63

Tabela 4.9: Distribuição granulométrica do agregado das amostras da balança da usina, A03 (revestimento externo) e A04 (revestimento interno).

Diâmetro da peneira (mm)	Amostra A03		Amostra A04	
	Massa retida (g)	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida acumulada
4,8	0	0,00	0,38	0,33
2,36	0,86	0,65	0,71	0,94
1,18	7,13	6,02	6,3	6,34
0,6	19,62	20,79	16,9	20,85
0,3	40,82	51,53	31,46	47,86
0,15	41,72	82,94	31,33	74,75
0,075	17,88	96,41	20,51	92,36

Tabela 4.10: Distribuição granulométrica do agregado das amostras do prédio da fábrica da usina, A05 (revestimento externo) e A06 (revestimento interno).

Diâmetro da peneira (mm)	Amostra A05		Amostra A06	
	Massa retida (g)	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida acumulada
4,8	0	0,00	0	0,00
2,36	1,58	1,25	1,84	1,41
1,18	7,62	7,30	10,34	9,32
0,6	17,13	20,88	21,07	25,45
0,3	28,97	43,86	35,81	52,85
0,15	32,89	69,95	32,93	78,06
0,075	25,2	89,94	20,88	94,04

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 4.8 a 4.10, observa-se que o agregado silicioso, a areia, possui maior quantidade de grãos de 0,15 a 0,075mm de diâmetro, chegando a mais de 80%, indicando, dessa forma, que o agregado mais presente na composição da areia da argamassa da usina é um agregado fino.

Na Figura 4.16 estão ilustradas as curvas granulométricas de cada amostra de argamassa da usina.

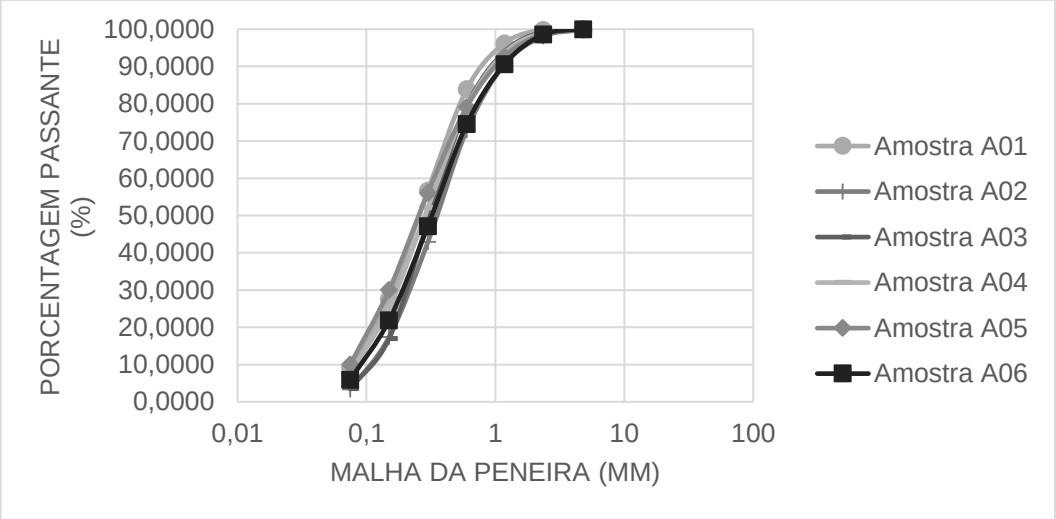


Figura 4.16 – Curvas granulométricas da areia de todas as amostras da usina.
Fonte: Autor (2019).

Nota-se que as curvas granulométricas são praticamente paralelas, ou seja, apresentam aproximadamente a mesma distribuição de grãos e exibem característica de distribuição de grão predominante contínua.

Para classificação dos agregados siliciosos, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), foram calculadas as propriedades físicas a partir da análise das curvas granulométricas (Figura 4.16), que estão indicadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Propriedades físicas do agregado.

Propriedades físicas	**Agregado miúdo**					
	A01	**A02**	**A03**	**A04**	**A05**	**A06**
Diâmetro máximo (mm)	1,18mm	2,36mm	2,36mm	2,36mm	2,36mm	2,36mm
Módulo de finura (Mf)	1,36	1,78	1,62	1,51	1,43	1,67

Como pode ser aferido na Tabela 4.11, o diâmetro máximo (mm) para todas as amostras de argamassa é o mesmo, 2,36mm, exceto para a amostra A01 que apresentou um diâmetro máximo menor, de 1,18mm. Esse diâmetro máximo significa a dimensão máxima que essa amostra de agregado possui, ou seja, a A01 possui grãos com diâmetros menores comparado as demais amostras.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.11, o valor do Mf apresentou uma variação entre as amostras das argamassas, verificando-se que as amostras A02, A03 e A06 encontram-se na zona aceitável de utilização e são classificadas como areia fina, e as outras amostras, A01, A04 e A05 encontram-se fora da zona utilizável inferior, classificando-se como areia muito fina, pois apresentaram Mf mais baixos, o que representa um solo mais fino.

Portanto, da análise destes valores em relação ao agregado, pode-se concluir que em todas as amostras coletadas há presença de uma quantidade predominante de agregado miúdo classificado como areia de quartzo fina ou muito fina, de acordo com o módulo de finura obtido e os resultados de FRX e DRX.

4.1.7 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão é uma propriedade que indica o volume de poros permeáveis de um corpo sólido poroso. As Figuras 4.17 a 4.20 apresentam os resultados do ensaio para obtenção da absorção de água por imersão por prédio da Usina.

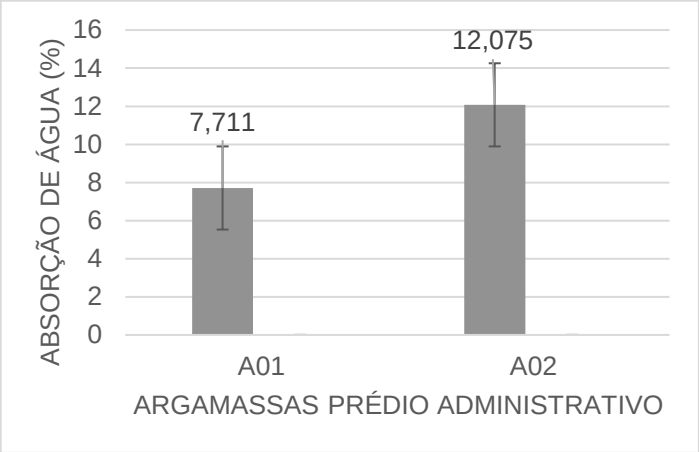


Figura 4.17 – Absorção de água por imersão das amostras do prédio administrativo da Usina.

Fonte: Autor (2019).

Diante o resultado de absorção na Figura 4.17, para as argamassas do prédio administrativo (amostras A01 e A02), pode-se observar que a amostra A01 foi a que apresentou menor absorção de água por imersão, ou seja, possui um menor volume de poros permeáveis. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de teor de ligante no traço da amostra A01, que a A02, e também pelo valor menor do módulo de finura, que indica o uso de areias mais finas, o que contribui para a redução da porosidade e da absorção de água da argamassa.

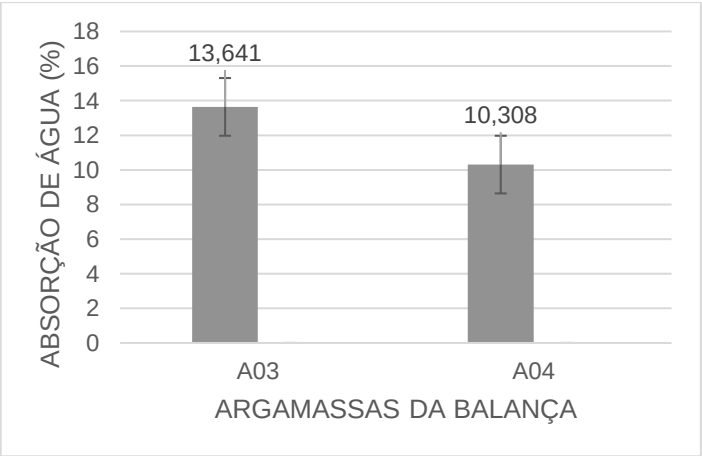


Figura 4.18 – Absorção de água por imersão das amostras da balança da Usina.

Fonte: Autor (2019).

Observando o resultado da Figura 4.18, sobre a absorção para as argamassas da balança da Usina, amostras A03 e A04, é possível aferir mais uma vez que a amostra que pertence a um traço mais rico em aglomerante e que apresentou um módulo de finura do agregado menor, a amostra A04, apresenta menor valor de absorção de água por imersão comparado a A03.

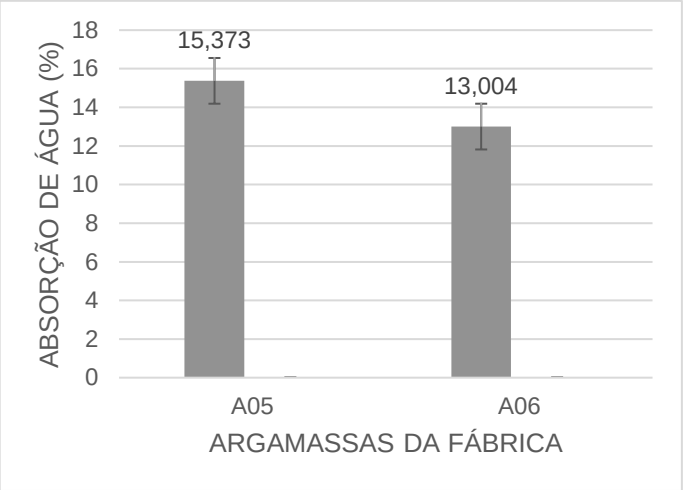


Figura 4.19 – Absorção de água por imersão das amostras da fábrica da Usina.
Fonte: Autor (2019).

Na Figura 4.19 estão apresentados os valores de absorção para as amostras da Fábrica da Usina (A05 e A06) são próximos, tendo em vista que o traço dessas amostras é semelhante, 1:6 e 1:7, respectivamente. Porém, diferente dos resultados anteriores, mesmo a amostra A05 sendo mais rica em ligante e com menor módulo de finura, esta apresentou um valor maior de absorção de água do que a A06.

Fazendo ainda uma analogia entre todas as argamassas estudadas, através da Figura 4.20, onde são ilustrados os resultados de absorção de água por imersão para todas as amostras.

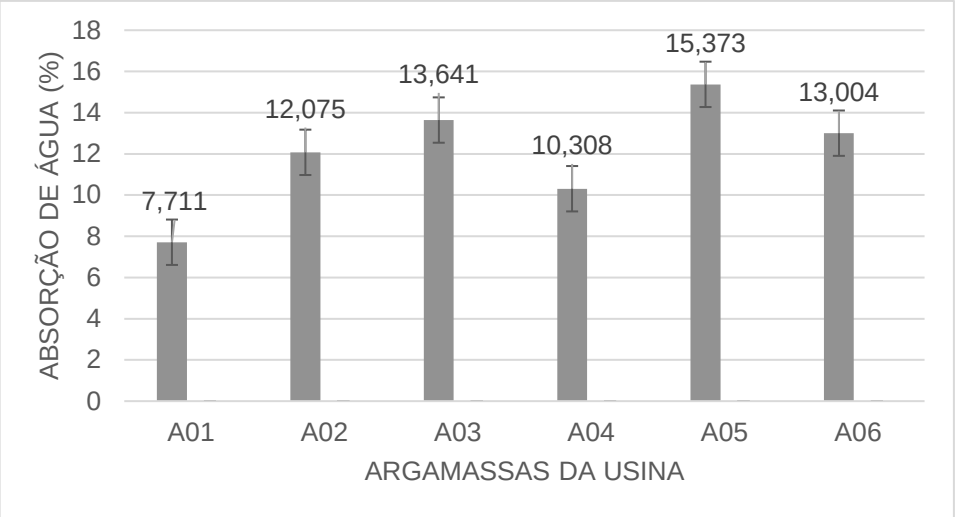


Figura 4.20 – Absorção de água das amostras de argamassas da usina.
Fonte: Autor (2019).

Pode-se considerar, diante da análise dos dados, que as amostras A01 e A04 são as argamassas que apresentaram menor valor de absorção de água por imersão, o que indica que essas argamassas possuem menor volume de poros permeáveis, condizente com seus resultados anteriores, de argamassas com traço mais rico em ligante, pois, de acordo com a literatura, o aumento do teor de cal no traço de uma argamassa proporciona uma redução de poros nesta (ORTEGA et al., 2018). Silva, Pinto e Gomes (2014) ratificam ainda que o aumento de teor de ligante na quantidade de mistura de cal hidráulica natural implicará na diminuição da porosidade e a absorção de água da argamassa.

A amostra A01 pertencente ao revestimento externo do prédio administrativo da Usina foi a que apresentou a menor absorção de água, o que pode ser explicado pelo traço dessa amostra, que é o mais abundante em cal, e ainda, pelo módulo de finura, pois é a argamassa que tem menor módulo, o que demostra o emprego de areia mais fina nessa argamassa, e de acordo com Cavaco (2005), isso colabora para que haja redução da porosidade e da absorção de água da argamassa.

4.1.8 Resistência à compressão

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores relacionados ao ensaio de resistência à compressão, como a carga de ruptura, resistência à compressão sem o fator de correção, e o valor de resistência à compressão considerando o fato de correção para cada amostra.

Tabela 4.12: Dados do ensaio de resistência à compressão das argamassas da Usina Ilha Bela.

Amostras das argamassas da Usina	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência à compressão sem fator de correção (MPa)	Fator de correção	Resistência à compressão com fator de correção (MPa)
A01	5450,0	32,8	0,778	25,5
A02	981,7	5,9	0,775	4,6
A03	520,0	3,1	0,785	2,5
A04	2226,7	13,4	0,831	11,1
A05	780,0	4,7	0,849	3,9
A06	680,0	4,1	0,782	3,2

Os resultados de resistência à compressão são apresentados ainda nas Figuras 4.21 a 4.24 que exibem os valores de resistência à compressão para as argamassas de revestimento externo e interno, respectivamente, para análise individualmente de resistência à compressão de cada prédio da Usina.

Na Figura 4.21 são apresentados os valores de resistência à compressão para as amostras de argamassa do Prédio Administrativo da Usina, A01 e A02.

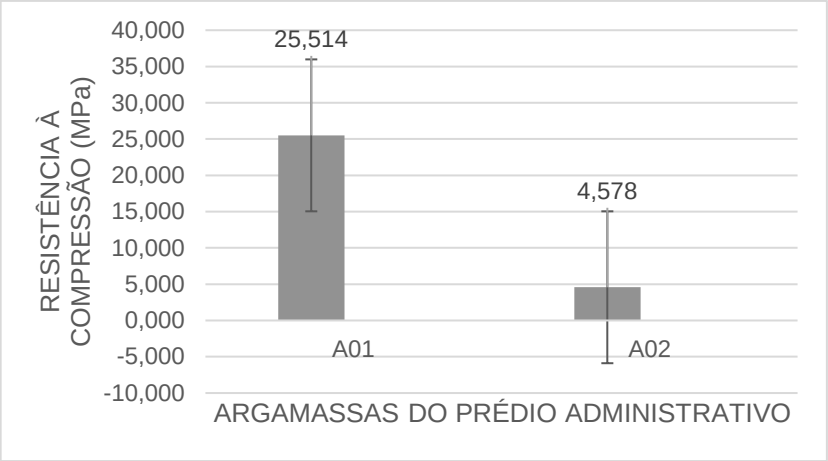


Figura 4.21 – Resistência à compressão das argamassas do Prédio Administrativo.
Fonte: Autor (2019).

Verifica-se que a resistência mecânica é maior para a A01, a amostra de argamassa de revestimento externo do prédio. E, de acordo com os resultados anteriores, a explicação se deve ao alto teor de ligante do traço dessa amostra, comparado ao traço da amostra A02 que é mais fraco, e também ao módulo de finura que é menor para a A01.

Na Figura 4.22 estão apresentados os valores de resistência à compressão para as amostras de argamassa da Balança da Usina, A03 e A04.

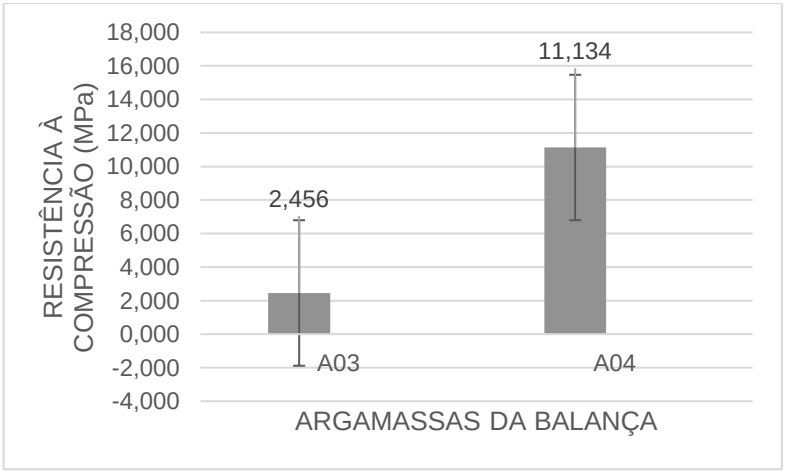


Figura 4.22 – Resistência à compressão das argamassas da Balança.
Fonte: Autor (2019).

Mais uma vez, verifica-se que a resistência mecânica é maior para a argamassa que é mais rica em ligante e com menor módulo de finura, a amostra A04, que pertence a argamassa de revestimento interno da Balança.

Na Figura 4.23 estão apresentados os valores de resistência à compressão para as amostras de argamassa da Fábrica da Usina, A05 e A06.

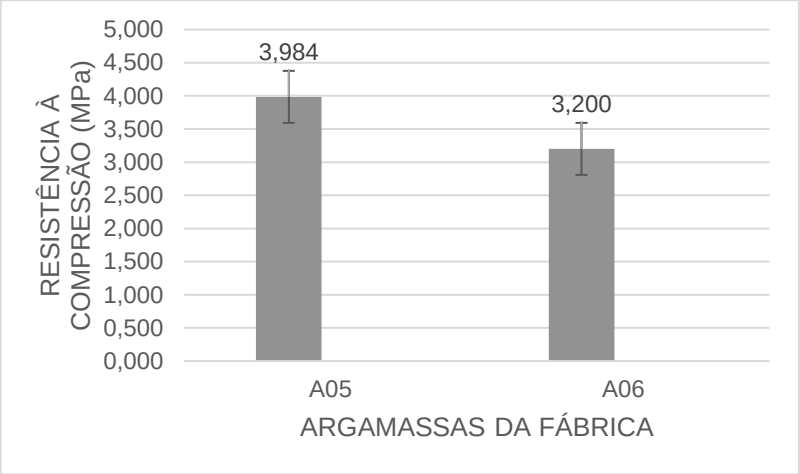


Figura 4.23 – Resistência à compressão das argamassas da Fábrica.
Fonte: Autor (2019).

Observando a Figura 4.23, é possível identificar mesmo que em uma pequena diferença das amostras, que novamente o valor de resistência mecânica é maior para a amostra que possui menor módulo de finura e um traço mais forte em ligante, a amostra A05, pertencente a argamassa de revestimento externo da Fábrica.

A Figura 4.24 apresenta os valores de resistência à compressão para todas as argamassas da Usina.

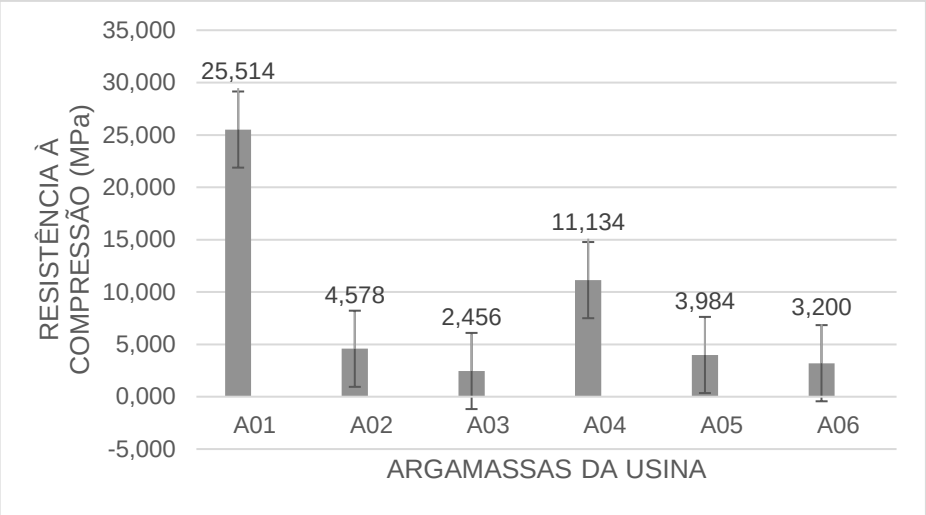


Figura 4.24 – Resistência à compressão das amostras de argamassas da Usina.
Fonte: Autor (2019).

Fazendo uma análise dos valores de resistência mecânica de todas as argamassas, é possível identificar que as amostras que apresentaram maiores resistências (A01 e A04) são justamente as argamassas que apresentaram aspecto resistente quando na observação visual e são as argamassas com traço mais rico em ligante, ratificando resultados anteriores. E dentre as seis amostras, a que se destaca é a argamassa A01 por alcançar uma melhor resistência mecânica, que pode ser justificada pelo traço mais forte em ligante, e o menor valor em módulo de finura e diâmetro máximo do agregado. Pois, de acordo com Lanas et al., (2004), agregados com tamanho de grão pequeno demostram uma boa coesão na interface melhorando a resistência.

Portanto, percebe-se que o aumento de ligante em um traço de argamassa confere a esta argamassa uma maior resistência mecânica, o que é reportado na literatura. Damas et al., (2018), Sala et al., (2016), Penas (2008), Lanas et al., (2004), relataram em suas pesquisas que as argamassas que contém uma grande quantidade de ligante exibem uma maior resistência de compressão, ou seja, quanto mais rico o traço em ligante mais elevadas são as resistências.

Relacionando estes resultados ao edifício histórico em estudo, pode-se perceber que as argamassas de revestimento externas de dois dos três prédios analisados, prédio administrativo e prédio da fábrica da Usina, apresentaram uma resistência maior que a argamassa de revestimento interno, devido ao traço dessas

amostras serem mais abundantes em cal, enquanto que a argamassa de revestimento externo do prédio da balança apresentou uma resistência à compressão menor que a argamassa de revestimento interno deste mesmo prédio, o que é justificado pelo seu traço.

A relação entre a resistência à compressão e a absorção de água por imersão das amostras é representada na Figura 4.25.

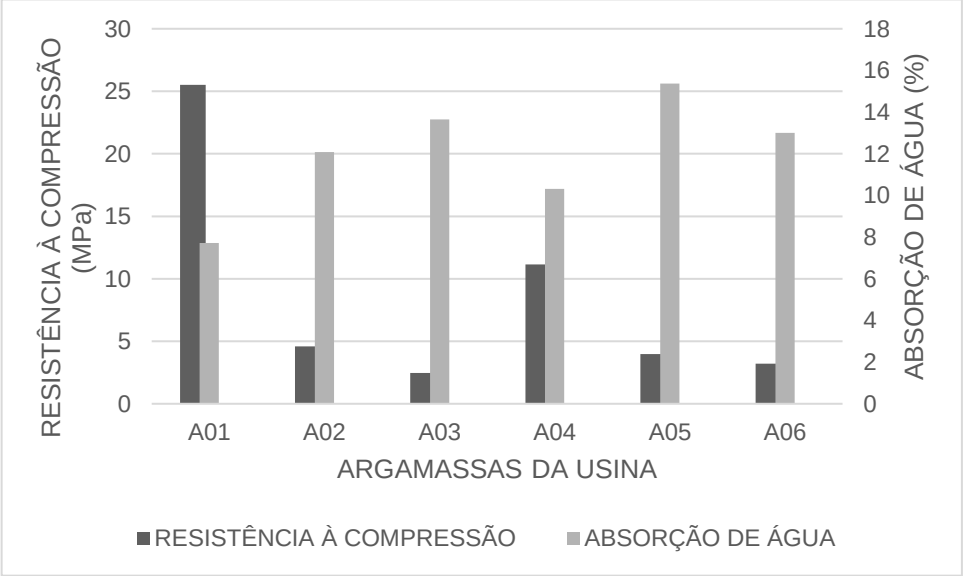


Figura 4.25 – Resistência à compressão vs absorção de água por imersão das argamassas da Usina.

Fonte: Autor (2019).

Fazendo um comparativo da resistência mecânica e absorção de água por imersão para cada amostra, é possível verificar que as argamassas que apresentaram menores valores de absorção de água foram exatamente as que alcançaram um maior valor de resistência, e isso é mencionado na literatura. Segundo Silva, Pinto e Gomes (2014), a porosidade e a absorção de água da argamassa são diminuídas, enquanto exibem maior resistência mecânica precoce.

CAPÍTULO 5

Conclusões

A partir da análise dos resultados experimentais realizados no estudo de caracterização das argamassas de revestimento da Usina Ilha Bela/RN, podem ser obtidas as seguintes conclusões:

- Com a observação visual, constatou-se que todas amostras extraídas da Usina apresentam nódulos de carbonato de cálcio e a maior parte apresenta uma cor clara, com exceção da A02, que tem uma tonalidade castanho claro devido a diferença em sua composição química, comparada as demais. Apresentam semelhança as amostras A01 e A04, na cor e são compactas e resistentes, se divergindo na espessura. As amostras A02 e A03, quanto à espessura, número de camadas e aspecto pouco resistente. E as amostras A05 e A06, na cor, número de camadas, espessura e aspecto pouco resistente.
- Na caracterização química das argamassas antigas da Usina, verificou-se que as argamassas coletadas são ricas em cal, com aglomerante de origem calcítica e areia de origem silicosa, como agregado.
- Além dos principais constituintes, a cal e a areia, as amostras A01, A03, A04, A05 e A06 apresentaram anortita e caulinita, com exceção da A06. A caulinita indica a presença de argila na argamassa. E a anortita, pode ser explicada devido a presença de cálcio e magnésio nas amostras. Enquanto a amostra A02 não apresentou caulinita e anortita, e sim, hematita, o que explica a alta quantidade de ferro nessa amostra, corroborando com a sua coloração escura.
- O termograma das argamassas A01, A03, A04, A05 e A06, apresentaram resultados semelhantes, confirmando o FRX e DRX destas. Foi identificado um pico de pequena intensidade que indica a desidratação de argilominerais, do tipo caulinita, e um pico de alta intensidade, que indica a decomposição de $CaCO_3$, do tipo calcita. Já o termograma da argamassa A02, além do pico de alta intensidade da

decomposição de $CaCO_3$, apresentou outro pico intenso que representa a desidratação em alta quantidade de argila, atestando a presença de argila na composição dessa amostra.

- As argamassas A01, A03, A04, A05 e A06 são constituídas de cal e areia, enquanto a argamassa A02 é constituída de cal, areia e argila.
- Pelos resultados de TG e teor de aglomerante, pode-se considerar que existem três tipos de argamassa na usina, cujas relações aglomerante/agregado são: 1:3 para as amostras A01 e A04, 1:8 para as amostras A02 e A03 e 1:6 para as amostras A05 e A06.
- Na caracterização física das argamassas da Usina, pode-se verificar que o agregado miúdo classificado como areia de quartzo, para as amostras A02, A03 e A06 encontram-se na zona aceitável de utilização e por isso, são classificadas como areia fina, e as amostras, A01, A04 e A05 encontram-se fora da zona utilizável inferior, classificando-se como areia muito fina.
- Quanto a absorção de água, constatou-se que as amostras A01 e A04 apresentaram menor valor de absorção de água por imersão, combinando com os resultados anteriores, pois estas amostras apresentaram traço mais rico em ligante, e segundo a literatura, quanto maior a quantidade de teor de cal no traço de uma argamassa, menor a absorção de água desta, combinando também com o resultado de resistência à compressão.
- A análise de resistência à compressão dessas argamassas existentes, mostrou que as amostras A01 e A04 foram as que exibiram maior valor de resistência, o que é condizente com resultados anteriores, pois foram estas as argamassas que apresentaram aspecto resistente na observação visual e que possuem traço mais rico em ligante.

Portanto, no que se refere a conservação e futura restauração desse patrimônio histórico, pode-se concluir como uma argamassa compatível a argamassa antiga da Usina de Ilha Bela, uma argamassa constituída de cal e areia, na proporção aglomerante:agregado 1:3, com boa resistência à compressão e pouca absorção de água para as argamassas de revestimento externo do prédio

administrativo e revestimento interno da balança; uma argamassa de reparo constituída de cal e areia com traço 1:8, com uma maior absorção de água e apresentando um menor desempenho à resistência à compressão, para as argamassas de revestimento externo do prédio da balança e revestimento interno do prédio administrativo, sendo esta constituída da argila como agregado, além da areia; e uma argamassa de restauro constituída de cal e areia, na proporção de 1:6, apresentando uma resistência à compressão um pouco menor, para as argamassas de revestimento externo da fábrica, com uma maior capacidade de absorção de água por imersão, e para as argamassas de revestimento interno desse mesmo prédio com uma capacidade de absorção de água menor.

Logo, conhecido as características das argamassas existentes da Usina de ilha Bela fica como sugestão para trabalhos futuros o desenvolvimento de uma argamassa de restauro mais compatível possível para execução de uma conservação e manutenção adequada deste patrimônio histórico.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Agregados – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ANDRADE, M. C. **A Civilização Açucareira**. In.: QUINTAS. A civilização do açúcar. Recife: SEBRAE / Fundação Gilberto Freyre, 2007.

ARAÚJO, R. A. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. 95 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

AVDELIDIS, N.P; MOROPOULOU, A. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. **Journal of Cultural Heritage**, v.5, pp. 119-127, 2004.

BAKOLAS, A.; BISCONTIN, G.; MOROPOULOU, A.; ZENDRI, E. Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry. **Thermochimica Acta**, v.269-270, pp. 809-816, dez. 1995.

BAKOLAS, A.; BISCONTIN, G.; MOROPOULOU, A.; ZENDRI, E. Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. **Thermochimica Acta**, v.321, pp.151-160, nov. 1998.

BAKOLAS, A.; BISCONTIN, G.; CONTARDI, V.; FRANCESCHI, E.; MOROPOULOU, A.; PALAZZI, D.; ZENDRI, E. Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice. **Thermochimica Acta**, v.269-270, pp. 817-828, dez. 1995.

BARRERA, M. M. B.; RAMOS, L. M.; BALEN, K. V.; SANTOS, A. G.; GONZÁLEZ, F. J. N. Lime render layers: An overview of their properties. **Journal of Cultural Heritage**, v. 15, pp. 326-330, mai-jun. 2014.

BARTZ, W.; ROGÓZ, J.; ROGAL, R.; CUPA, A.; SZROEDER, P. Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Bożnów (SW Poland). **Construction and Building Materials**, v. 30, p.439-446, mai. 2012.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**, v.1. Revisão técnica João Fernando Dias, 5.ed. revisada [reimpr.], - Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERTRAND, D. **Patrimônio, Memória e Espaço: a construção da paisagem açucareira do Vale do Ceará-Mirim**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em História, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Apostila de Introdução a Difração de raios X em Cristais**. UFC, 2000.

BOTAS, S.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Air lime mortars for conservation of historic tiles: Bond strength of new mortars to old tiles. **Construction and Building Materials,** v. 145, pp.426-434, ago. 2017.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

CARASEK, H. **Argamassas.** Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 863-891.

CAVACO, L. S. R. G. **Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos: Influência no desempenho**. 2005. Dissertação (mestrado) – Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, 2005.

CRUZ, H. et al. Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis method. **Journal of Materials Processing Technology**, v 178, n 1-3, p. 128-134, 2006.

CRUZ, L. H. **Os caminhos do açúcar no Rio Grande do Norte: o papel dos engenhos na formação território potiguar (século XVII ao início do século XX).** 2015. 321 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

DAMAS, A. L.; VEIGA, M. R.; FARIA, P**. Caraterização de argamassas antigas de Portugal – contributo para a sua correta conservação**. In: Congresso Ibero-Americano “Património, suas Matérias e Imatérias”, 2016, LNEC, Lisboa.

DAMAS, A. L.; VEIGA, M. R.; FARIA, P.; SILVA, A. S. Characterisation of old azulejos setting mortars: A contribution to the conservation of this type of coatings. **Construction and Building Materials**, v.171, pp.128-139, mai. 2018.

FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 9, pp. 338-346. 2008.

GARIJO, L.; ZHANG, XX.; RUIZ, G.; ORTEGA, J. J.; WU, Z. The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 169, pp. 325-334, abr. 2018.

GENESTAR, C.; PONS, C.; MÁS, A. Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain). **Analytica Chimica Acta**, v.557, p.373-379, 2006.

GLEIZE, P. JP.; MOTTA, E. V.; SILVA, D. A.; ROMAN, H. R. Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p.342-346, mai. 2009.

HORMES, J.; DIEKAMP, A.; KLYSUBUN, W.; BOVENKAMP, G.-L.; BÖRSTE, N. The characterization of historic mortars: A comparison between powder diffraction and synchrotron radiation based X-ray absorption and X-ray fluorescence spectroscopy. **Microchemical Journal**, v. 125, p.190-195, mar. 2016.

INGO, G.M.; FRAGALÀ, I.; BULTRINI, G.; CARO, T.; RICCUCCI, C.; CHIOZZINI, G. Thermal and microchemical investigation of Phoenician–Punic mortars used for lining cisterns at Tharros (western Sardinia, Italy). **Thermochimica Acta**, v.418, p.53- 60, 2004.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **O Iphan.** Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/>. Acesso em: 30 out. 2017.

SUPERINTENDÊNCIA DO INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL NO RIO GRANDE DO NORTE. **Relatório final referente aos serviços de desenvolvimento do Inventário de Conhecimento dos Engenhos de Açúcar do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte – 1ª etapa.** Natal: IPHAN/RN, 2013.

KANAN, M. I. C. Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos a Base de Cal. **Cadernos Técnicos** 8. IPHAN/Programa Monumenta, Brasília, 2008.

LANAS, J.; BERNAL, J.L.P; BELLO, M. A.; GALINDO, J. I. A. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. **Cement and Concrete Research,** v. 34, p. 2191-2201, dez. 2004.

LAVAT, A. E.; TREZZA, M. A.; POGGI, M. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 5, p.1666-1674, mai. 2009.

LEZZERINI, M.; LEGNAIOLI, S.; LORENZETTI, G.; PALLESCHI, V.; TAMPONI, M. Characterization of historical mortars from the bell tower of St. Nicholas church (Pisa, Italy). **Construction and Building Materials**, v. 69, p.203-212, out. 2014.

LEZZERINI, M.; RANERI, S.; PAGNOTTA, S.; COLUMBU, S.; GALLELLO, G. Archaeometric study of mortars from the Pisa's Cathedral Square (Italy). **Measurement,** v. 126, p.322-331, out. 2018.

LOUREIRO, T. J. A. **Competitividade dos produtores rurais de cana-de-açúcar da região agreste do Rio Grande do Norte**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MARAVELAKI-KALAITZAKI, P.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Physico-chemical study of cretan ancient mortars. **Cement and Concrete Research**, v.33, pp. 651-661, mai. 2003.

MARAVELAKI-KALAITZAKI P.; BAKOLAS, A.; KARATASIOS, I.; KILIKOGLOUET, V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1577-1586. 2005.

MONTENEGRO, M. E. **A produção do espaço rural no município de Ceará-Mirim**. 2004. 208 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; BISBIKOU, K. Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. **Thermochimica Acta**, v.269–270, pp. 779-795, dez.1995.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; BISBIKOU, K. Investigation of the technology of historic mortars. **Journal Cultural Heritage**, v.1, pp. 45-58, 2000.

MOROPOULOU, A.; CAKMAK, AS.; BISCONTIN, G.; BAKOLAS, A.; ZENDRI, E. Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. **Construction and Building Materials,** v.16, pp. 543-552. 2002.

MOTTA, E. V. **Caracterização de argamassas de edificações históricas de Santa Catarina.** 2004. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOURA, P. G. T. **Reabilitação com argamassa projetada em construções históricas de pedra no litoral paraibano**. 2013. 157 f. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia e Universidade Federal da Paraíba, Salvador, 2013.

ORTEGA, E. O.; GARCÍA, R. R.; SERRANO, A. G.; MOLINA, L. Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime. **Construction and Building Materials,** v. 191, p. 575-589, dez. 2018.

PAVIA, D. L. et al. **Introdução a Espectroscopia**. 4° edição. São Paulo, Cengage Learning, 2010.

PENAS, F. E. **Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimentos de Paredes**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

RODRIGUES, P. N. **Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ROSA, P. J. P. **Caracterização de Argamassas Históricas do Convento de Cristo – Tomar.** 2016. 216 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

SALA, E.; ZANOTTI, C.; PASSONI, C.; MARINI, A. Lightweight natural lime composites for rehabilitation of Historical Heritage. **Construction and Building Materials,** v. 125, p.81-93, out. 2016.

SILVA, B. A.; PINTO, A. P. F.; GOMES, A. Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 208-218, dez. 2014.

SOUSA, A. K. D. **Argamassas do grupo escolar Augusto Severo/RN: caracterização e incidência de manifestações patológicas.** 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

TAGLIERI, G.; DANIELE, V.; ROSATELLI, G.; SFARRA, S.; MASCOLO, M. C.; MONDELLI, C. Eco-compatible protective treatments on an Italian historic mortar (XIV century). **Journal of Cultural Heritage**, v. 25, pp. 135-141, mai. 2017.

TAVARES, M. L. A **Conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos:** Uma metodologia de estudo e reparação. 2009. 477 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa/Faculdade de Arquitetura, Lisboa, 2009.

VEIGA, M. R. Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. **Construction and Building Materials**, v.157, pp.132-140, 2017.

VEIGA, M. R. **Argamassas de alvenarias históricas. Funções e características**. CIREA2012 – Conferência Internacional sobre reabilitação de estruturas antigas e alvenaria, Universidade de Lisboa, pp.17-27, 2012.

VEIGA, M. R.; FRAGATA, A.; VELOSA, A. L.; MAGALHÃES, A.C.; MARGALHA, M.G. Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. **International Journal Architectural Heritage**, v.4, pp.177-195, 2010.

VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L. A cor das argamassas. **Revista Construção Magazine**, maio 2008.

VEIGA, M. R. Os revestimentos antigos e a identidade dos edifícios. **Arquitectura Ibérica**. Reabilitação, v. 12, p.36-45, 2006.

VEIGA, M. R.; TAVARES, M. **Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura.** In: Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI. Lisboa, APTETI, Outubro de 2002.

YASEEN, I. A. B.; AL-AMOUSH, H.; AL-FARAJAT, M.; MAYYAS, A. Petrography and mineralogy of Roman mortars from buildings of the ancient city of Jerash, Jordan. **Construction and Building Materials**, v. 38, p.465-471, jan. 2013.