



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO
CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

LUIS MARCELO GOMES DE OLIVEIRA

INVESTIGAÇÃO DOS FATORES QUE AFETAM A UMIDADE ASCENSIONAL
EM CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

FORTALEZA

2022

LUIS MARCELO GOMES DE OLIVEIRA

**INVESTIGAÇÃO DOS FATORES QUE AFETAM A UMIDADE ASCENSIONAL
EM CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS**

Dissertação apresentada ao programa de pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini

Coorientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48i Oliveira, Luis Marcelo Gomes de.
Investigação dos fatores que afetam a umidade ascensional em construções históricas / Luis Marcelo Gomes de Oliveira. – 2022.
137 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
Coorientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.
1. Patrimônio histórico. 2. Umidade ascensional. 3. Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. 4. Simulação computacional. 5. Caracterização de materiais históricos. I. Título.

CDD 624.1

LUIS MARCELO GOMES DE OLIVEIRA

**INVESTIGAÇÃO DOS FATORES QUE AFETAM A UMIDADE ASCENSIONAL
EM CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS**

Dissertação apresentada ao programa de pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini

Coorientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita

Aprovada em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Ana Mafalda Matos
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

À Deus.

Aos meus pais queridos, Caubi e Luisa.

"Aproveite tudo ao seu redor, antes que os momentos se tornem apenas memórias."

Jiraiya

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela vida que me deu e por todas as experiências que me permite passar todos os dias.

Posteriormente, agradeço aos meus pais, Caubi Marinho de Oliveira e Maria Luisa Gomes, por toda a educação que me deram e por terem sido meus primeiros pacientes professores da vida. Por todo o incentivo que me dão diariamente e por cada vibração com minhas conquistas. E finalmente por terem me dado meus dois irmãos queridos, Márcio e Monaliza, a quem também agradeço por tudo.

Ao meu orientador, professor Alexandre Araújo Bertini, por toda sua contribuição para que este trabalho se desenvolvesse da melhor forma possível, e por toda a orientação educacional, profissional e pessoal que me deu, além da paciência que teve comigo nos momentos necessários.

Ao meu coorientador professor Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita, por sua amizade e inestimável contribuição científica para o sucesso desta pesquisa e por todo o suporte para que eu conseguisse atingir os objetivos propostos, me mostrando os caminhos a seguir neste labirinto que é a pesquisa científica, mas, sobretudo, pelo suporte pessoal que me deu nos momentos que precisei.

A todos os professores do PEC e aos membros convidados para minha banca, mestres do conhecimento, que tanto contribuíram para minha evolução profissional e acadêmica ao longo deste percurso que se encerra.

Aos meus queridos colegas de mestrado Amanda Fontenele, Amanda Machado, Camila Carvalho, Éden Malveira, Francisco Estevão, Francisco Wandisley, Laury Araújo, Matheus Gomes e Wyoskynária Mihali, que tanto me apoiaram e ajudaram nos problemas motivacionais e científicos desta pesquisa e que há muito deixaram de ser colegas para se tornarem grandes amigos.

Aos meus amigos queridos Milena, Flávia, Marcelo, Tiago, Stherfane, Marcelo, Ammanda, Elisa, Valmério e outros, que foram, junto aos meus demais amigos, zonas de conforto quando eu precisava esquecer um pouco a pesquisa e renovar minhas energias.

À minha querida namorada Adrielle, que me deu suporte este tempo todo e ouviu cada reclamação minha pacientemente, me ajudando a me manter nos trilhos e não sucumbir à ansiedade.

Àqueles que foram de grande ajuda científica para a obtenção dos resultados desta pesquisa, como o Roger da UFRGS; o Laboratório de Materiais Avançados da UFC e seus colaboradores; o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e seus colaboradores; o Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB) e seus colaboradores; o Lucas, da UFC-Russas; e o *Fraunhofer Institute for Building Physics*, que me disponibilizou uma licença gratuita do Software WUFI 2D para realização da pesquisa.

RESUMO

Um dos mais importantes registros históricos de uma sociedade está em suas construções antigas, que guardam informações acerca da identidade cultural, da evolução e dos comportamentos de uma sociedade, além de fornecer importantes informações sobre as técnicas construtivas e os materiais usados na antiguidade. Desta forma, a conservação e restauração das construções históricas é importante para garantir a manutenção destes registros para a posteridade. Um dos principais causadores de manifestações patológicas e degradação nas construções históricas é a presença de umidade, que tem na capilaridade um dos principais meios de penetração nas paredes das construções históricas (CH), em um processo denominado umidade ascensional. Conhecer as propriedades dos materiais históricos é uma das principais formas de se obter informações que auxiliem no controle e estudo da umidade ascensional além de subsidiar as técnicas de restauro e conservação das CH. O objetivo deste trabalho é caracterizar os materiais e analisar os principais fatores de impacto na umidade ascensional de uma construção histórica, utilizando-se como referência a Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, datada do século XVIII e localizada em Aracati, no estado do Ceará. A caracterização física, mecânica e mineralógica foi realizada nas argamassas e tijolos históricos coletados da Igreja. Em seguida, utilizando-se a caracterização dos materiais como referência, foi estudado o impacto da espessura dos tijolos, espessura da camada de argamassa, composição da argamassa, pintura e salinidade na progressão capilar em paredes históricas. A análise foi realizada por meio de simulações computacionais realizadas no software WUFI 2D. Os resultados obtidos permitiram obter diversas conclusões acerca dos materiais da Igreja, como a identificação de dois tipos diferentes de argamassas na Igreja, em diferentes camadas, indicando realização de restauro com uma argamassa diferente da original, e identificação da argamassa originalmente utilizada. Quanto à análise dos fatores de impacto na umidade, foi possível concluir que todos os fatores estudados, com exceção da espessura da camada de argamassa, impactam na progressão da umidade ascensional, confirmando e reforçando a importância do estudo dos materiais construtivos em edificações históricas de forma a evitar ou reduzir a ocorrência da umidade ascensional.

Palavras-chave: Patrimônio histórico. Umidade ascensional. Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. Simulação computacional. Caracterização de materiais históricos.

ABSTRACT

One of the most important historical records of a society lay in its ancient buildings, that keep information about the cultural identity, evolution and behavior of a society, in addition to providing information such as construction techniques and materials used in antiquity. In this way, the conservation and restoration of historic buildings is important to ensure the maintenance of these records for posterity. One of the main causes of pathologies and historical degradation in historic constructions (HC) is the presence of humidity, which is mainly caused by the process of water penetration by capillarity, a process called rising damp. Knowing the properties of historical materials is one of the main ways to obtain information that helps in the control and study of humidity, in addition to subsidizing the techniques of restoration and conservation of HC. The aim of this study is to characterize the materials and analyze the main impact factors in the rising damp of a historic building, using as a reference the Church of Nosso Senhor do Bonfim, dating from the 18th century and located in Aracati, Ceará. The physical, mechanical and mineralogical characterization was carried out on the historic mortars and bricks collected from the Church. Then, using the characterization of materials as a reference, the impact of brick thickness, mortar layer thickness, mortar composition, paint and salinity on capillary progression in historic walls was studied. The analysis was performed through computer simulations performed in the WUFI 2D software. The results obtained allowed to obtain several conclusions about the materials of the Church, such as the identification of two different types of mortars in the church, in different layers, indicating restoration with a mortar different from the original, and identification of the binder:aggregates proportion used in the mortar originally. As for the analysis of the impact factors on humidity, it was possible to conclude that all the factors studied, with the exception of the thickness of the mortar layer, impact the progression of ascent moisture, confirming and reinforcing the importance of studying construction materials in historic buildings to prevent or reduce the occurrence of rising damp.

Keywords: Heritage constructions. Rising damp. Church of Nosso Senhor do Bonfim. Computational simulation. Characterization of historical materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propriedades geométricas dos tijolos cerâmicos	24
Figura 2 - Fluxograma do ensaio de ataque com HCl 14%.....	33
Figura 3 – Principais mecanismos de penetração de umidade nas paredes.....	36
Figura 4 - Simulações da umidade variando-se a espessura das paredes	39
Figura 5 - Perfil de umidade ocasionado pela umidade ascensional	40
Figura 6 - Corte hídrico em paredes	44
Figura 7 - Redução da seção absorvente em paredes	45
Figura 8 - Eletro-osmose em paredes de alvenaria.....	45
Figura 9 - Esquema de parede interior separada de exterior por uma camada de ar	46
Figura 10 - Menu principal do WUFI 2D.....	49
Figura 11 - Aba de geometria no WUFI 2D.....	50
Figura 12 - Aba do grid numérico no WUFI 2D	51
Figura 13 - Aba de configuração dos materiais no WUFI 2D.....	52
Figura 14 - Aba de condições iniciais no WUFI 2D	52
Figura 15 - Aba de configurações de clima e superfície no WUFI 2D	53
Figura 16 - Aba de parâmetros computacionais no WUFI 2D	54
Figura 17 - Fachada, Altar-Mor e localização da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim ..	59
Figura 18 – Ambientes da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, com identificação do local de coleta das amostras de argamassas	61
Figura 19 – Aspecto visual das amostras de argamassa	61
Figura 20 - Aspecto visual das amostras de tijolos cerâmicos	62
Figura 21 - Ensaio de reconstituição do traço por ataque químico	63
Figura 22 - Raspagem da argamassa aderida às faces dos tijolos	64
Figura 23 - Preparo dos tijolos para ensaio de compressão.....	65
Figura 24 - Realização do ensaio de compressão e aspecto dos tijolos rompidos.....	65
Figura 25 – Curvas granulométricas das argamassas históricas.....	67
Figura 26 – Composição mineralógica das argamassas	70
Figura 27 - Tijolos fraturados após secagem.....	72
Figura 28 - Curvas tensão x Deformação dos tijolos cerâmicos	74
Figura 29 – Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial	75
Figura 30 – Composição mineralógica dos tijolos cerâmicos	76

Figura 31 - Curvas de retenção de água dos materiais.	82
Figura 32 - Dimensões das paredes simuladas	82
Figura 33 – Médias dos registros das condições climáticas de Aracati, nos últimos 10 anos	85
Figura 34 - Curvas de absorção de água – Adaptado de Rucker, Holm e Krus (2000) .	87
Figura 35 – Influência da espessura dos tijolos na umidade ascensional.....	89
Figura 36 - Umidade total ao final de um ano de simulação.....	90
Figura 37 - Influência da espessura da argamassa de revestimento na umidade ascensional	91
Figura 38 - Influência do tipo de pintura na umidade ascensional.....	92
Figura 39 - Influência da composição das argamassas na umidade ascensional.....	94
Figura 40 - Influência da presença de sais na umidade ascensional.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites granulométricos dos agregados miúdos.....	31
Tabela 2 - Classificação dos impermeabilizantes segundo a NBR 9575	47
Tabela 3 - Características das argamassas históricas.....	66
Tabela 4 – Análise de Variância (ANOVA) do teor de umidade.....	67
Tabela 5 – DMC e módulo de finura das argamassas históricas	68
Tabela 6 – Traço reconstituído das argamassas.....	68
Tabela 7 – Resultados do ensaio TGA	69
Tabela 8 - Características físicas e geométricas dos tijolos cerâmicos	71
Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão axial dos tijolos cerâmicos	73
Tabela 10 – Análise de Variância (ANOVA) do método de ensaio de compressão	73
Tabela 11 – Módulo de elasticidade estimado dos tijolos.....	74
Tabela 12 - Propriedade dos materiais simulados	81
Tabela 13 - Variação das configurações das paredes simuladas	84
Tabela 14 – Resultados das simulações computacionais.....	87
Tabela 15 - Análise de Variância dos resultados.....	88
Tabela 16 - Comparação múltipla de médias para diferentes pinturas.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH	Construções históricas
ANOVA	Análise de Variância
DMC	Dimensão Máxima Característica
TGA	Termogravimetria
DRX	Difração de Raios X
NBR	Norma Brasileira Reguladora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NM	Norma MERCOSUL
ICOMOS	Conselho Internacional de Monumentos e Sítios
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
ISO	Organização Internacional de Normalização
ICDD	Centro Internacional de Dados de Difração
CSH	Silicato de cálcio hidratado
CAH	Monoaluminato de cálcio hidratado
CAHS	Silicoaluminato de cálcio hidratado
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
HCl	Ácido clorídrico
LAREB	Laboratório de Reabilitação e Durabilidade de Edificações
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
UFC	Universidade Federal do Ceará
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	20
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>20</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
1.2	Estrutura da dissertação	20
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Os tijolos de cerâmica vermelha	22
<i>2.1.1</i>	<i>Propriedade dos tijolos cerâmicos</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Deterioração dos tijolos cerâmicos</i>	<i>26</i>
2.2	Argamassas históricas	28
<i>2.2.1</i>	<i>Propriedades das argamassas históricas</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Deterioração das argamassas.....</i>	<i>33</i>
2.3	Umidade ascensional.....	34
<i>2.3.1</i>	<i>Fatores condicionantes da umidade ascensional.....</i>	<i>36</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Problemas ocasionados pela umidade ascensional nas construções</i>	<i>41</i>
<i>2.3.2.1</i>	<i>Problemas ocasionados pela penetração de sais nas paredes</i>	<i>42</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Métodos de tratamento da umidade ascensional.....</i>	<i>43</i>
<i>2.3.3.1</i>	<i>Tratamento em edificações históricas</i>	<i>43</i>
<i>2.3.3.2</i>	<i>Tratamento em edificações modernas</i>	<i>47</i>
<i>2.3.4</i>	<i>WUFI 2D no estudo da umidade ascensional.....</i>	<i>49</i>
<i>2.3.4.1</i>	<i>Menu principal</i>	<i>49</i>
<i>2.3.4.2</i>	<i>Geometria do projeto.....</i>	<i>50</i>
<i>2.3.4.3</i>	<i>Grid numérico.....</i>	<i>50</i>
<i>2.3.4.4</i>	<i>Materiais</i>	<i>51</i>
<i>2.3.4.5</i>	<i>Condições iniciais.....</i>	<i>52</i>
<i>2.3.4.6</i>	<i>Superfície/Clima.....</i>	<i>52</i>
<i>2.3.4.7</i>	<i>Parâmetros computacionais.....</i>	<i>53</i>

2.3.4.8	Resultados	54
3.	“INVESTIGAÇÃO DAS ARGAMASSAS E TIJOLOS DE ARGILA DE UMA ESTRUTURA HISTÓRICA LUSO-BRASILEIRA DO SÉCULO XVIII: A IGREJA DO NOSSO SENHOR DO BONFIM”	55
3.1	Resumo.....	55
3.2	Introdução	56
3.3	A Igreja do Nosso Senhor do Bonfim.....	58
3.4	Materiais e métodos	60
3.4.1	<i>Coleta de amostras.....</i>	<i>60</i>
3.4.2	<i>Ensaio de caracterização das argamassas históricas</i>	<i>62</i>
3.4.3	<i>Ensaio de caracterização dos tijolos cerâmicos históricos.....</i>	<i>63</i>
3.5	Resultados e discussões.....	66
3.5.1	<i>Resultados de caracterização das argamassas históricas</i>	<i>66</i>
3.5.2	<i>Caracterização dos tijolos cerâmicos históricos.....</i>	<i>71</i>
3.6	Conclusões	76
4.	INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DOS TIJOLOS, E ARGAMASSAS, PINTURA E SAIS NA UMIDADE ASCENSIONAL EM CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS ANTIGAS	78
4.1	Resumo.....	78
4.2	Introdução	78
4.3	Simulação numérica das alvenarias antigas.....	80
4.3.1	<i>Informação dos materiais.....</i>	<i>80</i>
4.3.1	<i>Informações geométricas e cenários de simulação.....</i>	<i>83</i>
4.3.2	<i>Simulação numérica.....</i>	<i>84</i>
4.4	Resultados.....	87
4.4.1	<i>Espessura dos tijolos cerâmicos.....</i>	<i>88</i>
4.4.2	<i>Espessura da camada de argamassa.....</i>	<i>90</i>
4.4.3	<i>Pintura</i>	<i>91</i>

4.4.4	<i>Composição das argamassas</i>	93
4.4.5	<i>Salinidade</i>	94
4.5	Conclusões	96
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE A – CURVAS DE TERMOGRAVIMETRIA DOS MATERIAIS...	108
	APÊNDICE B – CURVAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	114
	APÊNDICE C – CURVAS DE ASCENSÃO CAPILAR	117
	APÊNDICE D – FRENTE ÚMIDA DAS PAREDES	133

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fatores de degradação recorrentes nas edificações históricas e que podem causar danos severos à estrutura e à saúde dos usuários, merece destaque a presença de umidade nos elementos construtivos. A umidade pode influenciar na redução da vida útil, no desempenho térmico interno, na degradação dos revestimentos, na capacidade de resistência mecânica das alvenarias e até mesmo nas condições de conforto ambiental no interior da edificação (FRANZONI, 2018; GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013; KÜNZEL, 1995).

Os principais tipos de danos ocasionados pela presença de umidade nas edificações, constituídas por materiais naturalmente porosos, como tijolos, rochas e argamassas (GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013), são ataques biológicos, penetração e cristalização de sais, ataques químicos, inchamento dos materiais argilosos, perda de material e redução da capacidade estrutural (SANDROLINI; FRANZONI, 2006). Estes danos ganham ainda mais importância de estudo, quando consideradas as diversas formas e a facilidade com que a umidade pode surgir nas edificações, como pela penetração de água da chuva, por meio das infiltrações provenientes de instalações hidráulicas e sanitárias, infiltração do solo, condensação do vapor de água e até mesmo em razão da umidade inicial dos materiais construtivos (KÜNZEL, 1995).

Apesar da importância do estudo de soluções preventivas de danos relacionadas à umidade, que consiste na maioria das vezes em impermeabilização das fundações durante a etapa de construção, os principais estudos realizados sobre a umidade estão relacionados aos métodos de correção de problemas em edificações já existentes, sobretudo as construções de valor histórico, garantindo-se assim a manutenção do patrimônio histórico cultural (LUBELLI; HEES; BOLHUIS, 2018).

As Construções Históricas (CH), de forma geral, podem ser definidas como monumentos edificados isolados ou em um sítio urbano, sejam grandes criações ou modestas, com expressivo valor histórico e cultural, sendo, portanto, testemunhos de uma sociedade ("Carta de Veneza", 1964). Apesar da importância das CH no âmbito cultural, estudos relacionados aos aspectos construtivos destas edificações ainda são insuficientes para garantir uma ampla compreensão dos materiais construtivos e das técnicas construtivas da época de sua respectiva construção, diferentemente das construções contemporâneas, que possuem suas propriedades estruturais e construtivas exaustivamente estudadas e suas principais propriedades representadas através de

equações em códigos e normas (MESQUITA et al., 2015). Esta carência nos conhecimentos concernentes às CH impacta diretamente nos processos de restauro, manutenção e recuperação, visto as diferenças nos processos construtivos e materiais originais da construção para os utilizados atualmente.

Uma questão recorrente durante o planejamento dos projetos de reabilitação de construções históricas de alvenarias maciças é sobre qual tipo de argamassa deve ser utilizada para a recuperação de uma parede com seu revestimento totalmente danificado. No contexto das obras de reabilitação da Igreja de Nosso Senhor do Bonfim, em Aracati, que apresentava ação severa da umidade ascensional, essa questão surgiu e motivou o desenvolvimento do presente estudo. Tendo isto em vista, o estudo das CH é importante não somente no âmbito da preservação histórica e cultural, mas também no contexto do desenvolvimento de técnicas de manutenção, recuperação e conservação do patrimônio histórico edificado (MESQUITA et al., 2015). Este trabalho, portanto, alinha-se com os objetivos do Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS), e da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) ("Carta de Veneza", 1964).

Dentre as formas de penetração da umidade nas edificações previamente citadas, uma das mais importantes e recorrentes, principalmente nas CH, é a umidade ascensional. A umidade ascensional é o processo de ascensão da água nas paredes das edificações, a partir da água presente no solo, por meio do processo físico de capilaridade (LUBELLI; HEES; BOLHUIS, 2018). O caráter poroso, hidrofílico e de alta absorção de blocos de alvenaria, rochas e argamassas utilizados na construção civil aumenta o potencial de ascensão capilar nas paredes das edificações (FRANZONI, 2018).

A umidade ascensional ocorre quando os elementos construtivos, como paredes, pilares e vigas baldrame, estão em contato direto com o solo e este contém umidade (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). A elevada porosidade dos materiais de construção associada com a falta de um corte hídrico faz com que estes materiais possuam elevado potencial para ascensão capilar. Nos casos em que isto acontece, a altura máxima de ascensão capilar ocorre de forma contínua e a água irá ascender até uma altura em que a evaporação desta água na superfície das paredes equilibre a quantidade de água absorvida por capilaridade (GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013; KÜNZEL, 1995; RIRSCH; ZHANG, 2010).

Nas CH nas quais há a ocorrência de umidade ascensional em função da não adoção de sistemas preventivos, pode-se resolver ou reduzir a ascensão capilar por meio

de alguma das seguintes técnicas, já desenvolvidas ou ainda em estágio de desenvolvimento: aplicação de ventilação na base (TORRES, 2018); introdução de barreira química por injeção (LUBELLI; VAN HEES; HACQUEBORD, 2013); introdução de barreiras físicas, como introdução de chapas metálicas nas paredes ou aplicações de barreiras impermeáveis na base das paredes; redução da área absorvente; criação de campo elétrico na interface solo-parede, por meio de eletro-osmose (FRANZONI, 2018; SOCOLOSKI; MASUERO, 2019), dentre outras. Cada uma destas técnicas possui particularidades que podem interferir positiva ou negativamente em sua utilização para determinado tipo de estrutura (FREITAS; GUIMARÃES, 2014).

A umidade ascensional é um fenômeno complexo que depende da ocorrência conjunta de diversas forças e de diversos fatores internos e externos, tais como a umidade relativa do ar, a espessura das paredes, a natureza dos materiais de revestimentos (FRANZONI, 2014; FREITAS; GUIMARÃES, 2014). Além disso, outro fator de relevante interesse no estudo da umidade ascensional é a presença de sais na água ascendente, que pode adentrar nas paredes diluído, e posteriormente ficar depositado em forma sólida nos poros dos materiais, causando problemas como elevação do potencial de ascensão capilar, danos estruturais e problemas estéticos (FRANZONI, 2014; LOPEZ-ARCE et al., 2009; RIRSCH; ZHANG, 2010).

Apesar da umidade ascensional ser um fenômeno físico tridimensional, este fenômeno é normalmente estudado como bidimensional em função da continuidade das paredes, sendo dependente das transferências simultâneas de umidade e calor nas paredes. Neste sentido, a modelagem computacional da umidade ascensional para cálculo da transferência de umidade têm se mostrado como importantes ferramentas de análise, à medida que consideram estas premissas e fornecem previsões precisas em relação às situações reais (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008; GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013).

Um dos softwares mais utilizados atualmente para a simulação da umidade ascensional é o WUFI 2D, que utiliza o método dos elementos finitos para estudar a umidade ascensional e já é amplamente validado experimentalmente (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008). O WUFI 2D, apesar de possuir uma grande biblioteca de materiais já inseridos, não possui um modelo de previsão da umidade quando há a ocorrência de salinidade, limitação que pode ser superada a partir da observação de Rucker; Holm; Krus (2000), que correlacionou a presença de sais com as propriedades higrotérmicas dos materiais da parede.

Considerando a importância da propriedade dos materiais na realização das simulações computacionais, bem como sua importância nos processos de reabilitação, manutenção e restauro das CH, é de extrema importância a realização de uma correta caracterização dos materiais *in situ* quando se estudar edificações reais (MESQUITA et al., 2017). A caracterização se mostra ainda mais importante quando se consideram as diferenças entre as técnicas construtivas e os materiais utilizados nas CH com as técnicas e materiais atualmente utilizados (GLEIZE et al., 2009). Materiais como os tijolos maciços e argamassas (de cal) antigas possuem influência significativa nos processos de entrada e saída de umidade das paredes, além de terem relevante importância nos processos de intervenção nas edificações históricas (BARLUENGA et al., 2014; DONAIS et al., 2020; MESQUITA et al., 2017)

No Brasil, e especialmente no Ceará, diversas pesquisas relacionadas à caracterização das CH têm sido desenvolvidas nos últimos anos, especialmente nos centros históricos de Aracati, Icó e Sobral. Esses estudos tem sido desenvolvidos com o objetivo de se conhecer, de forma mais precisa, a identidade cultural construtiva nacional (ARAÚJO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2022).

Um destes importantes monumentos históricos, que foi tomado como referência nos estudos aqui desenvolvidos, é a Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada na cidade de Aracati, Ceará, e datada do início do século XVIII (SANTOS, 1917). Esta Igreja de estilo arquitetônico de influência portuguesa, atualmente encontra-se em processo de reabilitação, que visa restabelecer a estrutura, atualmente degradada e assolada por umidade (OLIVEIRA et al., 2022).

Desta forma, considerando a importância da correta caracterização das CH e a importância do fenômeno da umidade ascensional, que acomete com frequência as construções, justifica-se a realização deste trabalho, que visa caracterizar os principais materiais construtivos Igreja do Nosso Senhor do Bonfim e utilizar sua caracterização no estudo dos fatores de impacto da umidade ascensional em edificações históricas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar e identificar os fatores construtivos que influenciam no desenvolvimento e na progressão da umidade ascensional em construções históricas, considerando como referência as características da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada em Aracati-CE.

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Caracterizar os materiais construtivos da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim;
- ii. Avaliar a relação entre a espessura da camada de blocos e a progressão da frente úmida;
- iii. Avaliar a relação entre a espessura da camada de argamassa de revestimento e a progressão da frente úmida;
- iv. Avaliar a relação entre o tipo de pintura e a progressão da frente úmida;
- v. Avaliar a relação entre a composição da argamassa de revestimento e a progressão da frente úmida;
- vi. Avaliar a relação da salinidade da água de ascensão com a progressão da frente úmida.
- vii. Identificar os fatores que influenciam no surgimento e desenvolvimento da umidade ascensional.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em 5 partes, cada parte atribuída a um capítulo. O capítulo 1 aborda a introdução do tema estudado, discorrendo sobre a importância acerca do estudo realizado e contextualização do assunto, bem como apresenta os objetivos principais do trabalho realizado. O capítulo 2 é dedicado a uma ampla revisão da literatura referente aos temas abordados nesta dissertação, como a caracterização dos principais materiais históricos, tais como os tijolos e argamassas; a umidade ascensional e sua relação com as edificações históricas; e a abordagem numérica, por meio da simulação computacional, da umidade ascensional realizada no software WUFI 2D.

O capítulo 3 apresenta um artigo completo referente à caracterização dos materiais históricos, submetido e publicado na revista *Journal of Building Engineering*, em 2021, com título original “*Investigation of the mortars and clay bricks of a luso-brazilian historic structure from XVIII century: The Nosso Senhor do Bonfim Church*”, que teve como principal objetivo a caracterização dos materiais construtivos históricos da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. O capítulo 4 apresenta outro artigo, submetido em 2022 na revista *Case Studies in Construction Materials*, que tem como título original “*Influence of the bricks and mortar characteristics, paint and salts on the rising damp in ancient Brazillian constructions*”, que possui como objetivo principal a análise da influência de alguns fatores construtivos na progressão da umidade ascensional em paredes históricas, usando-se como referência as propriedades dos materiais da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. O capítulo 5 se dedica às considerações finais da pesquisa realizada e sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, ao final do texto são apresentadas as referências utilizadas e os apêndices.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Os tijolos de cerâmica vermelha

Os tijolos maciços são um dos mais antigos materiais conhecidos e utilizados na indústria da construção civil, sendo também um dos materiais mais duráveis. Seu uso tem sido identificado nos períodos históricos da Roma antiga, da Mesopotâmia e do Egito Antigo, e, apesar das modificações da tecnologias de produção e de seu uso, permanece como um dos mais utilizados materiais de construção do século XXI, sendo utilizado em edificações modernas e identificado em edificações históricas (ABDEEN, 2016; FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010).

Os tijolos de alvenaria cerâmicas, que do ponto de vista geológico podem ser definidos como rochas metamórficas que se tornam estáveis sob certas condições de pressão e temperatura, são constituídos da mistura de materiais crus, tais como argilas, siltes e areias, com água, passando por processos de extrusão, secagem e queima. Os primeiros tijolos de alvenaria cerâmicas eram moldados à mão e secados ao sol, sendo os primeiros tijolos com queima desenvolvidos por volta de 2500 a.C. Estes tijolos queimados, diferente dos blocos com secagem natural, que são frágeis, adquirem propriedades de alta resistência mecânica e boa durabilidade após a queima, que garante a quebra da estrutura mineral das argilas e formação da nova fase cristalina e vítrea. O processo de queima pode ser dividida em cinco estágios: 1) secagem (evaporação da água livre); 2) desidratação; 3) oxidação; 4) vitrificação; e 5) queima redutora. Todo o processo de queima pode durar de 6 a 36 horas, dependendo das variáveis envolvidas como o tipo de forno, o tipo de argila e o combustível utilizado. A vitrificação é o processo mais importante para se obter as propriedades mecânicas e física desejadas para os tijolos. É nesta fase que materiais não argilosos como o quartzo, óxidos de ferro, compostos de cal e álcalis (óxidos de sódio e potássio) são incorporados no material final (ABDEEN, 2016; LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

Ademais, as argilas utilizadas na produção de tijolos podem ser divididas em argilas ricas em cal (que podem conter calcita, dolomita ou gesso), argilas vermelhas (ricas em mica), argilas ricas em quartzo e argilas carbonáceas (ricas em matéria orgânica). Nas argilas que contém calcita e dolomita, o processo de queima pode ocasionar descarbonatação, que por sua vez reduz a densidade do tijolo formado. Esta

redução na densidade gera tijolos de menor condutibilidade térmica e menor resistência mecânica (ABDEEN, 2016; GUALTIERI et al., 2010).

A possibilidade de degradação dos blocos cerâmicos pode ocorrer pela ação da umidade, variação de temperatura, envelhecimento natural dos materiais, dentre outras. A pouca disponibilidade de estudos na literatura acerca do assunto, torna ainda mais importante o conhecimento das diversas características mecânicas e físicas destes materiais, em especial os utilizados nas CH, em vista de sua importância no sentido de manutenção da identidade cultural e construtiva de uma sociedade (ARAÚJO et al., 2020).

Assim, além do entendimento sobre os mecanismos que afetem a durabilidade das alvenarias históricas, a necessidade de caracterização dos tijolos cerâmicos está ligada à variabilidade das propriedades dos tijolos em função da região e disponibilidade de matéria-prima e forma de produção, incluindo fatores externos como intervenções já realizadas nas paredes ao longo do tempo (BARLUENGA et al., 2014). Ademais, a durabilidade dos tijolos cerâmicos está intrinsecamente ligada às suas propriedades físicas e mecânicas (BHATTARAI et al., 2018).

2.1.1 Propriedades dos tijolos cerâmicos

A investigação das propriedades dos tijolos cerâmicos pode incluir medições realizadas *in loco* nas construções históricas e medições das propriedades em laboratórios. Informações concernentes aos aspectos geográficos e históricos da construção podem auxiliar na obtenção destas propriedades (BARLUENGA et al., 2014).

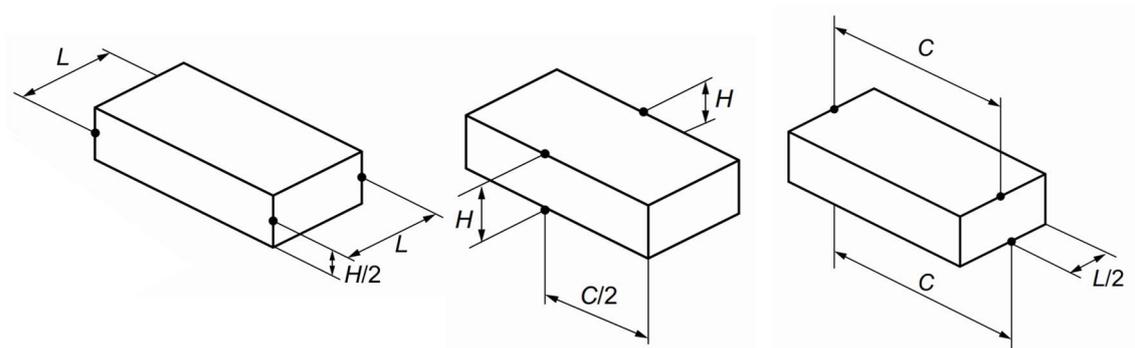
Dentre as principais propriedades, relacionadas com o comportamento dos blocos, pode-se destacar as características geométricas, a porosidade e absorção de água, que podem ser obtidos por meio dos procedimentos apresentados na NBR 15270-2 (ABNT, 2017a); a resistência à compressão, que pode ser obtida pelos procedimentos apresentados na NBR 15270-2 (ABNT, 2017a) e na NBR 8492 (ABNT, 2012); e a composição mineralógica, que pode ser obtida pela combinação de técnicas de Difractometria de Raios X (DRX) e Termogravimetria (TGA) (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010).

- Propriedades geométricas:

A importância de obtenção das propriedades geométricas estão relacionadas à variabilidade nas dimensões dos tijolos quando se varia de uma construção histórica para outra, ou mesmo dentro de uma mesma edificação (ARAÚJO et al., 2020; OLIVEIRA et

al., 2022). A caracterização geométrica consiste na determinação dos valores médios de largura (L), comprimento (C) e altura (H) dos blocos. O valor de cada grandeza deve ser a média aritmética de duas medições realizadas nos tijolos, nos locais indicados na (Figura 1), realizando-se as medições com paquímetro, seguindo o método apresentado na NBR 15270-2 (ABNT, 2017a).

Figura 1 - Propriedades geométricas dos tijolos cerâmicos



Fonte: adaptado da NBR 15270-2 (ABNT, 2017a).

- Porosidade:

A porosidade, por sua vez, é um dos mais importantes parâmetros físicos dos tijolos cerâmicos, visto sua influência nas demais propriedades do material, tais como a permeabilidade, a resistência mecânica, a durabilidade e a qualidade geral dos tijolos. Esta propriedade pode sofrer grande variação a depender do período construtivo e do local (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010). Em estudo realizado com tijolos cerâmicos de diferentes séculos no Ceará, Araújo et al. (2020) identificaram uma variação no índice de absorção de água, que é um indicador da porosidade, de 5,89% a 32,01%, considerando construções históricas brasileiras, localizadas no estado do Ceará, do século XVIII até o século XX.

- Absorção de água:

A absorção de água, que está relacionada com a porosidade aparente dos tijolos por meio da densidade aparente (BHATTARAI et al., 2018), pode ser calculada de acordo com as recomendações da NBR 15270-2 (ABNT, 2017a). De acordo com esta norma, deve-se obter a massa seca do material, que consiste na massa após o tijolo ficar em estufa a 105 ± 5 °C até sua massa estabilizar, e a massa úmida, que consiste na massa do material saturado com água. O processo de saturação pode ser realizado com água fria, mantendo-

se o tijolo imerso durante 24 horas, ou com água fervente, no qual o tijolo ficará imerso por 2 horas. De posse da massa seca e úmida do material, pode-se obter a absorção de água a partir da seguinte equação:

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

m_u é a massa úmida, em gramas;

m_s é a massa seca, em gramas.

- Propriedades mecânicas:

As propriedades mecânicas dos tijolos, tais como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, estão diretamente ligadas à durabilidade. Apesar das paredes de alvenaria serem materiais heterogêneos, constituídos por tijolos, argamassas e outros materiais, suas propriedades mecânicas dependem fortemente das propriedades mecânicas dos tijolos, que por sua vez, dependem fortemente das propriedades dos materiais componentes e do processo de produção. Usualmente, os tijolos possuem grande resistência à compressão e baixa resistência à tração, sendo então tradicionalmente utilizados em locais nos quais são unicamente submetidos a esforços de compressão, tais como colunas, paredes e arcos (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010).

Dada a grande variabilidade nas resistências à compressão de tijolos maciços, principalmente os utilizados nas CH, são encontrados na literatura resistências à compressão que variam desde 1,5 a 32 MPa, já havendo pesquisas que indicam a existência de tijolos com resistência acima de 50 MPa (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010). A resistência à compressão dos tijolos pode ser obtida por ensaio de compressão simples, a partir dos procedimentos experimentais da NBR 15270-2 (ABNT, 2017a) e da NBR 8492 (ABNT, 2012), que tratam de ensaios em tijolos cerâmicos e tijolos de solo-cimento, respectivamente.

Apesar das metodologias apresentadas na NBR 15270-2 (ABNT, 2017a) e na NBR 8492 (ABNT, 2012) diferirem quanto ao material constituinte dos tijolos, seus procedimentos são basicamente os mesmos, consistindo em romper os tijolos sob esforço de compressão, estando estes blocos com suas faces regularizadas, e na condição saturada. A diferença entre os dois métodos está no elemento ensaiado. Enquanto a NBR 15270-2 (ABNT, 2017a) recomenda o rompimento dos tijolos inteiros, a NBR 8492 (ABNT, 2012) recomenda inicialmente a serragem ao meio dos corpos de prova e sua colagem com camada de argamassa previamente ao ensaio.

Outra grandeza mecânica de interesse para a compressão do comportamento dos tijolos é o módulo de elasticidade, também caracterizado por alta variabilidade em seus valores (ARAÚJO et al., 2020; FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010; SILVEIRA et al., 2012). O módulo de elasticidade pode ser estimado a partir da curva tensão-deformação, determinada em laboratório (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010; SILVEIRA et al., 2012). Todavia, em alguns casos, há impossibilidade de se retirar tijolos da construção para obtenção das propriedades mecânicas em laboratório, em ambiente controlado. Neste caso, é vantajoso a utilização de técnicas não destrutivas para obtenção das propriedades mecânicas, destacando-se a utilização de testes com ondas ultrassônicas e correlacionando a velocidade de onda com os parâmetros mecânicos. Esta é uma técnica alternativa de estimativa das propriedades mecânicas, que possui a vantagem de manter intacta a integridade da estrutura, e por isso, vêm sendo cada vez mais utilizada na caracterização de edificações históricas (ARAÚJO et al., 2020; CAZALLA et al., 2001; SILVEIRA et al., 2012).

- Composição mineralógica:

Por fim, uma das propriedades dos tijolos que permite obter conclusões acerca de sua origem é a composição mineralógica, geralmente realizada com suporte dos ensaios de DRX e de TGA. Estes ensaios permitem identificar a ocorrência de possíveis deficiências provenientes do processo produtivo, como a presença de matéria orgânica, nódulos de cal e outras impurezas, que podem afetar a durabilidade dos blocos. Ademais, pode-se por meio destes ensaios atestar a variabilidade mineralógica quando se varia de um tijolo para outro, o que poderia indicar o baixo rigor na qualidade produtiva (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010; LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

2.1.2 Deterioração dos tijolos cerâmicos

Os tijolos de alvenaria, quando expostos a algumas situações de utilização, como intempéries ou mesmo ação humana, podem ser submetidos a diferentes situações de temperatura, pressão e regime de umidade, além de sofrer ações de soluções aquosas, gases atmosféricos e microrganismos, que podem gerar ou acelerar a deterioração das paredes como um todo, e que podem se tornar menos estáveis e sofrer modificações mineralógicas e microestruturas (LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

A deterioração nos tijolos é ainda mais significativa em edificações históricas, nas quais os tijolos, em função de sua idade, já passaram por diversos processos externos que possuem capacidade de acelerar a degradação, como ciclos de gelo e degelo, contato com água da chuva e ascensão capilar, insolação e choques mecânicos diversos, além da deterioração natural do material devido o passar do tempo. Estes processos podem causar problemas que afetam desde a estética das paredes até sua resistência estrutural, como aparecimento de manchas, perda de resistência estrutural, redução do isolamento térmico e acústico, mal cheiro e aparecimento de bolores nas paredes (BARLUENGA et al., 2014; ELERT et al., 2003; LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

Nas regiões frias ou de clima frio em parte do ano, os ciclos de congelamento e descongelamento ocorrem nos tijolos. Este processo está associado à penetração de água nas paredes por qualquer meio, como chuva, condensação da umidade relativa e umidade ascensional. Após a penetração da água, esta permanece armazenada nos poros dos tijolos, congelando quando a temperatura atinge valores abaixo de zero. O congelamento da água gera expansão e cria tensões internas de tração na estrutura mineral dos tijolos, que, por terem baixa resistência a compressão, começam a se deteriorar aos poucos, de dentro para fora. Em alguns casos, as tensões internas geradas nos tijolos são resistidos pelo mesmo, porém, com a ocorrência cíclica deste processo de descongelamento e novo congelamento, há geração de fadiga, que também irá contribuir para a destruição das ligações internas dos tijolos (ELERT et al., 2003).

Outro importante processo deteriorante está associado aos processos de cristalização e recristalização de sais nos poros das paredes. Assim como no casos dos ciclos de congelamento e descongelamento, as variações volumétricas associadas à cristalização e recristalização dos sais nos poros dos tijolos pode ocasionar fadiga. Neste caso, os sais podem penetrar nos tijolos solubilizados na água que ascende por capilaridade ou outros meios. Por meio da saída da água das paredes pelo processo de evaporação, os sais podem se solidificar e permanecer depositados nos poros, tornando a se solubilizarem logo que houver contato com água novamente, reiniciando o ciclo (ELERT et al., 2003; LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

Além de fatores externos, as propriedades dos blocos também possuem relevante correlação com a degradação destes. Em sua pesquisa, Elert et al. (2003) observaram que tijolos com menor porosidade e distribuição mais favorável do tamanho dos poros são mais duráveis, o que pode estar relacionado à redução na penetração de agentes que causam degradação por meio dos poros, como umidade e gases atmosféricos, que também

estão relacionados aos ciclos de gelo e degelo e cristalização de sais. O autor afirma que a degradação é significativa para tijolos de grande porosidade (por volta de 40%). Os valores de porosidade e distribuição dos poros nos tijolos geralmente está associado ao processo de queima, mais especificamente na fase de vitrificação.

Ademais, os tijolos produzidos em geral com material calcário são mais suscetíveis à degradação, em especial a calcita ($CaCO_3$) e a dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). A calcita, em seu processo de queima, é convertida em cal virgem (CaO), em um processo que aumenta a porosidade do material. A cal virgem, em contato com água, é convertida então em portlandita ($Ca(OH)_2$), que por sua vez se transforma em carbonato de cálcio ($CaCO_3$) na presença de ar atmosférico, causando aumento de volume e consequente fissuração na estrutura interna do tijolo. No caso da dolomita, sua decomposição gera cal virgem e óxido de magnésio (MgO), também conhecido como periclase. Estes, na presença de água formam portlandita e brucita ($Mg(OH)_2$). A brucita, em contato com dióxido de carbono (CO_2) do ar, forma hidromagnesita ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$). Este processo também gera aumento na porosidade e fissuração (ELERT et al., 2003).

Assim, é possível perceber que a umidade e o ar atmosféricos são dois dos importantes agentes degradantes, à medida que ocasionar por si próprios a degradação do material, ou são transportam outros compostos agressivos às paredes.

2.2 Argamassas históricas

As argamassas são um dos mais antigos materiais construtivos utilizados, com registros de sua utilização há mais de 10000 anos, em regiões como Índia, Itália, Polinésia Francesa, Grécia e Egito (CARRAN et al., 2012). As argamassas são misturas complexas formadas principalmente por um material ligante, um agregado e água, em proporções pré-definidas. Esta proporção dos materiais, bem como as propriedades de cada material misturado, são os responsáveis pelas propriedades finais das argamassas em seu estado fresco e endurecido (DONAIS et al., 2020; MESQUITA et al., 2017; THIRUMALINI; RAVI; RAJESH, 2018). (“Carta de Veneza”, 1964)

A natureza das argamassas pode ser aérea, quando o endurecimento, que ocorre de forma lenta, é desencadeado pelo CO_2 presente no ar, ou hidráulica, quando as reações de endurecimento são ocasionadas, de forma mais rápida, pela reação do aglomerante, pré-hidratado, com água. A composição dos ligantes das argamassas, um dos principais responsáveis por suas propriedades finais, pode ter origem em diversos materiais, sendo

a cal o material mais utilizado nas edificações históricas (GLEIZE et al., 2009). O processo de produção da argamassa de cal pode ser entendido como um processo de 3 estágios, denominado de ciclo da cal (CARRAN et al., 2012):

- (1) Calcinação: $CaCO_3 + calor = CaO + CO_2$
- (2) Hidratação: $CaO + H_2O = Ca(OH)_2 + calor$
- (3) Carbonatação: $Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$

O estágio 1 decorre da queima da rocha calcária a altas temperaturas, formando um material denominado cal viva. No estágio 2, ocorre a adição de água à cal viva, formando a cal hidratada. Finalmente, no estágio 3, a cal hidratada pode ser misturada com agregados e outros componentes das argamassas e ocorrerá o processo de carbonatação, convertendo o hidróxido de cálcio formado no estágio 2 em carbonato de cálcio (CARRAN et al., 2012).

Além das argamassas típicas de cal, existem também, em menor escala em estruturas históricas, argamassas à base de cimento, de gesso ou mistas (ARIZZI; VILES; CULTRONE, 2012; GLEIZE et al., 2009). As argamassas cimentícias, menos comuns em construções históricas e mais comum em edificações modernas, podem ser definidas como conglomerados artificiais produzidos basicamente a partir de calcário, argila e outras adições minerais (MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 1995). As argamassas de gesso, por sua vez, são aglomerantes produzidos a partir da gipsita, um mineral composto basicamente de sulfato de cálcio hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), bastante utilizado como aglomerante em edificações históricas, principalmente em processos de restauração (TESCH; MIDDENDORF, 2006). Por fim, as argamassas mistas são aglomerantes formados pela mistura de dois ou mais aglomerantes, como cal e gesso, cal e pozolanas e cal adicionada de pó ou fragmentos de tijolos cerâmicos (*cocciopesto*), comuns em edificações históricas (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002; MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 1995).

2.2.1 Propriedades das argamassas históricas

Alguns dos principais ensaios realizados nas argamassas históricas são: a obtenção da umidade inicial, a determinação da granulometria do agregado, a determinação da constituição mineralógica da argamassa e a determinação do traço de argamassa (ALMEIDA; SILVA; ALMEIDA, 2017; BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002; GLEIZE et al., 2009; THIRUMALINI; RAVI; RAJESH, 2018).

A umidade inicial representa a razão entre a massa da umidade presente nos poros do material e a massa seca deste material. No caso das argamassas históricas, esta umidade pode ser proveniente da chuva, da umidade relativa do ambiente, da umidade ascensional ou outros meios (KÜNZEL, 1995). Sua determinação pode ser realizada na própria construção, utilizando métodos indiretos, mas também em laboratório, utilizando-se o método gravimétrico.

Para obtenção pelo método gravimétrico, as amostras de argamassa devem ser coletadas na construção e serem transportadas e armazenadas em sacos herméticos, para evitar a troca de umidade e calor entre as amostras e o meio. A determinação da umidade é feita através da secagem em estufa de uma quantidade de argamassa previamente pesada (ABNT, 2006).

$$h = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

h é o teor de umidade, em porcentagem;

m_n é a massa úmida ou natural do material, em gramas;

m_s é a massa seca do material, em gramas.

A análise granulométrica permite conhecer a curva granulométrica das partículas de agregados utilizados na argamassa, ou seja, a distribuição dos tamanhos das partículas minerais. Apesar de alguns trabalhos na literatura utilizarem como referência para obtenção da curva granulométrica as peneiras da série ISO 565 (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002; MARQUES, 2005), que possui as malhas 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 63 μm , pode-se utilizar também as peneiras da série NM-ISO 3310, que são utilizadas nos procedimentos da NM-NBR 248 (ABNT, 2003). Compreender a granulometria do material é importante na decisão de uso deste material para determinado fim, visto que sua distribuição granulométrica pode contribuir positiva ou negativamente na qualidade final do produto em que é empregado. Pode-se tomar como exemplo a adoção de limites de distribuição granulométrica dos agregados miúdos (Tabela 1) que podem ser utilizados em concretos, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 1 – Limites granulométricos dos agregados miúdos

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

A constituição mineralógica das argamassas históricas é de difícil obtenção, tendo em vista as transformações químicas que ocorrem na argamassa ao longo do tempo, sendo então necessário a combinação de técnicas complementares de análise para se atingir este fim (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002). A identificação do principal material ligante utilizado na argamassa, bem como a constituição mineralógica dos agregados, pode ser obtida por uma combinação das técnicas de Difração de Raios-X e Termogravimetria (GLEIZE et al., 2009).

O ensaio de DRX permite a identificação das substâncias cristalinas de amostras pulverizadas, quando a concentração destas substâncias não é muito baixa. A interpretação do ensaio de DRX e consequente identificação da fase cristalina dos materiais é realizada devido à existência de uma extensa base de dados que é atualizada com frequência, as fichas ICDD (MARQUES, 2005). Alguns autores que realizaram a caracterização de argamassas utilizando-se do ensaio de DRX citam algumas limitações deste ensaio na identificação de componentes amorfos típicos de argamassas hidráulicas, como as cimentícias (MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 1995). Por sua vez, Marques (2005) afirma que argamassas hidráulicas podem ser identificadas a partir da identificação de compostos como silicato de cálcio hidratado (CSH), monoaluminato de cálcio hidratado (CAH) e silicoaluminato de cálcio hidratado (CAHS). Outros compostos

típicos de argamassas cimentícias também podem ser identificadas, caso a hidratação do cimento seja incompleta, como o silicato tricálcico C_3S , silicato dicálcico C_2S , aluminato tricálcico C_3A , ferroaluminaferrocálcico C_4AF . Considerando-se as limitações do ensaio na identificação do ligante, este é complementado geralmente pelo ensaio de TGA.

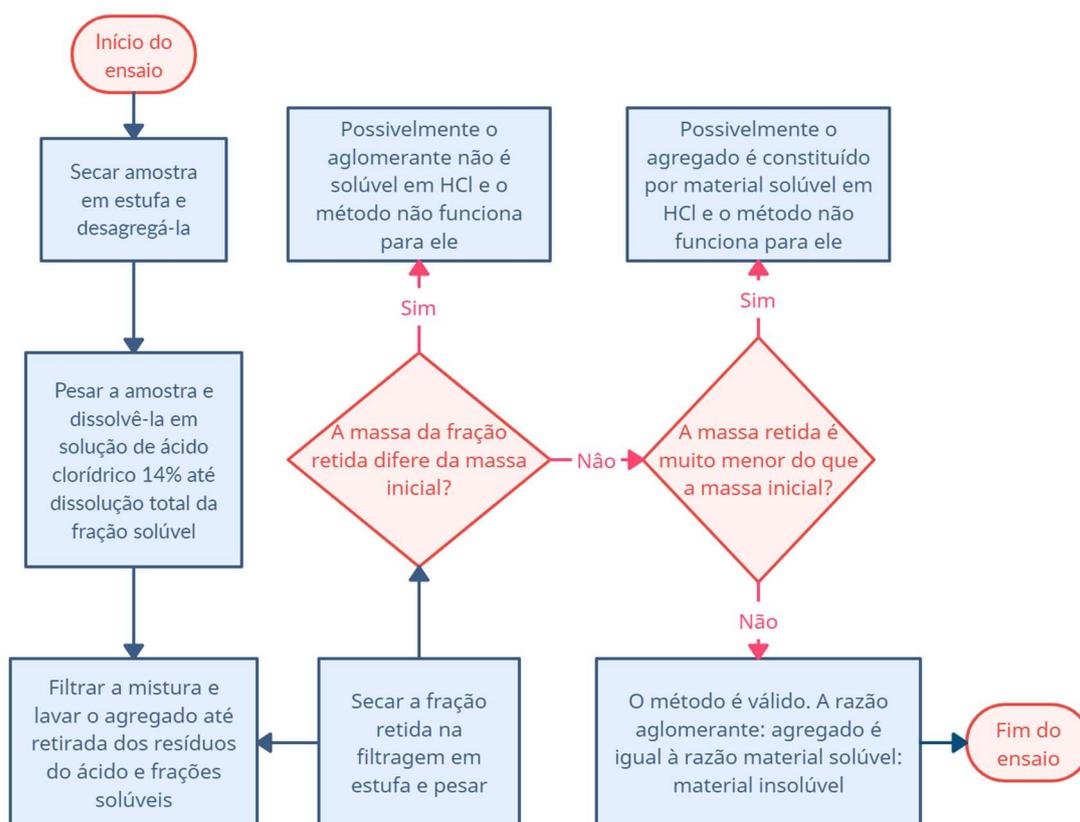
O ensaio de TGA permite realizar o monitoramento da massa de uma amostra de argamassa quando esta é submetida à elevadas temperaturas, obtendo-se desta forma a perda de massa do material por faixa de temperatura, que possibilitam a obtenção de importantes informações do material (MARQUES, 2005).

Na análise dos resultados do ensaio de TGA, é possível observar, por exemplo, que picos endotérmicos e perdas de massa que ocorrem até 120 °C são devidos à água higroscópica, ou seja, a água adsorvida fisicamente no material. Se forem identificados picos entre 120 e 200 °C, pode ser um indicativo da presença de gesso na argamassa. Deve-se considerar que se a quantidade obtida de gesso for muito pequena, esta pode ser proveniente da degradação do material pela reação de sulfatos da atmosfera com cálcio, e não de ligante. A água adsorvida quimicamente, ou seja, proveniente da hidratação de compostos hidráulicos, pode ser identificada a partir de perdas de massa entre 200 e 600 °C, sendo a desidratação da portlandita ($Ca(OH)_2$) detectada entre 400 e 520 °C. Finalmente, a decomposição da calcita ($CaCO_3$) ocorre acima dos 600 °C (MARQUES, 2005; MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 2000).

A partir da combinação da técnica de DRX com TGA, Gleize et al. (2009) identificou três tipos de ligantes utilizados em 9 construções históricas de Santa Catarina (Brasil), datadas entre o século XVIII e XX: Argamassa com cal hidratada, argamassa com cal com baixo teor de hidratação e argamassa de cal adicionada de cerâmica triturada (*crushed bricks*). Biscontin, Birelli e Zendri (2002), por sua vez, identificaram utilizando análises simultâneas de DRX e TGA, diversas argamassas de cal de monumentos históricos italianos.

Finalmente, após a determinação da constituição das argamassas, é possível se obter a razão ligante/agregados da argamassa histórica pelo método do ataque químico, por meio da dissolução das argamassas em uma solução de ácido clorídrico, que irá dissolver as partículas solúveis da argamassa, provenientes do ligante, e manterá as partículas insolúveis, provenientes dos agregados (GLEIZE et al., 2009). A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado das etapas do ensaio de ataque químico.

Figura 2 - Fluxograma do ensaio de ataque com HCl 14%



Este método é indicado para argamassas à base de cal ou gesso ou uma mistura destas, e deve ser utilizada em agregados silicosos. Sua utilização em amostras de agregados não silicosos pode ocasionar erros de interpretação do ensaio, visto que alguns materiais, em especial rochas calcárias, podem ser atacadas pelo ácido e ser interpretadas erroneamente como ligante. Este método de caracterização já vem sendo utilizado por diversos autores na identificação do traço estimado da argamassa histórica, quando não se tem registros do traço originalmente utilizado (ALVAREZ et al., 1999; GLEIZE et al., 2009; MARQUES, 2005).

2.2.2 Deterioração das argamassas

Conhecer os mecanismos de deterioração das argamassas é importante para a compatibilização dos materiais em projetos de reabilitação, especialmente porque, materiais com porosidades distintas podem alterar a permeabilidade de determinadas regiões das alvenarias, facilitando a entrada de água, ou mesmo causar a deterioração a

curto ou longo prazo da argamassa das paredes. Esta deterioração da argamassa pode ter origem em processos químicos, físicos, biológicos ou mecânicos, sendo comum ocorrerem mais de um ao mesmo tempo, e apesar de ainda não se ter total consenso sobre todos os mecanismos de deterioração, serão citados aqui os mais comuns: dissolução de componentes das argamassas, ação de poluentes atmosféricos, cristalização de sais solúveis, efeitos dos ciclos de gelo-degelo, reações de expansão, variações térmicas e higrotérmicas e deterioração devido à causas biológicas (MARQUES, 2005).

Grande parte destes mecanismos de deterioração são ocasionados ou potencializados pela presença da água nas paredes ou pelo fluxo de penetração da água, decorrente principalmente da umidade ascensional. A água nas paredes pode criar processos erosivos, por meio do desgaste contínuo da estrutura interna dos tijolos ocasionada pelo carregamento de pequenas partículas soltas ou que se soltaram devido o fluxo de água; e da dissolução de fases já hidratadas da argamassa. Este processo erosivo aumenta a porosidade e permeabilidade do material e contribui para a redução na resistência mecânica e para a penetração de poluentes e materiais agressivos, que podem entrar nas paredes por umidade ascensional, condensação de vapor de água da atmosfera ou outros meios, como o dióxido de enxofre (SO_2) e o dióxido de nitrogênio (NO_2) presentes no ar atmosférico (COLLEPARDI, 1990; MARQUES, 2005).

Outro mecanismo de deterioração das alvenarias está relacionado com as variações volumétricas ocasionadas pela formação de etringita, taumasita e variações térmicas e higrométricas. Essas variações volumétricas podem gerar tensões internas nas argamassas que podem gerar desagregação no curto prazo, quando a argamassa não é capaz de resistir à variação da tensão gerada, ou no longo prazo, quando as constantes variações térmicas e higrotérmicas geram efeitos de fadiga no material. A cristalização de sais também pode gerar efeitos de fadiga no material, mas os efeitos provenientes da penetração de sais na alvenaria serão tratados em tópico próprio no capítulo seguinte, considerando sua importância nas paredes de alvenaria histórica (ARIZZI; VILES; CULTRONE, 2012; MARQUES, 2005; TESCH; MIDDENDORF, 2006).

2.3 Umidade ascensional

A umidade ascensional pode ser definida como o processo de ascensão capilar de umidade do solo para as paredes das edificações, governadas pelo processo físico da capilaridade. Esta umidade que penetra nas paredes é uma das principais causadoras de

manifestações patológicas que levam à degradação, especialmente em edificações históricas, geralmente construídas sem um processo adequado de impermeabilização (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Apesar da difusão na comunidade científica de conhecimentos relativo aos mecanismos gerais de compreensão da umidade ascensional e a suas formas de mitigação, a total compressão dos mecanismos que provocam ou potencializam a ascensão capilar ainda está longe de acontecer (FRANZONI, 2014). Na primeira parte desta seção, será feita uma revisão dos principais mecanismos que governam a umidade ascensional.

Outro importante tópico a ser estudado para compreensão da importância da umidade nas edificações é o estudo das manifestações patológicas causadas pela penetração de umidade nas paredes de alvenaria, à medida que a água pode causar problemas de natureza física, mecânica e de utilização nas construções, especialmente as históricas (FRANZONI, 2014; TORRES, 2018). Além da umidade em si, a origem dos problemas advindos da presença de umidade nas edificações está intimamente ligada à presença de sais, que possuem a água como principal veículo de transporte (DELGADO et al., 2016). A segunda parte desta seção trata dos problemas ocasionados pela umidade nas edificações, em especial devido à penetração de sais.

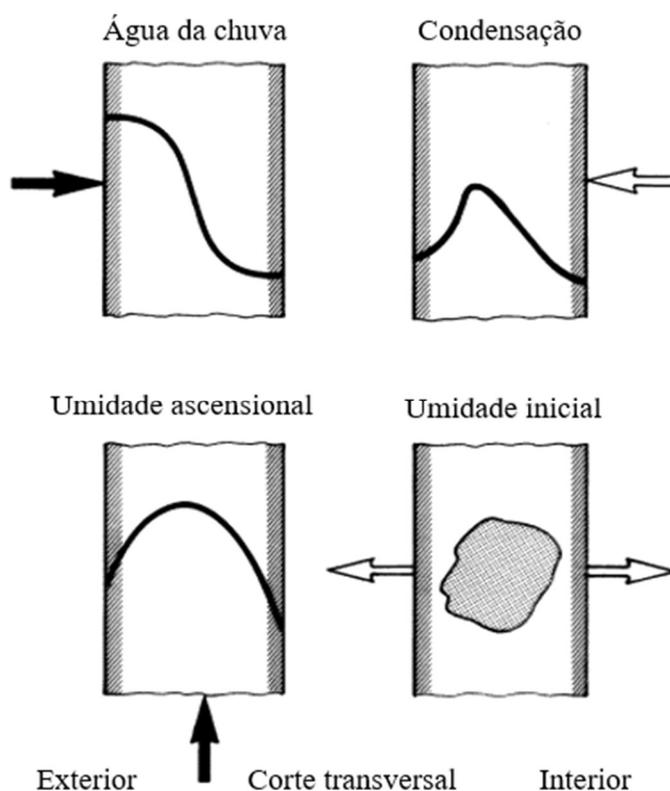
Em seguida, serão apresentados os principais métodos de prevenção e correção da umidade ascensional nas construções. Os métodos de prevenção geralmente são utilizados nas edificações modernas, ainda na sua fase construtiva, já os métodos de correção são utilizados em construções já atacadas pela umidade ascensional em função da ausência de métodos de prevenção da umidade ascensional durante a fase construtiva.

Finalmente, será explanado acerca da utilização de simulações numéricas computacionais no estudo da umidade ascensional, mais especificamente com a utilização do software WUFI 2D. Esta ferramenta, que considera a transferência conjunta de umidade e calor nas paredes, é uma ferramenta de suporte para a obtenção resultados acerca da umidade nas paredes, permitindo-se o controle das condições geométricas das paredes, das condições climáticas do ambiente e das propriedades dos materiais simulados, podendo-se simular diferentes situações em um período determinado de tempo (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008; HOLM; KÜNZEL, 2003).

2.3.1 Fatores condicionantes da umidade ascensional

São vários os mecanismos que contribuem para a entrada de umidade nas paredes de uma edificação. A água pode afetar a edificação já em sua forma líquida, como é o caso da umidade ocasionada pela água da chuva ou devido à umidade ascensional, mas pode também entrar nas paredes da edificação em razão do processo de condensação do vapor de água presente no ar nas faces das paredes ou em seu interior. Ainda, a água pode estar presente na edificação desde o estágio construtivo, podendo estar associada ao excesso de água de hidratação do cimento no processo de mistura de concretos e argamassas, a falhas de proteção contra a chuva das paredes ou dos materiais constituintes durante a fase de construção, dentre outras possibilidades. A Figura 3 apresenta esquematicamente os principais mecanismos de entrada de umidade nas paredes e a distribuição do gradiente de umidade na seção das paredes para cada um destes mecanismos (KÜNZEL, 1995).

Figura 3 – Principais mecanismos de penetração de umidade nas paredes



Fonte: adaptado de Künzel (1995).

Segundo Freitas e Guimarães (2014), a umidade ascensional depende de vários fatores, relacionados às características da parede ou às condições climáticas, como temperatura, umidade relativa do ar, nível de insolação, presença de sais, porosidade dos materiais constituintes da parede, espessura da parede e natureza dos materiais utilizados na construção da parede.

A progressão da umidade na parede é definida como a altura na qual a umidade em ascensão capilar iguala-se à água evaporada. A umidade possui grande relevância neste processo à medida que o gradiente de fluxo de evaporação é dependente da diferença entre as concentrações de vapor de água na superfície da parede e da concentração de vapor de água no ar, para uma mesma temperatura. A evaporação é baixa em locais com grande umidade relativa e é máxima quando a umidade relativa é baixa (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). O fluxo de secagem é definido na equação a seguir:

$$g = \beta \cdot (Cs' - Ca') \quad (3)$$

Onde:

g – Densidade de fluxo ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$);

β – Coeficiente de transferência superficial de umidade (m/s);

Cs' – Concentração de vapor de água à superfície (kg/m^3);

Ca' - Concentração de vapor de água no ar (kg/m^3).

Esta abordagem depende também da higroscopicidade do material. Materiais higroscópicos absorvem água a partir do vapor de água presente no ar, mas materiais não higroscópicos se mantêm secos, não absorvendo moléculas de água do ar. A grande parte dos materiais de construção são higroscópicos (KÜNZEL, 1995).

A altura de ascensão capilar da água nas paredes está diretamente relacionada aos materiais utilizados e suas porosidades. Como os materiais de construção são tipicamente porosos, estes estão sujeitos à ascensão de água por capilaridade, respeitando a Lei de Jurin. Segundo esta lei, a altura de ascensão capilar é inversamente proporcional ao raio dos poros dos materiais. Nas alvenarias, as rochas utilizadas como agregado são naturalmente porosas, e a argamassa cimentícia, no processo de cura e evaporação da água, forma vazios nos quais a água subterrânea pode ascender por capilaridade (ALFANO et al., 2006; RIRSCH; ZHANG, 2010). A Lei de Jurin, que governa a altura de ascensão capilar (h), em metros, é expressa como:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{r \cdot \rho \cdot g} \quad (4)$$

Onde:

γ – tensão superficial (N/m);

θ – ângulo de contato (graus);

r – raio capilar (m);

ρ – densidade (kg/m³);

g – gravidade (m/s²).

Mesquita et al. (2016) por sua vez, afirmam que o cálculo da pressão necessária para a água penetrar em um poro pode ser determinada a partir da expressão abaixo, onde γ é a tensão superficial e θ é o ângulo de contato, e r é o raio do poro.

$$P = - 2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta / r \quad (5)$$

Segundo Alfano et al. (2006), a altura em que a água poderia ascender em materiais de construção civil, que tipicamente possuem raios capilares da ordem de 1 μm , seria de 15 m, porém, na prática esse valor raramente excede 4 ou 5 metros. Isso ocorre devido o equilíbrio entre a ascensão capilar e a evaporação ocorrendo nas paredes, que segundo Rirsch e Zhang (2010), depende principalmente da temperatura, da umidade, da movimentação de ar e das condições superficiais das paredes, como pintura utilizada. Lubelli, Hees e Bolhuis (2018) ainda afirmam que a altura da frente de umidade das paredes dificilmente excederá 1 ou 2 metros, devido à diferença entre os tamanhos dos poros dos diferentes materiais constituintes de uma parede, como os tijolos e a argamassa.

Um dos modelos existentes na literatura, que considera a influência da evaporação na progressão da frente de umidade, é o modelo “Sharp Front”, desenvolvido por (HALL; HOFF, 2007), que parte do princípio de equilíbrio entre a capilaridade e a evaporação (RIRSCH; ZHANG, 2010). Segundo este modelo, a altura, em milímetros, da frente de umidade (H) é dada por:

$$H = S \left[\frac{b}{2e\theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Onde:

S = sorptividade (medida da sucção de água) ($\text{mm}/\sqrt{\text{min}}$);

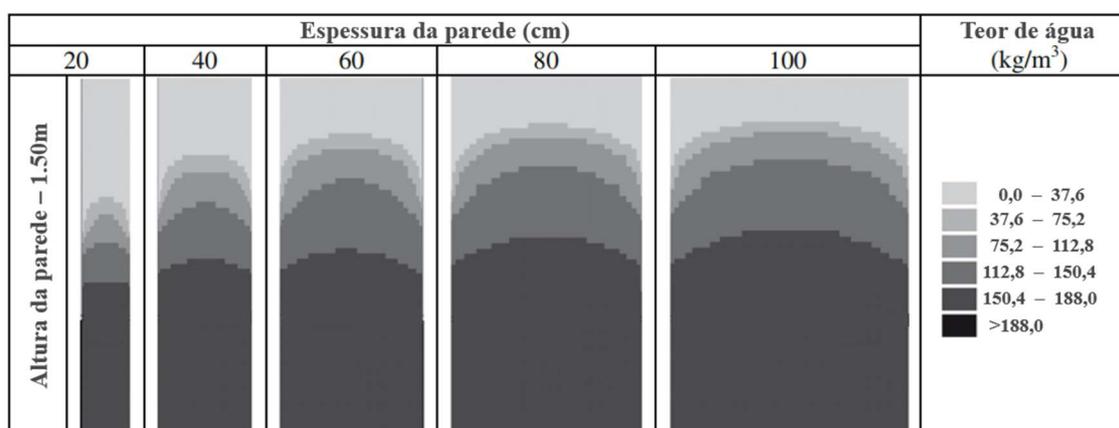
b = espessura da parede (mm) ;

e = taxa de evaporação por unidade de área da parede úmida (mm/min);

θ = teor de água da região úmida (volume de água por unidade de volume do material).

Outro fator relevante na altura alcançada pela água que ascende por capilaridade é a espessura das paredes. Estudo realizado por Torres e Freitas (2010), sobre a eficiência do método de ventilação da base das paredes no tratamento da umidade ascensional de edificações históricas, demonstrou, por meio de simulações computacionais, que a umidade ascensional alcança maiores alturas quanto maior a espessura das paredes, mantendo-se constante outros fatores, como condições climáticas. A Figura 4 apresenta os resultados da simulação da altura de umidade obtidos por Torres e Freitas (2010). O mesmo comportamento é identificado em paredes com e sem o sistema de ventilação estudado, e, muito similar mesmo para diferentes materiais construtivos.

Figura 4 - Simulações da umidade variando-se a espessura das paredes

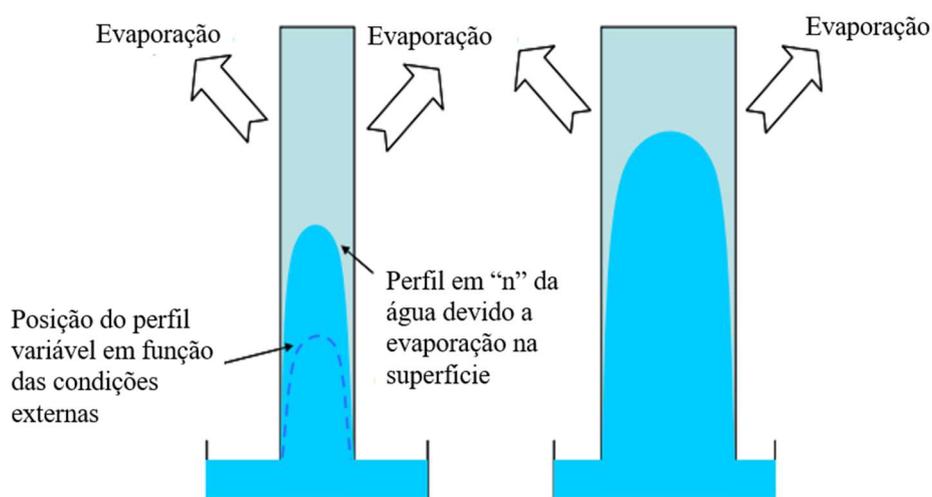


Fonte: adaptado de Torres e Freitas (2010)

Este resultado, segundo Rirsch e Zhang (2010), ocorre em função da mudança no estado de equilíbrio do fluxo de umidade nas paredes visto que há aumento da área absorvente, com conseqüente aumento no fluxo ascendente, sem haver um aumento na área lateral, por onde a água sai das paredes por evaporação. Da mesma forma, isso significa que nas paredes menos espessas haverá proporcionalmente mais evaporação do que capilaridade e a frente de umidade será reduzida até atingir novo estado de equilíbrio. Além disso, devido à evaporação que ocorre nas faces externas das paredes, o perfil de distribuição de água na parede adquire um formato de “n”, que pode ter seu pico maior

ou menor em função da disponibilidade de umidade no solo e de variações de temperatura a que a parede está submetida devido às mudanças sazonais (Figura 5). Esta frente de umidade também aumenta caso a água interna na parede seja impedida de evaporar devido utilização de materiais impermeáveis nas laterais das paredes, como azulejos e cerâmicas (FREITAS; GUIMARÃES, 2014).

Figura 5 - Perfil de umidade ocasionado pela umidade ascensional



Fonte: adaptado de Rirsch e Zhang (2010)

Em abordagens mais complexas da transferência de umidade nas paredes, diversos modelos matemáticos são utilizados para prever o gradiente de umidade nas paredes, como os modelos de Glaser, Krischer-Vos e Philip-De Vries, que são baseados em leis de conservação de massa e termodinâmica. Nestes modelos, as paredes são consideradas corpos heterogêneos formados por diversas camadas, que podem ter três interpretações das condições de contato: continuidade hidráulica, quando há continuidade entre os poros das diferentes camadas; contato natural, quando há contato entre as camadas, mas sem continuidade dos poros das camadas; e ar entre camadas, quando não há continuidade entre os poros e nem contato entre as camadas (FREITAS; ABRANTES; CRAUSSE, 1996).

2.3.2 Problemas ocasionados pela umidade ascensional nas construções

A presença de umidade nos poros das paredes, combinada com outros fatores, ocasiona na parede manifestações patológicas relacionadas a ataques biológicos e químicos, cristalização dos sais nas paredes, dentre outras. Estes fatores podem ocasionar uma série de problemas nas paredes, como perda de massa dos materiais, podendo levar a deficiências estruturais (FRANZONI, 2014).

Dentro das paredes, a água absorvida pode causar mudanças nos volumes dos materiais constituintes, e a ocorrência deste processo de forma constante, com secagem e umedecimento da parede, causa fadiga devido às forças internas geradas por este processo, gerando degradação do material e podendo levar a sua ruína a longo prazo (FREITAS; GUIMARÃES; DELGADO, 2011).

Segundo Franzoni (2014), dentre os fenômenos que contribuem para a penetração de água nas paredes, a umidade ascensional é um dos principais, acometendo as paredes em qualquer fase da vida útil da edificação de forma contínua ou sazonal, ameaçando o desempenho e a conservação das alvenarias, sendo responsável, juntamente com a presença de sais nos poros, por:

- a) Degradação de materiais de construção - Este fator está relacionado principalmente a construções antigas, que, devido à presença de umidade em suas paredes, podem ser expostas a ciclos de congelamento e descongelamento, migração e cristalização de sais, erosão, corrosão de elementos metálicos etc., ocasionando diversos problemas para a integridade das paredes.
- b) Inadequadas condições térmicas e higrométricas em ambientes internos - A saúde dos habitantes e as condições internas de ambientes com paredes úmidas são afetadas negativamente, devido ao aumento da umidade relativa do ar nestes ambientes, com conseqüente crescimento de mofo e redução da qualidade do ar. A ausência de umidade nas alvenarias se tornou, em 1989, um dos requisitos essenciais para fins de higiene e saúde, adquirindo tanta importância quanto os requisitos mecânicos dessas alvenarias.
- c) Ineficiente isolamento térmico de paredes externas - A presença de sais nos poros na alvenaria reduz significativamente o isolamento térmico, ocasionando aumento de até 100% na condutividade térmica em paredes saturadas. Este fator reduz a eficiência de sistemas de aquecimento, com conseqüente aumento do consumo de energia na edificação e aumento do impacto ambiental.

- d) Redução do desempenho mecânico - A resistência à compressão e ao cisalhamento das alvenarias são afetadas negativamente devido à presença de sais em seus poros, sendo de grande importância no pavimento térreo das edificações, visto que as paredes deste nível estão sujeitas a maiores cargas mecânicas e a possibilidade de haver umidade é mais intensa devido à umidade ascensional.

2.3.2.1 Problemas ocasionados pela penetração de sais nas paredes

Dentre os efeitos da umidade citados, um dos mais agressivos dentro das paredes é a penetração de sais, que pode ocorrer facilmente na alvenaria, ocasionando deterioração interna da estrutura das paredes. A entrada de sais na parede ocorre basicamente quando estes sais estão dissolvidos em água, e pode ocorrer através de condensação de água, mas principalmente através de infiltração capilar (DELGADO et al., 2016).

A presença de sais nas paredes pode ocasionar a progressiva deterioração da alvenaria devido o processo de cristalização e solubilização dos sais repetidas vezes devido os ciclos sazonais de mudanças climáticas (FRANZONI, 2014). Além disso, os sais, após cristalizarem dentro das paredes, formam manchas de cor branca, cor de ferrugem ou castanha na superfície das paredes, prejudicando o revestimento (GEWEHR, 2004).

Além do potencial de redução do desempenho mecânico e funcional das paredes, os sais, após penetrarem e se depositarem nos poros das alvenarias, ocasionam redução do raio médio dos poros e aumentam o potencial de capilaridade da parede (LUBELLI; HEES; BROCKEN, 2004). Além disso, os sais podem modificar as propriedades higroscópicas dos materiais, fazendo-os absorver mais umidade sob as mesmas condições externas (KONIORCZYK; WOJCIECHOWSKI, 2009). No mais, a evaporação da água nos poros é dificultada quando há sais cristalizados reduzindo o tamanho destes poros (TORRES, 2018).

Os problemas relacionados à presença de sais nas paredes são ainda mais relevantes considerando-se que a água presente nos materiais de construção nunca é pura, seja proveniente da chuva, de condensação de vapor de água, da umidade ascensional, ou qualquer outra fonte, possuindo sais solúveis como sulfatos, carbonatos e cloretos. Um dos principais sais relacionado à degradação das paredes de alvenaria são os cloretos, em

função principalmente de sua abundância em locais litorâneos e em locais onde se utiliza sais de degelo (GEWEHR, 2004).

2.3.3 Métodos de tratamento da umidade ascensional

A umidade ascensional pode ser tratada ou evitada de várias formas. Diversos métodos de tratamento da umidade ascensional em edificações já construídas são estudados e desenvolvidos atualmente devido a sua importância em edificações históricas, como aplicação de corte hídrico, redução da seção absorvente, eletro-osmose, construção de nova parede separada por câmara de ar e ventilação da base. Já em edificações a serem construídas, a forma mais eficaz de tratar a umidade ascensional é prevenindo-se que esta ocorra através da utilização de impermeabilização dos elementos construtivos.

2.3.3.1 Tratamento em edificações históricas

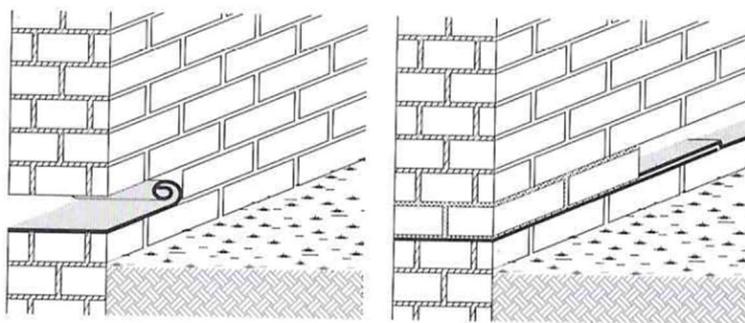
São apresentadas na literatura diversas metodologias de tratamento da umidade ascensional em paredes já existentes de construções históricas, como execução de corte hídrico, que consiste na introdução de barreiras físicas, químicas ou separação de camadas utilizando ar; redução da seção absorvente, que consiste em reduzir a área disponível para a ascensão capilar por meio da redução de área de alvenaria; eletro-osmose, que cria um gradiente elétrico na direção contrária à da movimentação natural da água na parede; aplicação de forro interior separado por um espaço de ar, que parte do princípio de ocultar o problema ao invés de resolvê-lo; e, mais recentemente, a ventilação da base das paredes, que aumenta a evaporação por meio da ventilação (FREITAS; GUIMARÃES, 2014).

Algumas das principais técnicas desenvolvidas e suas características são apresentadas a seguir:

a) Execução de corte hídrico

Este método consiste em inserir na parede uma barreira que impeça a ascensão capilar (Figura 6). Esta barreira pode ser do tipo física ou química (FREITAS; GUIMARÃES, 2014).

Figura 6 - Corte hídrico em paredes



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008)

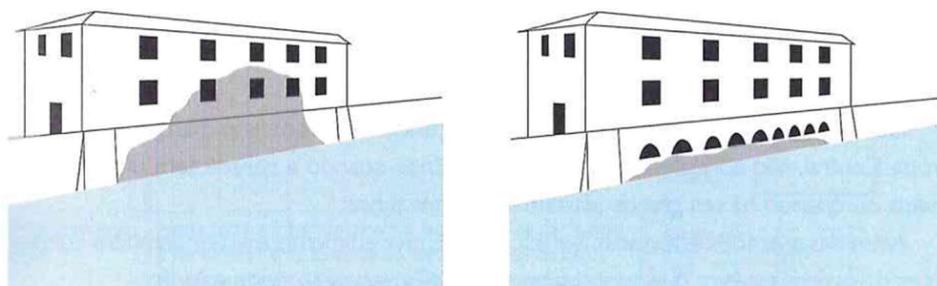
Dentre as barreiras físicas, destacam-se a substituição parcial de alvenaria, que consiste na substituição de partes da alvenaria por materiais impermeáveis; o método de Massari, que se baseia na execução de pequenos furos sucessivos na parede para posterior preenchimento com argamassa impermeável; e o método de Schöner-Turn, que consiste na introdução de barras contínuas na parede por meio de um martelo pneumático (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). As técnicas de barreiras físicas possuem o inconveniente de causarem vibrações ou instabilidade estrutural nas paredes além de poderem causar mudanças na aparência das fachadas (SOCOLOSKI; MASUERO, 2019).

A aplicação de barreiras químicas nas paredes supre as carências apresentadas pelos métodos de barreiras físicas e consiste na introdução, por injeção ou indução, de materiais impermeáveis nos poros das paredes, criando-se assim uma barreira eficaz contra a umidade ascendente (LUBELLI; VAN HEES; HACQUEBORD, 2013). Apesar disto, ainda há alguns cuidados a serem considerados na utilização desta técnica, como um rigoroso controle de penetração do produto nas paredes e escolha criteriosa do material químico mais adequado para cada situação (SOCOLOSKI; MASUERO, 2019).

b) Redução da seção absorvente

Esta técnica possui uma conceituação simples e de fácil execução, sendo caracterizada pela redução da área da parede disponível para ascensão capilar da água. Assim, além da redução da água absorvida, haverá mais área de evaporação na parede, reduzindo a frente úmida (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). Mas apesar da simplicidade da técnica, esta não é usualmente utilizado pois gera modificações arquitetônicas e estruturais na edificação (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Figura 7 - Redução da seção absorvente em paredes

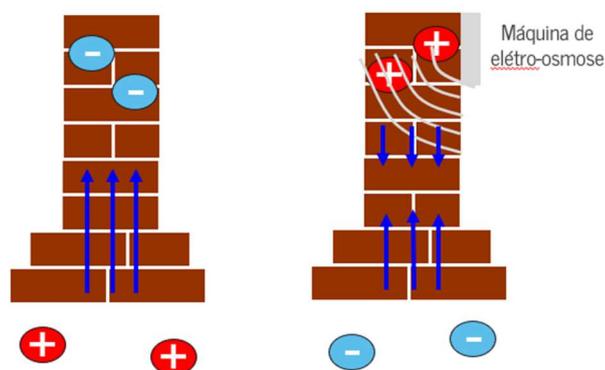


Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008)

c) Eletro-osmose

A técnica de eletro-osmose consiste na criação de um potencial elétrico de sentido contrário ao de ascensão capilar (Figura 8) (FREITAS; GUIMARÃES, 2014), e se utiliza da relação entre os efeitos electrocinéticos relacionados com a migração de água nos poros de materiais (CASAGRANDE, 1952, *apud* FRANZONI, 2018).

Figura 8 - Eletro-osmose em paredes de alvenaria



Na prática, este método busca inserir na parede sondas que funcionarão como ânodo, que deverão ser ligadas à terra, que por sua vez funcionará como cátodo. O método da eletro-osmose possui diferentes designações em função da presença ou não de tensão externa e do material de composição dos eletrodos (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

d) Câmara de ar separando a parede úmida de uma parede nova exterior

Este método consiste na ocultação da manifestação patológica por meio da execução de uma pequena parede na frente da parede original, espaçadas entre si em cerca de 10 cm, criando-se assim uma zona de ventilação na parede original. Para melhorar esta ventilação, são inseridos pequenos orifícios em diferentes níveis da parede original (Figura 9). A parede inserida deve ter sua base impermeabilizada. O grande inconveniente desta técnica é a redução da área útil dos ambientes internos da edificação e a ocultação da parede original (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Figura 9 - Esquema de parede interior separada de exterior por uma camada de ar



Fonte: Freitas e Guimarães (2014)

e) Ventilação da base das paredes

A técnica de ventilação da base das paredes consiste em acelerar o processo de evaporação das paredes por meio da instalação de tubos de ar na base das paredes. Estes tubos podem ser ventilados naturalmente ou por meio de dispositivos mecânicos (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). Esta técnica possui elevada importância e potencial no tratamento da umidade ascensional em edificações históricas, nas quais as técnicas tradicionais não são muito efetivas devido à elevada espessura destas paredes e à heterogeneidade constitutiva da parede (TORRES; FREITAS, 2010).

Algumas ferramentas de suporte à tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento a ser utilizado vêm sendo criadas. Um dos protótipos desenvolvidos para este fim foi desenvolvido por (LUBELLI; HEES; BOLHUIS, 2018). Esta ferramenta, que utiliza o Excel em seu desenvolvimento, permite que os construtores, engenheiros ou arquitetos

escolham diferentes tipos de soluções de tratamento para cada situação e que se comparem as vantagens, limitações e riscos de cada procedimento de tratamento para a situação especificada.

2.3.3.2 Tratamento em edificações modernas

O método mais eficaz de combate à umidade ascensional é evitar que esta ocorra, impedindo a progressão do fluxo da água através da parede. Dito isso, a estanqueidade dos elementos construtivos e consequente aumento da vida útil da edificação são garantidos a partir da adoção de diversos detalhes construtivos na fase construtiva da obra.

A ascensão capilar pode ser reduzida ou evitada através da isenção de membranas impermeabilizantes em torno do perímetro da edificação nas zonas de contato da parede com solo, de forma a reduzir a zona de contato do solo com as paredes da edificação (MØLLER; OLSEN, 2011). Esta impermeabilização geralmente correspondem a membranas à base de betume, polimérica, argilosa, cimentícia, dentre outras (MICHETTE; LORENZ; ZIEGERT, 2017).

Já segundo a NBR 9575, os materiais impermeabilizantes podem ser classificados em 3 grupos principais, de acordo com o material constituinte principal da camada impermeabilizantes: cimentícios, asfálticos e poliméricos (ABNT, 2010) (Tabela 2):

Tabela 2 - Classificação dos impermeabilizantes segundo a NBR 9575

Material constituinte	Material impermeabilizante
Base cimentícia	Argamassa com aditivo impermeabilizante
	Argamassa modificada com polímero
	Argamassa modificada com polímero
	Cimento modificado com polímero
Base asfáltica	Membrana de asfalto modificado sem adição de polímero
	Membrana de asfalto elastomérico
	Membrana de emulsão asfáltica
	Membrana de asfalto elastomérico, em solução
	Manta asfáltica

Base polimérica	Membrana elastomérica de policloropreno e polietileno clorossulfonado
	Membrana elastomérica de poliisobutileno isopreno (I.I.R), em solução
	Membrana elastomérica de estireno-butadieno-estireno (S.B.S)
	Membrana elastomérica estireno-butadieno-estireno-ruber (S.B.R)
	Membrana de poliuretano
	Membrana de poliuréia
	Membrana de poliuretano modificada com asfalto
	Membrana de polímero acrílico com ou sem cimento
	Membrana acrílica para impermeabilização
	Membrana epoxílica
	Manta de acetato de etilvinila (E.V.A)
	Manta de policloreto de vinila (P.V.C)
	Manta de polietileno de alta densidade (P.E.A.D)
	Manta elastomérica de etilenopropilenodieno-monômero (E.P.D.M)
Manta elastomérica de poliisobutileno isopreno (I.I.R)	

Fonte: ABNT NBR 9575 (2010)

As barreiras cimentícias são concretos, argamassas ou cimentos modificados com aditivos e adições poliméricas que formam sais insolúveis e hidrofugantes. Por possuírem baixa capacidade de absorção de deformações mecânicas, são consideradas impermeabilizações rígidas. As impermeabilizações asfálticas, por sua vez, são produtos derivados do petróleo, sendo consideradas impermeabilizações flexíveis. Seu funcionamento baseia-se na aplicação de uma membrana impermeável deste material nas camadas de base da edificação. As barreiras de base poliméricas, finalmente, são mantas pré-fabricadas produzidas a partir de diversos tipos de materiais sintéticos. Assim como as impermeabilizações asfálticas, são aplicadas nas camadas de base da edificação e são consideradas impermeabilizações flexíveis, adaptando-se com facilidade a situações de grandes movimentações e vibrações (IBRACON, 2007).

2.3.4 WUFI 2D no estudo da umidade ascensional

O WUFI 2D, desenvolvido pelo “Fraunhofer Instituts für Bauphysik”, na Alemanha, é um dos mais utilizados programas computacionais de análise da umidade ascensional, permitindo-se a realização de simulações bidimensionais que consideram a transferência simultânea de umidade e calor por meio do método dos elementos finitos. O programa possui uma interface gráfica simples de utilizar, porém robusta nas análises que podem ser realizadas e com uma ampla biblioteca de materiais que podem ser utilizados e alterados (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

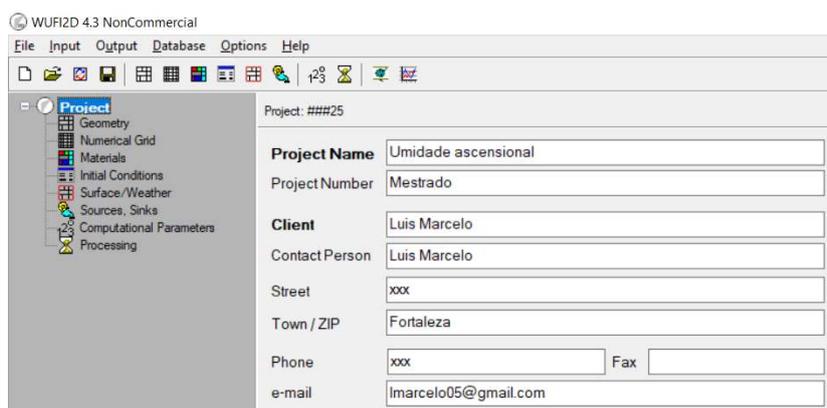
Para realização das simulações no WUFI 2D, uma série de informações de entrada são necessárias, tais como a geometria do elemento de construção a ser analisado, as propriedades dos materiais (que podem ser aproveitadas da biblioteca de materiais disponível no software) e condições climáticas do local.

2.3.4.1 Menu principal

No menu principal do WUFI (Figura 10) são apresentadas as seguintes opções:

- File: Opções de iniciar, salvar e abrir um projeto;
- Input: Opções de introdução das informações iniciais para realização da simulação;
- Output: Visualização dos resultados obtidos;
- Database: Base de dados de materiais previamente medidos e verificados;
- Options: Outras opções do programa;
- Help: Ajuda com a utilização do programa.

Figura 10 - Menu principal do WUFI 2D

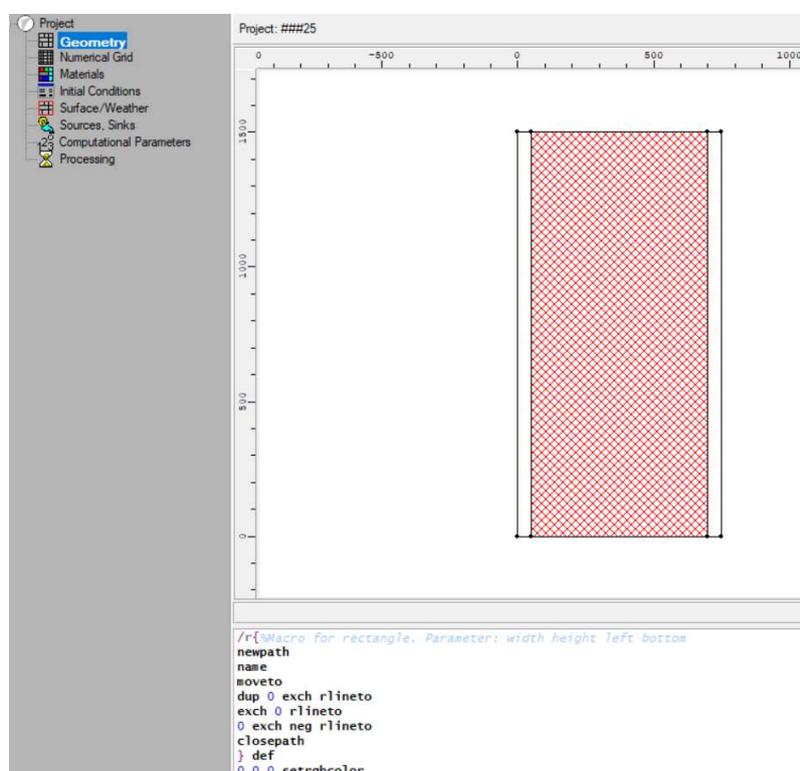


Na área inicial do programa também é apresentada a caixa de informações do projeto, que possui preenchimento opcional e auxilia na identificação do projeto quando se trabalha em mais de uma simulação no programa.

2.3.4.2 Geometria do projeto

Na seção de geometria (Figura 11) podem ser colocadas as informações geométricas de seção dos diversos materiais que compõem o elemento simulado, como espessura e altura.

Figura 11 - Aba de geometria no WUFI 2D

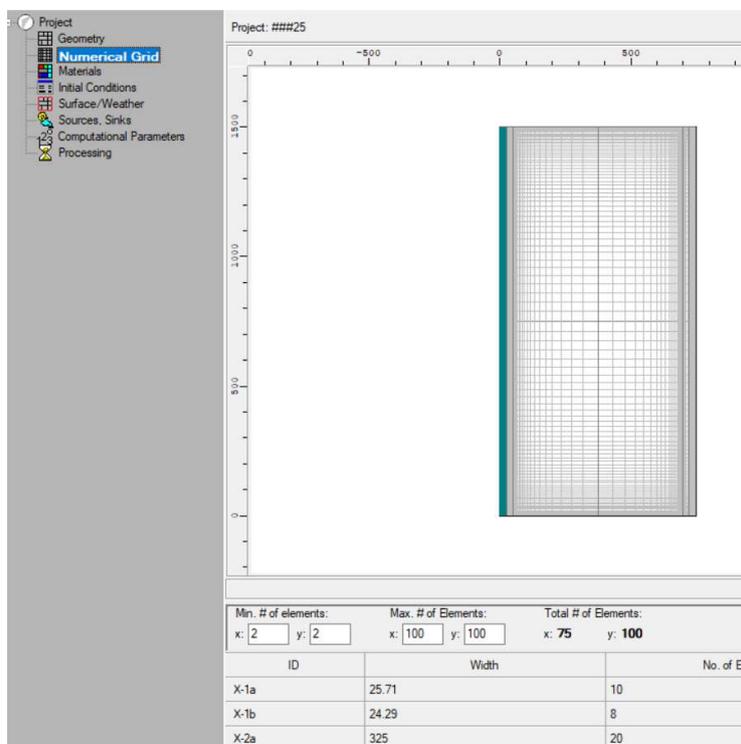


2.3.4.3 Grid numérico

Nesta seção são informadas as propriedades da matriz de elementos a ser utilizada no cálculo numérico por meio do método dos elementos finitos. Quanto maior o número de elementos em cada uma das direções, maior a precisão dos resultados, mas também será maior o tempo de processamento da simulação e a exigência computacional. O número padrão de elementos utilizados no software é de 75 elementos em cada uma das

direções. Nas simulações realizadas nesta dissertação utilizou-se uma matriz de 100 x 100 elementos (Figura 12).

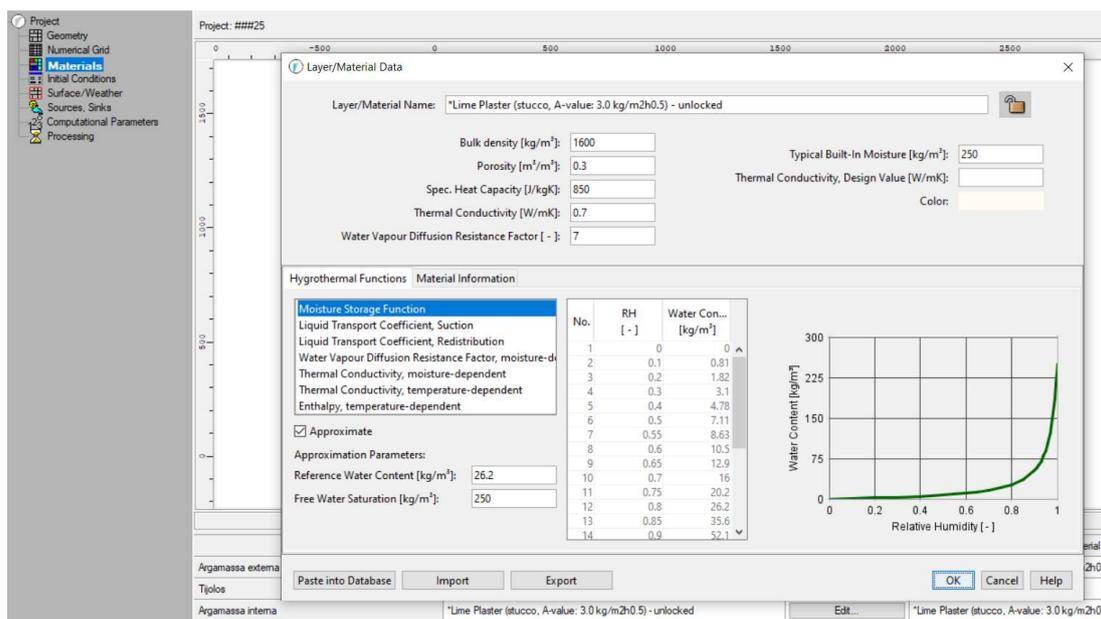
Figura 12 - Aba do grid numérico no WUFI 2D



2.3.4.4 Materiais

Na seção de materiais (Figura 13), pode-se atribuir um material a cada um dos subelementos modelados para formar o elemento construtivo simulado. Pode-se selecionar um dos materiais já inseridos na biblioteca do programa ou inserir um novo material, no qual será necessário inserir as propriedades dos materiais. Pode-se também escolher um dos materiais já inseridos e modificar algumas das suas propriedades, que foi a forma selecionada nas simulações realizadas nesta dissertação.

Figura 13 - Aba de configuração dos materiais no WUFI 2D



2.3.4.5 Condições iniciais

Nesta seção são inseridas as condições de contorno da parede, com as informações de temperatura, umidade relativa e umidade inicial total para cada um dos materiais simulados.

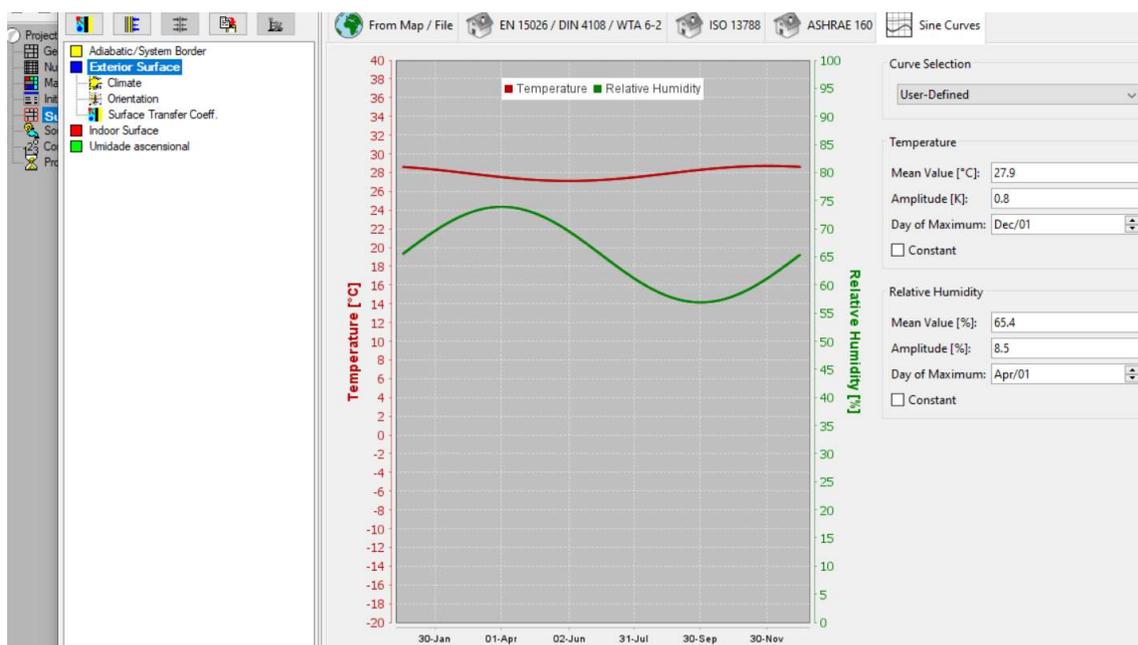
Figura 14 - Aba de condições iniciais no WUFI 2D



2.3.4.6 Superfície/Clima

Nesta seção são inseridas as informações climáticas dos elementos que serão simulados, bem como as propriedades de superfície das faces do elemento criado.

Figura 15 - Aba de configurações de clima e superfície no WUFI 2D

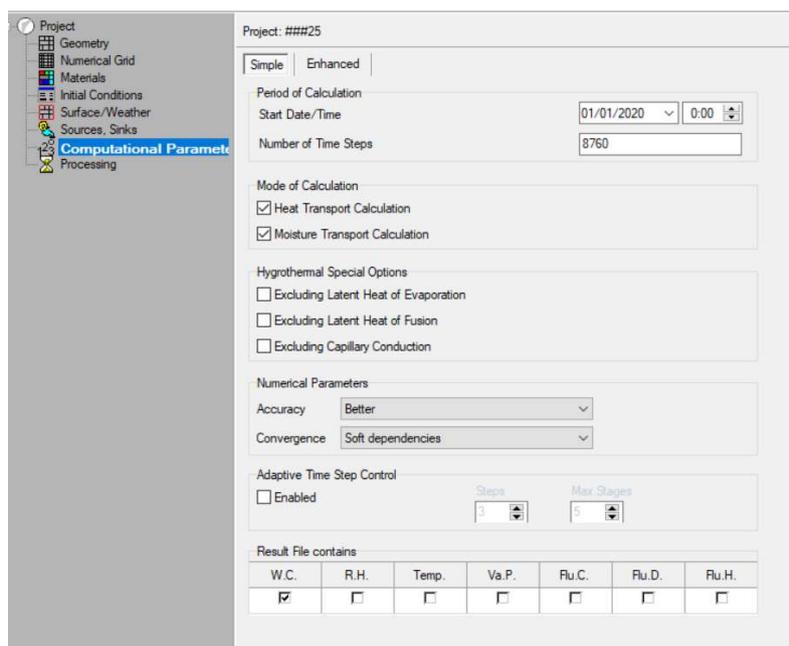


É nesta seção que são inseridas as curvas de umidade e temperatura ao longo do ano a serem aplicadas na simulação, que podem ser coletadas de forma independente e inseridas no software ou estimadas a partir da base de dados já inserida no WUFI para diversas regiões. Além disso, nesta seção é feita a consideração de superfície submetida à umidade ascensional, que consiste em adicionar uma superfície com umidade relativa de 100% e aplicar na seção inferior do elemento.

2.3.4.7 Parâmetros computacionais

Nesta seção são apresentados os principais parâmetros da simulação, como o tempo de simulação; o modo de cálculo, que pode considerar apenas transferência de calor, apenas de umidade, ou ambos; parâmetros do cálculo numérico, como a precisão da simulação e a convergência; e os dados de resultados gerados.

Figura 16 - Aba de parâmetros computacionais no WUFI 2D



O tempo de cálculo e exigência computacional é maior quanto maior for o tempo simulado, em horas, o refinamento dos parâmetros de cálculo e o número de arquivo de resultados que deverão ser gerados.

2.3.4.8 Resultados

Após a realização da simulação, os resultados podem ser analisados de duas formas principais: por meio da curva de absorção de umidade ao longo do tempo de simulação e a representação gráfica do perfil de umidade na seção das paredes ao longo do tempo.

3. “INVESTIGAÇÃO DAS ARGAMASSAS E TIJOLOS DE ARGILA DE UMA ESTRUTURA HISTÓRICA LUSO-BRASILEIRA DO SÉCULO XVIII: A IGREJA DO NOSSO SENHOR DO BONFIM”

DE OLIVEIRA, Luis Marcelo Gomes et al. Investigation of the mortars and clay bricks of a luso-brazilian historic structure from XVIII century: The Nosso Senhor do Bonfim Church. *Journal of Building Engineering*, v. 45, p. 103592, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103592>

3.1 Resumo

As construções históricas (CH) fazem parte da identidade cultural, histórica e arquitetônica de uma comunidade. Desta forma, a manutenção e reabilitação das CH é um esforço cada vez mais necessário para manter estas estruturas em segurança e em bom estado de conservação para as gerações futuras. A caracterização dos materiais pode ser a chave para isso. Caracterizar os materiais das CH pode permitir recolher informações para apoiar a decisão sobre qual a estratégia de conservação a seguir, bem como dar informação sobre as técnicas construtivas empregadas originalmente. Este trabalho tem como principal objetivo investigar as características físicas e químicas de amostras de argamassas e tijolos cerâmicos da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada no centro de Aracati, no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. A Igreja foi construída no século XVIII e a fachada principal apresenta estilo arquitetônico denominado “barroco sertanejo”, que sofreu influência do barroco português e representa uma herança portuguesa do período colonial do Brasil. Os resultados mostraram a existência de duas camadas de argamassas diferentes cobrindo as paredes da Igreja. Foram coletadas informações físicas e sobre a composição original da argamassa, bem como características físicas, mecânicas e mineralógicas dos tijolos cerâmicos. Essas informações podem ser úteis para a seleção de materiais e técnicas de restauro em futuras intervenções na Igreja do Nosso Senhor do Bonfim e contribui para preencher a lacuna de informação sobre a construção histórica luso-brasileira.

Palavras-chave: Patrimônio cultural. Argamassas históricas. Tijolos cerâmicos históricos. Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. Construções históricas luso-brasileiras.

3.2 Introdução

O valor cultural das construções patrimoniais é baseado na representação da tradição, identidade e histórico de uma comunidade. Desta forma, este conjunto especial de edifícios tornou-se parte da memória de uma sociedade (SILVA et al., 2010). Considerando que todos os materiais construtivos estão sujeitos à degradação por ações de deterioração, como o tempo, o meio ambiente e as ações humanas, por exemplo, no caso de estruturas históricas são necessárias intervenções visando a manutenção das edificações ("Carta de Veneza", 1964). No entanto, as intervenções precisam ser realizadas com respeito ao valor cultural e compatibilidade de materiais.

Devido às características das construções patrimoniais, os materiais utilizados na reabilitação devem ser funcionais, compatíveis e não interferir drasticamente nos aspectos visuais das construções (PAPAYIANNI; STEFANIDOU, 2007). Como alternativa a esses padrões, o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) fez recomendações específicas para a análise, conservação e restauração do patrimônio histórico e recomenda que os padrões utilizados em edificações tradicionais sejam aplicados apenas quando as técnicas recomendadas se mostrarem inadequadas (ICOMOS, 2003).

O desenvolvimento de novas técnicas de reabilitação para CH é possível através do estudo deste tipo de estrutura e dos seus materiais construtivos visto este ser é um campo ainda pouco explorado, ao contrário dos edifícios e materiais contemporâneos, que já são exaustivamente estudados (MESQUITA et al., 2015). No entanto, essa não é uma tarefa simples devido a lacuna de informações sobre a composição e propriedades dos materiais históricos, tornando necessário um extenso trabalho de investigação, que pode impactar o custo da reabilitação. Especialmente para países emergentes, como o Brasil, este é um tema relevante, visto que a falta de conhecimentos pode resultar na realização de intervenções equivocadas no patrimônio edificado.

Uma análise global das CH é essencial para a realização de intervenções construtivas (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002). É importante caracterizar as técnicas e os materiais de construção utilizados, uma vez que estas estruturas podem apresentar uma grande variabilidade e complexidade de materiais e sistemas estruturais (MESQUITA et al., 2017). Realizar intervenções usando materiais inadequados pode introduzir danos adicionais à estrutura ao invés de reduzi-los (GLEIZE et al., 2009).

As argamassas históricas consistem em uma mistura de ligantes, agregados e água, onde o ligante geralmente é à base de calcário (DONAIS et al., 2020). A caracterização destes materiais é muito difícil de obter, exigindo um programa experimental complexo em laboratório e equipamentos sofisticados. Além disso, as argamassas históricas podem variar em função de vários fatores intrínsecos a elas, do local onde se encontram e de sua idade (AHMET; AHMET, 1998). Geralmente é necessário uma combinação de técnicas, algumas delas empíricas, para caracterizar as argamassas (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002), como a caracterização física (LUCIE et al., 2019; THIRUMALINI; RAVI; RAJESH, 2018), e a determinação da composição do ligante, que pode ser feita a partir da dissolução dos ligantes (GLEIZE et al., 2009), com o auxílio de Termogravimetria e difração de raios X (BISCONTIN; BIRELLI; ZENDRI, 2002; RISPOLI et al., 2019; STEFANIDOU; PACHTA, 2014).

Por outro lado, os tijolos históricos cerâmicos podem ser considerados materiais homogêneos com grande resistência mecânica, estabilizados sob certas condições de pressão e temperatura (LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005). Os tijolos cerâmicos apresentam propriedades significativamente dependentes dos seus constituintes, como o teor de argila (FERNANDES; LOURENÇO; CASTRO, 2010). Devido a importância deste material na estrutura de edifícios históricos, vários estudos têm sido realizados, visando obter informações sobre suas propriedades físicas (ARAÚJO et al., 2020; BARLUENGA et al., 2014; BHATTARAI et al., 2018; KERSTIN et al., 2003), mecânicas (ARAÚJO et al., 2020; BHATTARAI et al., 2018; KERSTIN et al., 2003) e mineralógicas (BARLUENGA et al., 2014; KERSTIN et al., 2003; LOPEZ-ARCE; GARCIA-GUINEA, 2005).

No caso das construções patrimoniais brasileiras, alguns estudos sobre a caracterização de CH e seus materiais constituintes vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos. No caso do Ceará, foram feitas caracterizações físicas, mecânicas e não destrutivas dos centros históricos de Aracati e Icó (ARAÚJO et al., 2020; FONTENELE et al., 2021; MESQUITA et al., 2018). Em outras regiões do Brasil, um esforço comum para fornecer informações sobre os diversos edifícios históricos existentes também vem sendo desenvolvido (GLEIZE et al., 2009; LOUREIRO et al., 2020).

Este trabalho tem como objetivo investigar a composição e características físico-mecânicas de amostras de argamassa e tijolos cerâmicos coletados na Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada no município de Aracati, estado do Ceará, que faz parte do

patrimônio histórico luso-brasileiro, classificado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN).

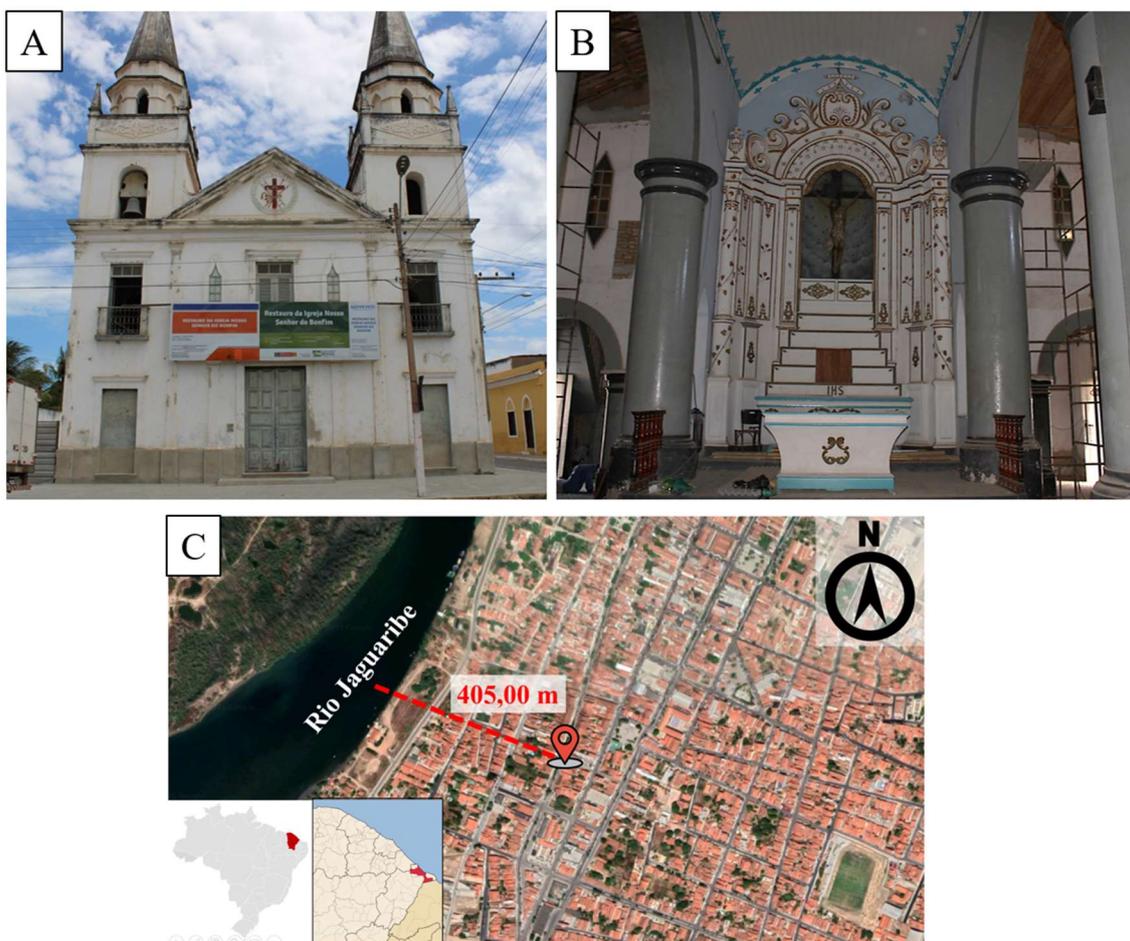
3.3 A Igreja do Nosso Senhor do Bonfim

A Igreja do Nosso Senhor do Bonfim está localizada no centro de Aracati, a cerca de 150 km de Fortaleza, capital do Estado do Ceará. Aracati também fica próxima ao rio Jaguaribe, e no século XVII era a principal vila da região onde hoje é território cearense. Nos séculos XVII e XVIII, Aracati destacou-se economicamente como a mais importante região produtora de algodão, tecidos e produtos bovinos do Ceará (BARBOSA, 2011; SILVA; DIAS, 2020).

Apesar dos altos impostos praticados pela Coroa portuguesa e da dificuldade imposta pelas secas próprias da região durante o período de colonização portuguesa, diversos grandes prédios foram construídos. Neste período, um número considerável de residências, igrejas e prédios públicos foram construídos com ornamentos e materiais vindos diretamente de Portugal, caracterizando a influência da cultura portuguesa na construção da identidade arquitetônica do Brasil (SILVA; DIAS, 2020).

A Igreja do Nosso Senhor do Bonfim foi construída em 1772, apenas 25 anos após a ascensão da vila de Aracati ao status de cidade. O local onde hoje se situa a Igreja originalmente foi ocupada por uma pequena capela (SANTOS, 1917). O Altar-Mor apresenta uma influência barroca, caracterizada por formas ovais arqueadas, curvas e convexas. A alta presença da cor dourada em todos os elementos ornamentais também pode ser notada. Enquanto o interior da Igreja apresenta um número considerável de elementos decorativos e traz referências ao estilo barroco, a fachada principal apresenta duas torres simétricas com detalhes ovais, observando-se nesta parte da Igreja a simplicidade das formas decorativas. O reduzido número de elementos decorativos na fachada é uma característica do que se chama no Brasil de “barroco sertanejo”, estilo arquitetônico de influência barroca portuguesa (BARBOSA, 2011). Os detalhes da fachada e do Altar-Mor são apresentados pela Figura 17, além da sua localização geográfica. A planta baixa dos níveis da Igreja, por sua vez, é apresentada na Figura 18.

Figura 17 - Fachada, Altar-Mor e localização da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim



Várias intervenções foram realizadas na Igreja ao longo dos anos. Em dois casos, a intervenção foi motivada pelas cheias do rio Jaguaribe, em 1820 e 1842. No primeiro caso, registros históricos apontam que foi feita uma reconstrução parcial das paredes. Mas não há registros da extensão dessas reconstruções atualmente. Na intervenção de 1842, apenas foram realizadas reparações no telhado e pequenos procedimentos de reabilitação (SANTOS, 1917).

As torres da Igreja foram construídas em 1854 e intervencionadas em 1878, após desabamento parcial. Também em 1878, foi construída a sacristia, e iniciada a construção do cemitério anexo aos fundos da Igreja – finalizado em 1879 (SANTOS, 1917), onde foram sepultados pessoas de grande poder aquisitivo da cidade e região (SILVA; DIAS, 2020). Em 1883, registros indicam que foi realizada uma intervenção significativa no Altar-Mor, mas não detalham quais. Em seguida, em 1899 e 1906, foram feitos pequenos reparos internos e externos. Estudos recentes indicam que as fachadas da Igreja apresentam um elevado grau de vulnerabilidade, revelando a necessidade de intervenções

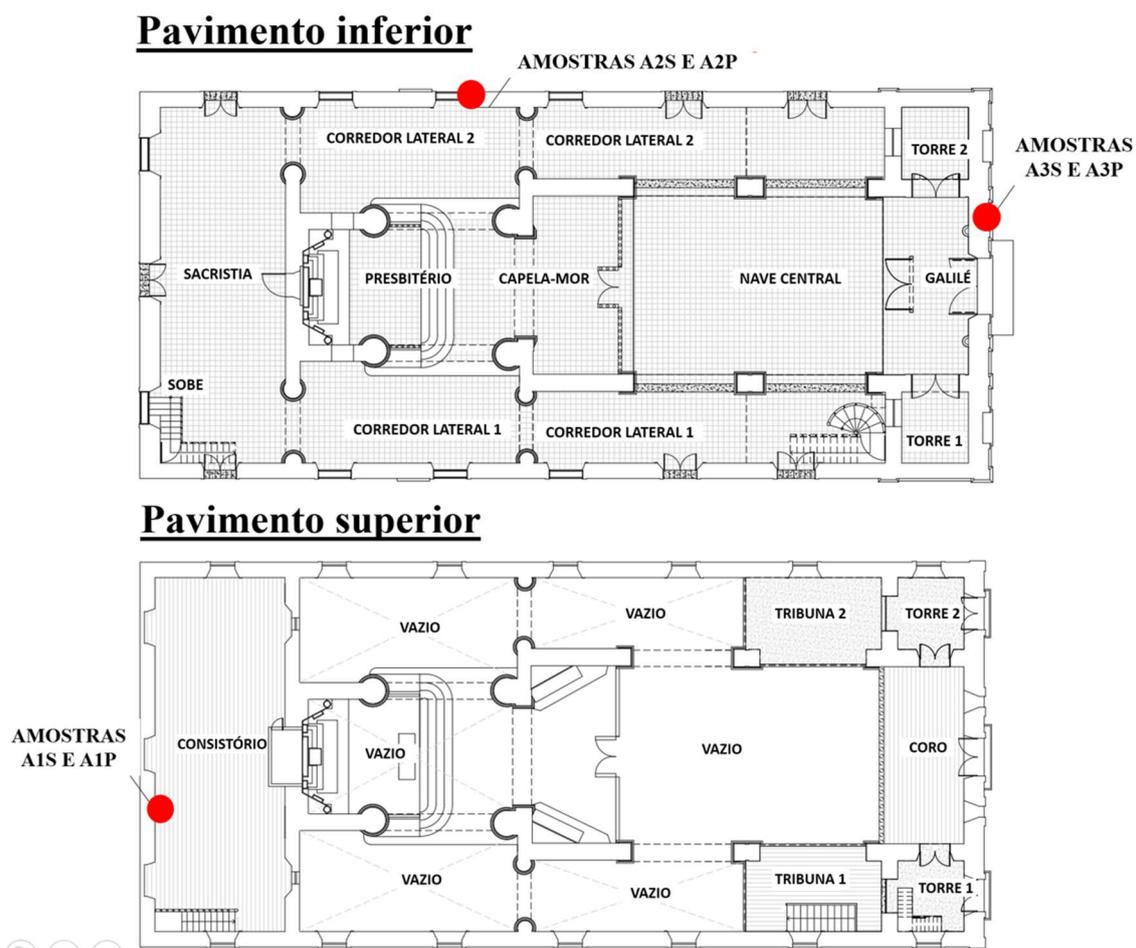
(FONTENELE et al., 2021). Atualmente, a Igreja encontra-se em processo de reabilitação, que inclui reparações arquitetônicas, restauro de elementos decorativos, reparação estrutural, alteração e renovação dos sistemas elétricos e hidrossanitários e instalação de sistema de proteção contra incêndios e para-raios. As paredes afetadas pela umidade ascensional também serão restauradas.

3.4 Materiais e métodos

3.4.1 Coleta de amostras

Para este estudo foram coletadas aleatoriamente 11 amostras de tijolos cerâmicos de paredes internas desmornadas da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. Adicionalmente, foram coletadas 6 amostras de argamassas de 3 locais diferentes, na área interna e externa da Igreja. Para cada ponto de coleta selecionado, foram extraídas argamassas para duas profundidades distintas, caracterizando uma camada externa mais superficial (até 1 cm de profundidade) e uma camada interna mais profunda (2 a 3 cm de profundidade). As argamassas de revestimento das paredes internas apresentaram espessura média de 3 cm. As amostras de argamassas foram recolhidas no Consistório, no piso superior dos fundos do Altar-Mor, na nave lateral e junto à porta principal, na fachada externa, como se pode ver.

Figura 18 – Ambientes da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, com identificação do local de coleta das amostras de argamassas

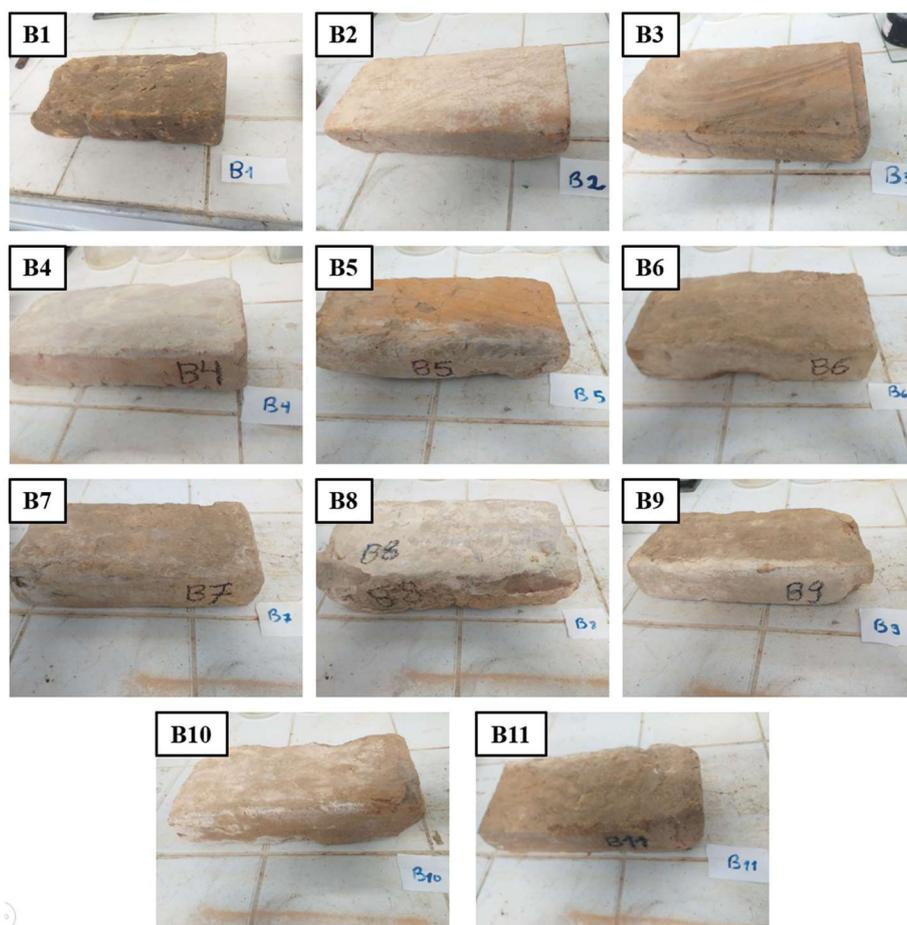


O aspecto visual das amostras de argamassa trituradas e dos tijolos cerâmicos extraídos são apresentados na Figura 19 e Figura 20, respectivamente.

Figura 19 – Aspecto visual das amostras de argamassa



Figura 20 - Aspecto visual das amostras de tijolos cerâmicos



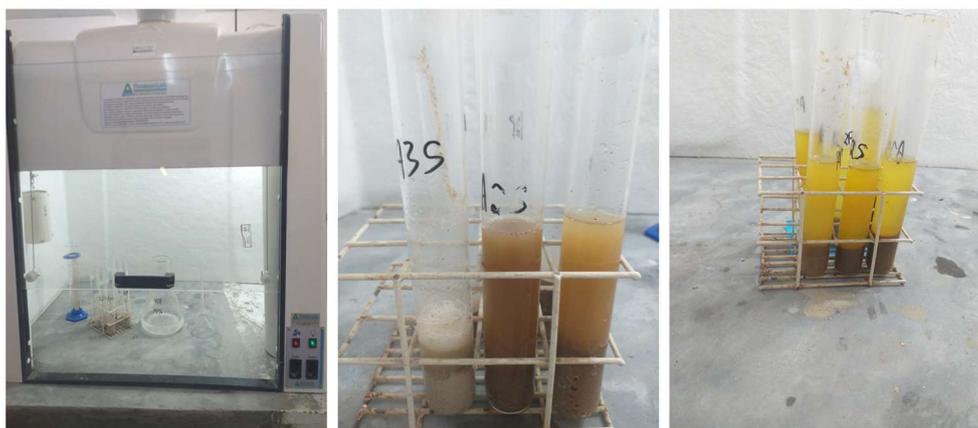
3.4.2 *Ensaio de caracterização das argamassas históricas*

As amostras de argamassas históricas foram submetidas a ensaios para determinação do teor de umidade inicial, da granulometria e da sua constituição. A determinação do teor de umidade foi realizada conforme apresentado na NBR 6467 (ABNT, 2006), pelo método gravimétrico. A granulometria dos materiais foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com o material previamente seco em estufa por 24 ± 4 h. Foram utilizadas peneiras da série normal para agregados miúdos, mais a peneira de abertura 0,075 mm.

A reconstituição do traço das argamassas foi realizada pelo método de ataque químico com ácido clorídrico (HCl) (ALVAREZ et al., 1999). Nesta técnica, as argamassas são atacadas com uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 14%, o que permite a separação entre os componentes solúveis e insolúveis da argamassa, que correspondem às frações de ligante e agregados, respectivamente (Figura 21). Apesar da praticidade

deste ensaio, o mesmo é indicado para a reconstituição de traços de argamassa de cal e gesso com agregados siliciosos, porém, não é indicado quando houver presença de agregados à base de calcário (que são atacados por HCl) ou na presença de aglutinantes com adição de materiais pozolânicos ou outros materiais insolúveis em HCl (ALVAREZ et al., 1999).

Figura 21 - Ensaio de reconstituição do traço por ataque químico



A análise termogravimétrica foi realizada em um equipamento Netzsch STA 449F3, em atmosfera controlada de nitrogênio. Foram utilizadas massas aproximadas de 15 mg por amostra, com faixa de temperatura de 25 a 1000 °C e taxa de aumento de 10 °C/min. A termogravimetria ajuda a determinar os constituintes orgânicos e inorgânicos de amostras de argamassa, analisando o comportamento do material frente à variação de temperatura. A análise mineralógica por DRX, por sua vez, foi realizada utilizando um difratômetro da marca Panalytical, modelo Empyrean. Foram utilizados 2 g por amostra, com faixa angular variando de 5 a 70°, na qual foi possível identificar as fases cristalinas pela incidência do feixe monocromático de raios X. Este procedimento é uma boa estratégia para identificar os componentes das amostras de argamassa, como os tipos de agregados e ligantes presentes.

3.4.3 Ensaios de caracterização dos tijolos cerâmicos históricos

A caracterização físico-mecânica dos tijolos cerâmicos foi realizada através de ensaios para determinação das características geométricas, umidade inicial, absorção de água, resistência à compressão axial, conforme procedimentos descritos na NBR 15270-

2 (ABNT, 2017a). Além disso, a composição das argilas foi analisada por análises de DRX. Previamente aos ensaios experimentais, os tijolos foram submetidos à limpeza da argamassa aderida às suas faces Figura 22.

Figura 22 - Raspagem da argamassa aderida às faces dos tijolos



A caracterização geométrica foi realizada determinando-se as dimensões efetivas das faces dos tijolos, obtendo-se os valores de largura (L), altura (H) e comprimento (C). A determinação do teor de umidade foi realizada pelo método gravimétrico, com os tijolos secando em estufa por 24 ± 4 h a 105 °C. A determinação da absorção de água foi então realizada de acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2017a). A determinação da resistência à compressão foi realizada por dois métodos distintos: pelo método na NBR 8492 (ABNT, 2012), previsto para tijolos de solo-cimento (tijolos B1 a B6), e pela NBR 15270-2 (ABNT, 2017a), previsto para blocos e tijolos de alvenaria (B7 a B11). O módulo de elasticidade dos tijolos (E) foi estimado a partir das curvas tensão X deformação. O teste de difração de raios X foi realizado para identificar a composição mineralógica dos tijolos. O equipamento e os parâmetros de ensaio utilizados foram os mesmos da análise realizada nas argamassas. Nestas análises foram utilizados apenas 3 tijolos, escolhidos aleatoriamente: B2, B4 e B6.

Na determinação da resistência pelo método da NBR 8492 (ABNT, 2012), os tijolos foram inicialmente serrados ao meio e unidos por uma fina camada de argamassa, formando um pequeno prisma. As faces do prisma que serão submetidas a esforços na máquina de ensaios foram então regularizadas com uma camada de argamassa de cerca

de 5 mm, utilizando-se um nível de bolha para se garantir o paralelismo entre as faces em relação ao plano horizontal. No método da NBR 15270-2 (ABNT, 2017a), os tijolos não foram serrados, e foram regularizados com uma fina camada de argamassa em suas faces que serão ensaiadas, utilizando-se também nível de bolha para garantir a horizontalidade Figura 23.

Figura 23 - Preparo dos tijolos para ensaio de compressão



O rompimento dos tijolos foi feito em uma máquina de ensaios universal da marca EMIC, aplicando-se um carregamento de 500 N/s para o método da NBR 8492 (ABNT, 2012) e 0,05 MPa/s para o método da NBR 15270-2 (ABNT, 2017a). Em ambos os casos, o carregamento foi realizado em uma área de 100 x 100 mm dos tijolos, que estavam no estado saturado Figura 24.

Figura 24 - Realização do ensaio de compressão e aspecto dos tijolos rompidos



3.5 Resultados e discussões

3.5.1 Resultados de caracterização das argamassas históricas

Inicialmente, foi realizada uma caracterização visual das amostras históricas de argamassas, bem como foi determinado o teor de umidade inicial no momento da coleta. Os resultados desta primeira análise podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das argamassas históricas

Amostra	Localização		Profundidade de coleta	Aspecto visual de cor	Umidade inicial (%)
	Ambiente	Pavimento			
A1S	Consistório	Superior	1 cm	Escura	1.0%
A1P	Consistório	Superior	2-3 mm	Escura	1.0%
A2S	Corredor lateral	Térreo	1 cm	Esbranquiçada	1.7%
A2P	Corredor lateral	Térreo	2-3 mm	Levemente escura	2.3%
A3S	Fachada principal – exterior	Térreo	1 cm	Esbranquiçada	2.0%
A3P	Fachada principal - exterior	Térreo	2-3 mm	Levemente escura	1.9%

A análise visual da cor das amostras evidencia que as argamassas recolhidas no corredor lateral e na entrada da Igreja, ambas no pavimento térreo, são diferentes ao se variar a profundidade de coleta. Essa diferença não foi observada com as amostras coletadas no Consistório (pavimento superior), que foram semelhantes para ambas as profundidades de coleta. Isso pode ser um indicador de que as paredes do térreo sofreram alterações em suas camadas superficiais de argamassas, possivelmente relacionadas a intervenções, e as paredes do consistório, no pavimento superior, conserva a mesma argamassa original em todas suas camadas.

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 4, permite afirmar com intervalo de confiança de 95% que há diferenças significativas para o teor de umidade de amostras coletadas em diferentes locais. No entanto, quando analisadas as mesmas amostras, mas para diferentes profundidades, não são notadas diferenças significativas de umidade. Assim, o local de coleta das amostras influencia o teor de umidade, enquanto a profundidade de coleta das amostras não apresenta influência significativa.

Tabela 4 – Análise de Variância (ANOVA) do teor de umidade

	Df	P value
Place of sample	2	0.045
Depth of sample collection	1	0.749

Um dos fatores de influência relacionado à variação de umidade em diferentes locais de coleta pode ser o pavimento de coleta de amostras. As amostras A1S e A1P, que possuem as menores taxas de umidade, por se localizarem no 1º piso, são menos sujeitas à umidade ascensional, fator preponderante para a ocorrência de umidade nas paredes inferiores, como é o caso das restantes amostras. Além disso, a possível variação dos materiais constituintes das argamassas coletadas em diferentes locais é um fator que pode influenciar no teor de umidade das amostras, pois pode afetar a porosidade e outras propriedades físicas das argamassas.

As curvas granulométricas das argamassas coletadas são apresentadas na Figura 25. As curvas A1S e A1P encontram-se praticamente sobrepostas, o que contribui para a hipótese de manutenção da argamassa desde a construção da Igreja. Por outro lado, as argamassas A2S e A2P indicam a utilização de agregados de granulometrias diferentes em cada profundidade. O mesmo comportamento é observado ao comparar as curvas A3S e A3P, o que reforça a hipótese de as argamassas são diferentes a depender da profundidade nestes locais. A Dimensão Máxima Característica (DMC) e o módulo de finura das argamassas históricas são apresentados na Tabela 5.

Figura 25 – Curvas granulométricas das argamassas históricas

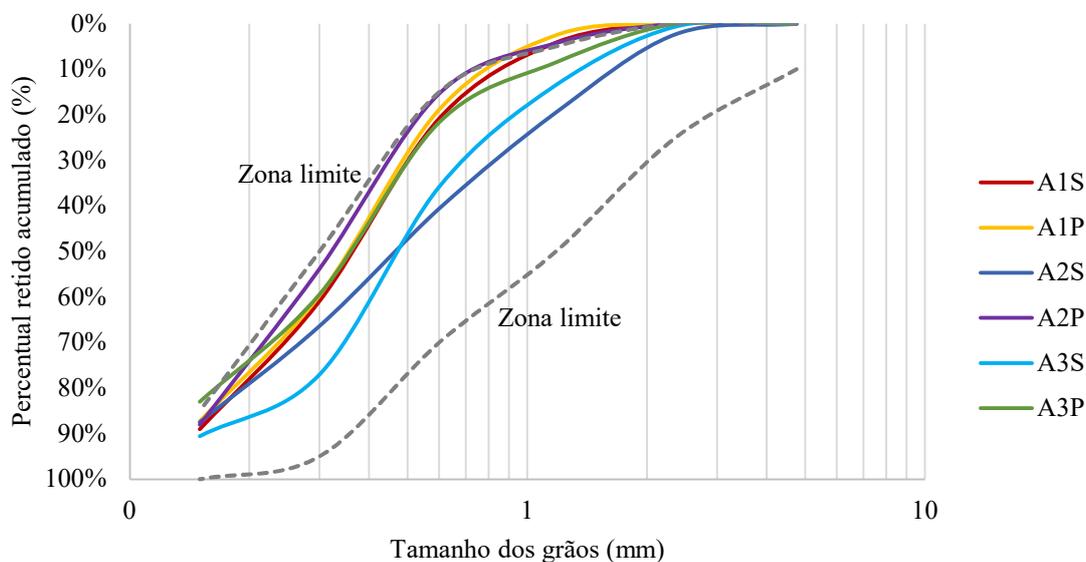


Tabela 5 – DMC e módulo de finura das argamassas históricas

	A1S	A1P	A2S	A2P	A3S	A3P
DMC	1.18	1.18	2.36	1.18	2.36	2.36
Módulo de finura	1.75	1.68	2.16	1.62	2.18	1.73

Apesar das diferenças nas curvas granulométricas dos agregados, todas as amostras coletadas apresentam curva e módulo de finura dentro dos limites utilizáveis de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

A seguir, os resultados do ensaio de reconstituição das argamassas (Tabela 6) demonstram diferenças significativas na mistura quando se varia o local e a profundidade de coleta.

Tabela 6 – Traço reconstituído das argamassas

Amostras	Profundidade de coleta	Aglomerantes/Agregados	Traço (massa)	
			Aglomerante	Areia/Agregados
A1S	1 cm	14.50%	1	6
A1P	2-3 cm	13.40%	1	6
A2S	1 cm	0.80%	1	125
A2P	2-3 cm	4.50%	1	21
A3S	1 cm	0.70%	1	145
A3P	2-3 cm	6.10%	1	16

Com base nos resultados, as argamassas das amostras A1S e A1P são as mesmas, apesar da variação de profundidade, reforçando a hipótese de que essas argamassas não sofreram alterações ao longo do tempo e preservam a argamassa utilizada na construção da Igreja. Por outro lado, as argamassas recolhidas no pavimento térreo da Igreja, A2S, A2P, A3S e A3P, apesar de apresentam semelhanças quando comparadas entre si na mesma profundidade de coleta, apresentaram resultados absurdos. Quando analisadas em diferentes profundidades de coleta as argamassas variam significativamente. Este fato reforça a hipótese de que as paredes do nível térreo da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim sofreram intervenções que utilizaram argamassas com propriedades diferentes das utilizadas na construção original da Igreja, que ainda se encontram nas camadas mais profundas da parede. Possivelmente a argamassa mais superficial, sobreposta à argamassa mais profunda, possui ligante constituído por material insolúvel em HCl, o que pode explicar os resultados obtidos nas amostras mais superficiais. Nas amostras mais

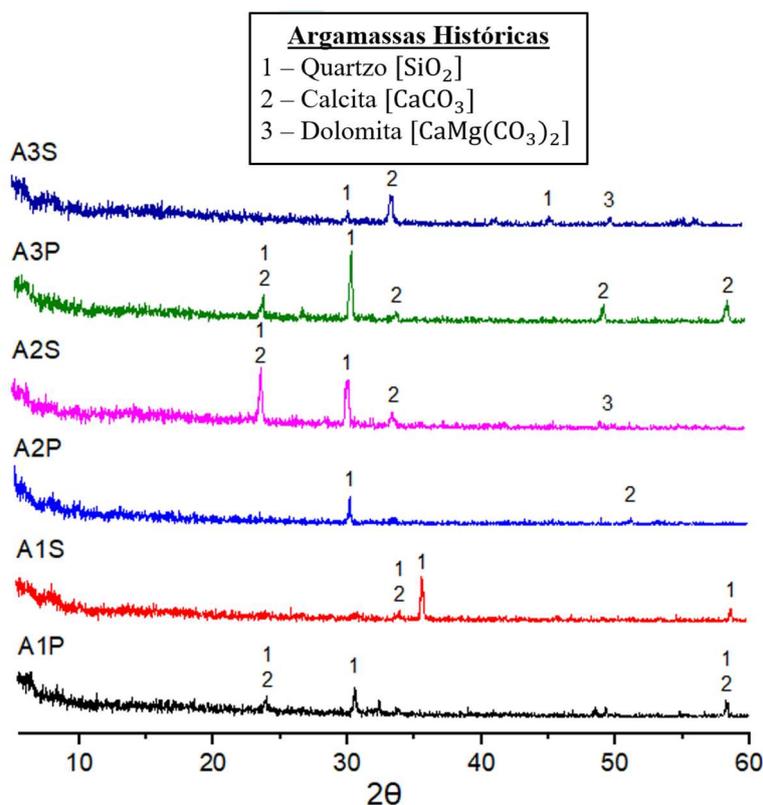
profundas, possivelmente há resquícios da nova argamassa, o que interferiu no resultado do ensaio nestes casos impedindo uma correta reconstituição do traço mais profundo.

As análises quantitativas por termogravimetria e qualitativas por difração de raios X são apresentadas na Tabela 7 e na Figura 26, respectivamente. A perda de massa até 120 °C representa a água higroscópica (fisicamente adsorvida) das partículas. A perda de massa entre 120 e 200 °C indica a adição de gesso à argamassa. Entre 200 e 600 °C, a perda de massa está relacionada à perda de água estruturalmente ligada às partículas, ou seja, para a hidratação dos componentes hidráulicos. A perda de massa em temperaturas acima de 600 °C está relacionada à decomposição da calcita (CaCO₃) (ALMEIDA; SILVA; ALMEIDA, 2017; MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 2000). As curvas de termogravimetria de cada uma das amostras analisadas é apresentada no Apêndice A.

Tabela 7 – Resultados do ensaio TGA

Amostras	Perda de peso por faixa de temperatura (%)				Água para hidratação de componentes hidráulicos (%)
	< 120	120 - 200	200 - 600	> 600	
A1S	1.10	0.31	2.24	2.46	2.24
A1P	1.19	0.26	2.04	1.70	2.04
A2S	2.39	0.41	4.19	2.44	4.19
A2P	2.74	0.37	3.12	1.28	3.12
A3S	2.83	0.59	4.14	11.29	4.14
A3P	2.57	0.36	2.72	1.88	2.72

Figura 26 – Composição mineralógica das argamassas



A análise mineralógica (Figura 26) mostra a predominância de compostos carbonáticos na composição das argamassas, principalmente a calcita. A presença de carbonatos de magnésio nas amostras A2S e A3S são indicadores da utilização de materiais dolomíticos na produção do ligante destas argamassas, o que é uma característica das argamassas de períodos mais recentes (ALMEIDA; SILVA; ALMEIDA, 2017) e pode retratar a sobreposição de uma nova argamassa sobre uma mais velha. A análise revela também uma predominância de agregados siliciosos nas argamassas, com quartzo na sua composição. Dessa forma, a constituição das argamassas é compatível com os recursos geológicos da região do centro de Aracati. As curvas de difração de raios-X de cada uma das amostras de argamassa são apresentadas no Apêndice B.

A análise térmica indica a ausência de gesso nas argamassas devido à baixa perda de massa entre 120 e 200 °C. Moropoulou, Bakolas e Bisbikou (2000) classificam as argamassas em dois grandes grupos: argamassas típicas de cal, com água para componentes hidráulicos em torno de 3,0% ou menos; e argamassas hidráulicas, que contêm mais de 3,5% de água para componentes hidráulicos e incluem argamassas com portlandita e pozolana, que possuem maior teor hidráulico. De acordo com esta

classificação, as argamassas A1S, A1P, A2P e A3P seriam argamassas de cal enquanto A2S e A3S seriam argamassas hidráulicas.

A análise de DRX não indica a presença de materiais pozolânicos ou outros compostos formados pela hidratação do cimento nas amostras, o que sugere que todas as argamassas são típicas de cal, sendo as argamassas A2S e A3S com maior grau de hidráulicidade que as demais, o que pode estar relacionado à sua composição mineralógica ligeiramente diferente.

3.5.2 Caracterização dos tijolos cerâmicos históricos

Os resultados físicos e geométricos da caracterização das amostras de tijolos de argila são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características físicas e geométricas dos tijolos cerâmicos

Amostras	Dimensões			Massa seca (g)	Umidade inicial (%)	Absorção de água (%)
	L (mm)	C (mm)	H (mm)			
B1	160.9	313.4	58.7	5159	2.7%	10.5%
B2	164.2	331.6	66.1	6398	1.1%	12.6%
B3	149.2	318.1	67.1	5264	2.8%	12.2%
B4	173.2	354.0	70.5	6279	1.2%	7.5%
B5	151.4	320.8	65.0	4586	1.0%	14.1%
B6	142.2	316.6	75.0	5469	2.5%	12.3%
B7	149.9	317.0	66.2	4975	2.1%	9.9%
B8	175.1	337.5	83.2	7962	1.1%	9.7%
B9	149.2	318.8	66.5	4750	1.9%	9.2%
B10	165.1	323.5	73.8	5142	1.1%	11.8%
B11	153.5	323.4	70.0	5099	2.0%	10.2%

Os valores médios de largura (L), comprimento (C) e altura (H) são 157,6 mm, 325 mm, 69,3 mm, respectivamente, com coeficiente de variação de Pearson de 6,8%, 3,7% e 9,2%, respectivamente. A dispersão dos resultados indica baixo rigor na fabricação de tijolos, típico do período de sua produção, no século XVIII. A NBR 15270-1 (ABNT, 2017b) estabelece a tolerância máxima nas dimensões dos tijolos estruturais em 3 mm em relação ao valor estabelecido para a classificação do tijolo. Mesmo não sendo possível classificar as dimensões dos tijolos coletados nas classificações padrão da norma, é possível afirmar que os valores dimensionais não atendem aos requisitos

normativos, pois a amplitude nos resultados de largura, comprimento e altura é de 32,9 mm , 40,6 mm e 24,5 mm, respectivamente, muito acima do valor de tolerância.

O teor de umidade dos tijolos varia de 1,0% a 2,8%, com coeficiente de variação de Pearson de 38,7%. A alta dispersão de umidade dos tijolos pode estar associada à aleatoriedade da escolha dos tijolos, que pode ser oriunda de locais com maior chance de entrada de umidade nas paredes (áreas mais baixas das paredes), ou de locais com menor chance de penetração da umidade (áreas mais altas das paredes). Essa hipótese pode ser verificada em novas pesquisas que façam a rastreabilidade dos tijolos dentro da construção ao invés de selecionar as amostras de forma aleatória.

A absorção de água média dos tijolos foi de 10,9%, com coeficiente de variação de Pearson de 17,1%. Com exceção do tijolo B4, todos apresentaram absorção máxima dentro dos limites estabelecidos na NBR 15270-1 (ABNT, 2017b) para tijolos maciços estruturais. A maior dispersão dos resultados pode estar associada a alterações na estrutura interna dos tijolos durante o processo de secagem a 105°C utilizado nos ensaios, o que pode ser evidenciado pelo aparecimento de pequenas trincas durante este procedimento (Figura 27).

Figura 27 - Tijolos fraturados após secagem



Os resultados de compressão axial dos tijolos são mostrados na Tabela 9. Os tijolos testados de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012) possuem resistência média de 17,2 MPa, com coeficiente de variação de Pearson de 41%, enquanto os tijolos ensaiados pelo método descrito na NBR 15270-2 (ABNT, 2017a) apresentaram resistência média à compressão de 15,6 MPa, com coeficiente de variação de Pearson de 44%. A dispersão nos resultados obtidos nos dois métodos pode ser resultado do baixo rigor na produção dos tijolos, hipótese já levantada quando analisados os resultados de absorção de água. A possível falta de repetibilidade na metodologia de produção de tijolos, aliada ao mau controle de qualidade, pode ter gerado características significativamente diferentes nos

mesmos ao se comparar um tijolo a outro. Um dos indícios que reforça a hipótese da falta de rigor na produção dos tijolos é obtido através da análise visual da cor do interior dos tijolos durante o processo de corte e quebra. Esta análise visual indica variações significativas na queima dos tijolos durante sua produção, o que não respeita um dos critérios de produção de tijolos cerâmicos estabelecidos na NBR 15270-1 (ABNT, 2017b).

Tabela 9 – Resultados do ensaio de compressão axial dos tijolos cerâmicos

Método de ensaio	Velocidade de carregamento	Amostra	Resistência à compressão (MPa)
NBR 8492	500 N/s	B1	6.69
		B2	23.42
		B3	16.98
		B4	27.42
		B5	17.54
		B6	10.87
NBR 15270	0.05 MPa/s	B7	9.94
		B8	27.47
		B9	15.06
		B10	12.38
		B11	13.32

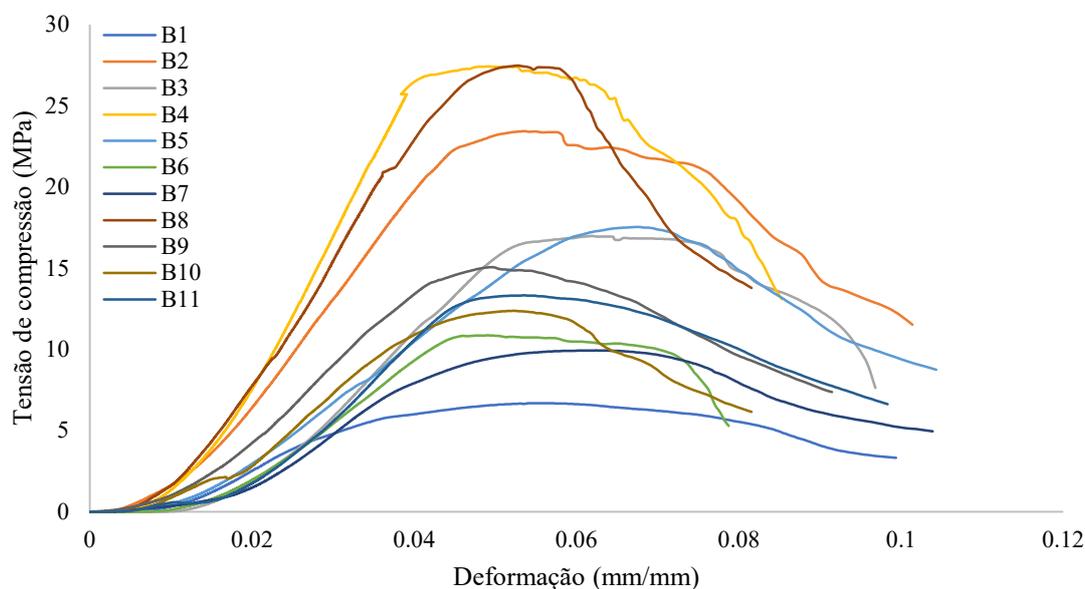
Apesar da dispersão dos resultados em cada método para determinação da resistência à compressão das amostras, a semelhança dos valores médios e de variação para as duas técnicas de ensaio indicam que a metodologia de ensaio escolhida não interfere nos resultados. Esta hipótese é reforçada pela ANOVA apresentada na Tabela 10, que permite afirmar, com intervalo de confiança de 95%, que não há diferenças significativas entre os resultados de resistência obtidos pelos dois métodos de teste para os resistências à compressão dos tijolos coletados na Igreja do Nosso Senhor do Bonfim.

Tabela 10 – Análise de Variância (ANOVA) do método de ensaio de compressão

ANOVA					
	SS	Df	MS	F	P
Interseção	18701.17	1	2933.24	54.57	0.000042
Método	18.06	1	6.35	0.12	0.7389
Erro	2.61	9	53.76	-	-

Considerando os resultados agrupados dos dois métodos de ensaio, a resistência média do tijolo é de 16,5 MPa, com variação do coeficiente de Pearson de 43%. As curvas de tensão-deformação do tijolo cerâmicos são mostradas na Figura 28.

Figura 28 - Curvas tensão x Deformação dos tijolos cerâmicos



A Tabela 11 apresenta os valores do módulo de elasticidade estimado dos tijolos e a deformação na tensão máxima de cada um.

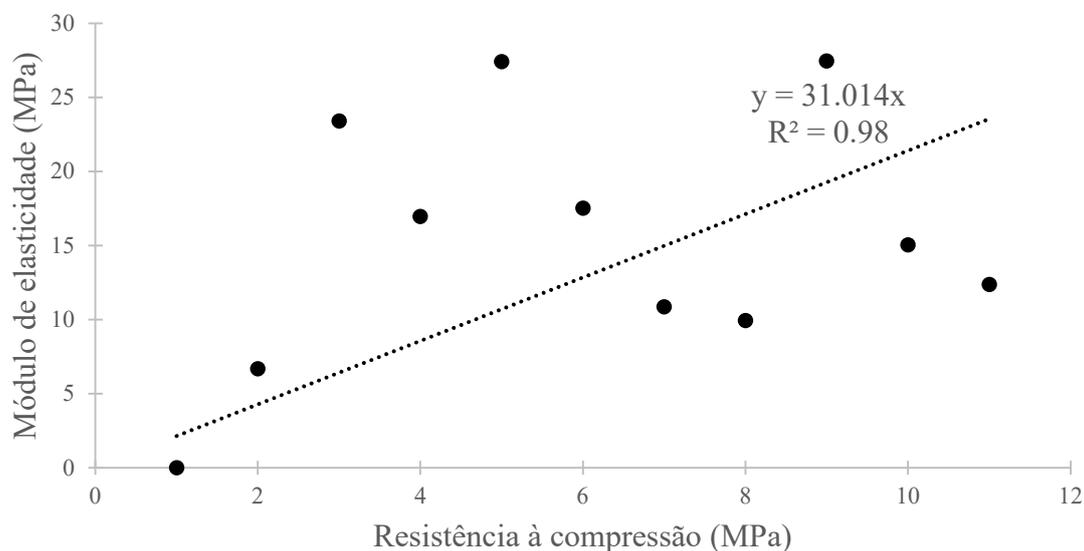
Tabela 11 – Módulo de elasticidade estimado dos tijolos

Amostras	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
Módulo de elasticidade (MPa)	121	676	498	961	380	389	347	860	474	369	488
Deformação na tensão máxima (%)	5.5	5.3	6.2	4.9	6.7	4.1	6.3	5.3	5.0	5.2	5.4

A deformação na deformação máxima da amostra varia de 4,1% a 6,7%, conforme as curvas de tensão x deformação da Figura 28, com valor médio de 5,4%. O módulo de elasticidade, por sua vez, varia de 121 MPa a 961 MPa, com média de 506 MPa, o que pode novamente estar associado a um baixo rigor na produção de tijolos, que afetou sua estrutura interna e, conseqüentemente, suas propriedades de rigidez. Ao correlacionar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos tijolos, fica evidente uma correlação linear entre os resultados (Figura 29). Os dados se ajustam ao modelo linear E

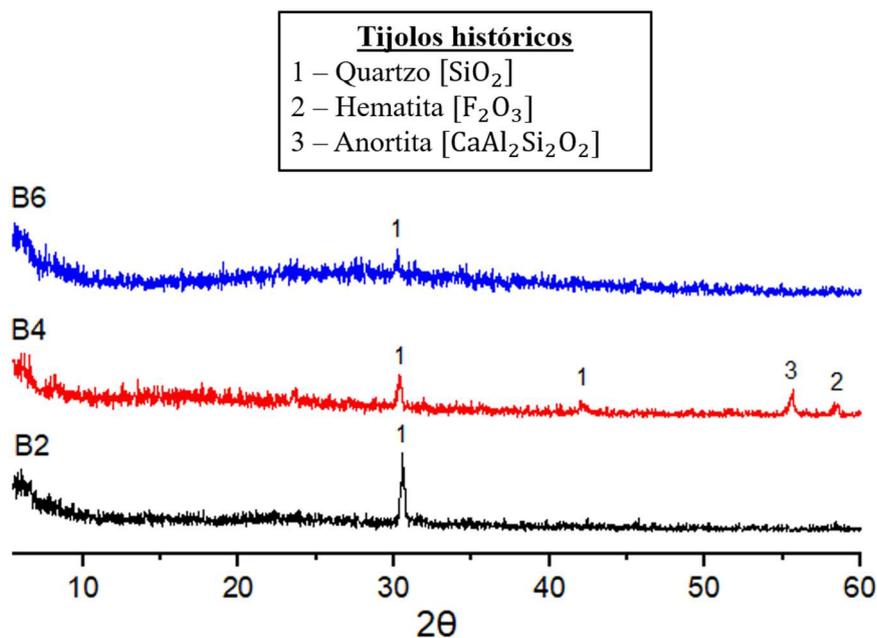
= $31f_c$, dentro da faixa de resistência à compressão, f_c , de 6,69 MPa - 27,47 MPa, obtendo-se um Coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$, para uma interseção igual a zero.

Figura 29 – Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial



Mesmo com a significativa dispersão entre os valores de resistência à compressão, há uma alta correlação entre os valores de resistência e o módulo de elasticidade, o que é um indicativo da similaridade da estrutura cristalina interna dos tijolos, o que garante sua rigidez. Isso é evidenciado pelos resultados dos testes de DRX (Figura 30), que indicam a predominância de um elemento na composição dos tijolos cerâmicos analisados, o quartzo, apesar da presença de hematita e anortita no tijolo B4. Além disso, a composição de tijolos cerâmicos condiz com a natureza geológica da região. As curvas de difração de raios-X de cada um dos tijolos ensaiados é apresentado no Apêndice B.

Figura 30 – Composição mineralógica dos tijolos cerâmicos



3.6 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal identificar e caracterizar as composições de argamassas e tijolos cerâmicos utilizados na Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, localizada em Aracati, Estado do Ceará, Brasil.

Os resultados indicam a presença de duas argamassas diferentes nas paredes da Igreja, sendo uma delas possivelmente a argamassa utilizada na construção, encontrada nas camadas mais profundas das paredes, e a outra uma argamassa utilizada nas paredes do piso térreo sobrepondo a camada de argamassa mais antigas. Identificou-se o uso predominante de agregados siliciosos em argamassas e compostos carbonáticos, o que evidencia o uso de ligante à base de cal.

A reconstituição de argamassas antigas realizada pelo método de ataque químico resultou em um traço estimado de 1:6 (ligante: agregados) em massa. Para tijolos maciços, os resultados mostram que a variação nos valores das medidas de face, absorção de água e resistência à compressão indicam uma variabilidade durante a produção. Os valores de resistência à compressão dos tijolos indicam que não há diferenças significativas nos resultados de resistência quando testados de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012) ou de acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2017a).

Os resultados encontrados contribuem para demonstrar a complexidade das edificações históricas e identificar vestígios dos processos construtivos utilizados na construção e reparos realizados, informações necessárias para definir as técnicas de reparo e materiais a serem utilizados, a fim de garantir maior durabilidade e respeito ao valor cultural do patrimônio histórico.

Além disso, esta pesquisa demonstra a importância de combinar diferentes técnicas de caracterização geométrica, física, mecânica e mineralógica no estudo de argamassas e tijolos históricos. Além disso, estudos adicionais visando caracterizar as propriedades físicas e termo-higrométricas e outras informações sobre as propriedades dos materiais possibilitam a seleção da estratégia mais adequada para intervenção em edifícios históricos.

4. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DOS TIJOLOS, E ARGAMASSAS, PINTURA E SAIS NA UMIDADE ASCENSIONAL EM CONSTRUÇÕES BRASILEIRAS ANTIGAS

DE OLIVEIRA, Luis Marcelo Gomes et al. Influence of the bricks and mortar characteristics, paint, and salts on the rising damp in ancient Brazilian constructions. **Journal of Building Engineering**. Submetido em: 28 de fevereiro de 2022.

4.1 Resumo

A umidade ascensional é uma das principais causadoras de degradação e patologias nas edificações, em especial as construções históricas (CH), que, de forma geral, são desprovidas de impermeabilização em sua base e são compostas por materiais antigos e sensíveis à umidade. Este é um fenômeno complexo, influenciado por transferências de calor e umidade. Este trabalho tem como objetivo realizar a análise da influência de diversos fatores na umidade ascensional nas CH, tais como a espessura dos tijolos das paredes, a espessura da camada de argamassa, o tipo de pintura utilizada, a composição da argamassa e a presença de salinidade da água de ascensão capilar. A análise numérica foi realizada por meio de simulação computacional no software WUFI 2D, tomando-se como referência a caracterização dos materiais da Igreja luso-brasileira do Nosso Senhor do Bonfim, datada do século XVIII, localizada no município de Aracati, no estado do Ceará, Brasil. Os resultados demonstraram que a variação dos fatores estudados, com exceção da espessura da camada de argamassa, impactam diretamente na ascensão capilar, o que confirma a importância do estudo das propriedades das paredes históricas em processos de restauro, de forma a evitar ou reduzir a ocorrência da umidade ascensional.

Palavras-chave: Construções históricas. Umidade ascensional. Igreja do Nosso Senhor do Bonfim. Simulação computacional. Patrimônio cultural e histórico.

4.2 Introdução

A presença de umidade nas construções é uma das principais causas de patologias construtivas, sendo considerado por alguns autores como a principal causa (PEREIRA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018). A presença de umidade nos elementos construtivos

pode advir de diversas situações, dentre as quais se destaca a umidade ascensional (TORRES, 2018), que é definida como a ascensão de água do solo para as paredes da construção pelo processo físico da capilaridade (SARDELLA; LUBELLI; BONAZZA, 2021).

A umidade ascensional é o mais comum meio de penetração de umidade nas construções, causando problemas relacionados à conservação da edificação e performance dos materiais, tais como: degradação dos materiais construtivos, condições de temperatura e umidade impróprias em ambientes internos, redução da capacidade de isolamento térmico as paredes externas e redução da performance mecânica das paredes (FRANZONI, 2014). Este fenômeno é mais comum e agressivo nas CH, visto que estas geralmente não possuem impermeabilização na base das paredes e seus materiais construtivos são mais suscetíveis a danos causados pela umidade (SARDELLA; LUBELLI; BONAZZA, 2021).

A ascensão capilar nas paredes de alvenaria depende de diversos fatores, que incluem a presença de sais, a espessura das paredes, a natureza dos materiais componentes e a configuração da seção das paredes, como a presença de pinturas (RIRSCH; ZHANG, 2010; TORRES, 2018). Segundo (ALFANO et al., 2006), os materiais componentes da alvenaria possuem relação com a altura da frente úmida, à medida que a capilaridade está intimamente ligada à estrutura porosa do material. A presença de sais, por sua vez, além de deteriorar as paredes e causar problemas relacionados à estética e à durabilidade dos materiais, pode aumentar o potencial capilar à medida que a deposição destes sais na forma sólida nos materiais pode alterar sua composição porosa (FRANZONI, 2014; TORRES, 2018).

Apesar do conhecimento já existente acerca dos princípios que regem a umidade ascensional, sua mitigação não é simples, havendo diversas técnicas para redução ou extinção da umidade, que devem ser escolhidas considerando as características da edificação, tais como execução de corte hídrico, redução da seção absorvente, eletro-osmose, ventilação da base e injeção de barreiras químicas (FRANZONI, 2014; FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008; LUBELLI; VAN HEES; HACQUEBORD, 2013).

A completa compreensão da umidade, bem como a seleção das melhores técnicas de mitigação dela, ainda é um desafio. Diversos trabalhos práticos têm sido desenvolvidos para compreender melhor este fenômeno (GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013; SANDROLINI; FRANZONI, 2006), avaliando na prática a influência de variados fatores

na umidade ascensional, tais como a espessura e configuração das paredes (TORRES; FREITAS, 2010) e a inserção de um sistema de mitigação da umidade (FREITAS; GUIMARÃES; DELGADO, 2015; SOCOLOSKI; MASUERO, 2019).

Estudos analíticos do fenômeno da umidade ascensional têm se mostrado como uma importante ferramenta para a compreensão deste fenômeno, à medida que as análises fornecem previsões consistentes com as situações reais (GUIMARÃES; DELGADO; FREITAS, 2013). Um dos modelos de cálculo que considera a transferência simultânea de umidade e calor nas paredes de alvenaria foi utilizado como base em no software de simulação WUFI 2D, já fortemente validado experimentalmente (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008; HOLM; KÜNZEL, 2003). Esta ferramenta se mostra como uma grande aliada no estudo da umidade nas CH, podendo-se considerar os diversos e complexos fatores inerentes a este tipo de edificação.

A utilização de simulações computacionais se mostra especialmente importante no estudo das CH brasileiras, que, apesar de já contar com diversos estudos relacionados à caracterização estrutural, construtiva e histórica (FONTENELE et al., 2021; GLEIZE et al., 2009; LOUREIRO et al., 2020; MESQUITA et al., 2018), ainda carece de pesquisas relacionadas à umidade ascensional no contexto da preservação do patrimônio histórico, que é um dos principais objetivos do Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios (ICOMOS) e da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) ("Carta de Veneza", 1964).

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é contribuir, por meio da simulação computacional com WUFI 2D, no estudo dos fatores que podem impactar na umidade ascensional, tomando-se como base a igreja brasileira do Nosso Senhor do Bonfim, localizada no município de Aracati, estado do Ceará, que é parte da herança construtiva luso-brasileira, tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN).

4.3 Simulação numérica das alvenarias antigas

4.3.1 Informação dos materiais

As alvenarias analisadas foram modeladas utilizando como referência as características dos materiais e componentes das paredes de alvenaria da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, uma CH localizada no município de Aracati e já previamente

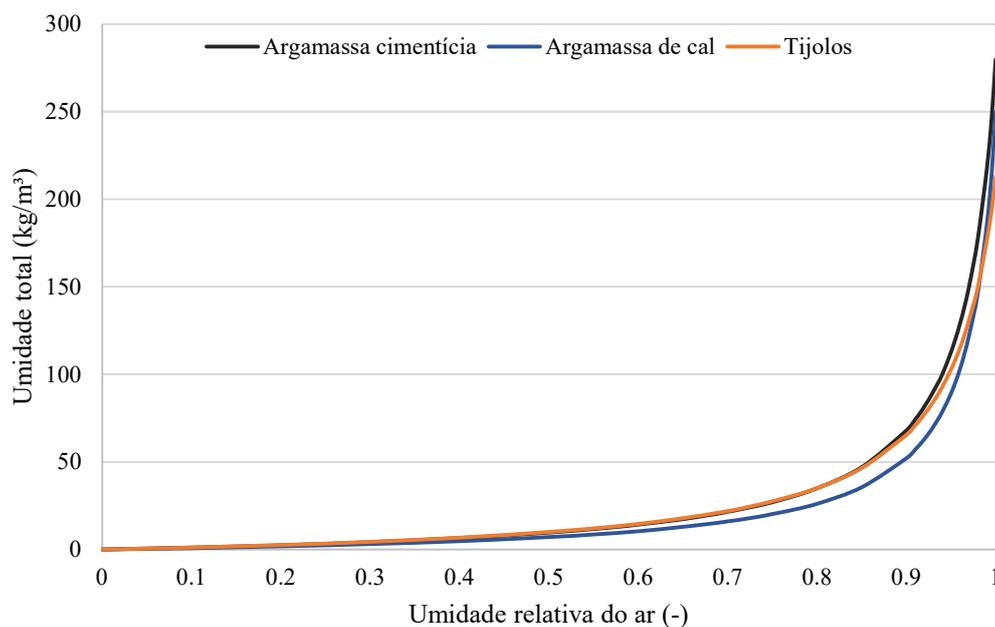
caracterizada conforme relatadas por Gomes et. al, (OLIVEIRA et al., 2022). Esta Igreja está localizada a cerca de 405 metros do Rio Jaguaribe, sendo naturalmente afetada pelo fenômeno da umidade ascensional em suas paredes de alvenaria cerâmica. As características dos materiais e componentes da referida Igreja são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedade dos materiais simulados

Tijolos			Argamassas		
Propriedade	Valor	Unidade	Propriedade	Valor	Unidade
Absorção de água	10.9	%	Umidade natural	1.64	%
Umidade natural	1.8	%	Densidade aparente	1600	kg/m ³
Resistência à compressão	16.5	MPa	Porosidade	30	%
Porosidade	21.2	%	Calor específico	850	J/kg.K
Densidade aparente	1950	kg/m ³	Condutibilidade Térmica	0.7	W/m.K
Calor específico	850	J/kg.K	Fator de resistência à difusão de vapor	7	-
Condutividade térmica	0.6	W/m.K	Traço estimado (Aglomerante:areia)	1:6	-
Fator de resistência à difusão de vapor	10	-	Aglomerante	Cal	-
Paredes da Igreja					
Propriedade	Valor		Unidade		
Espessura média da camada de argamassa nas paredes	50		mm		
Espessura média da camada de tijolos nas paredes	350		mm		

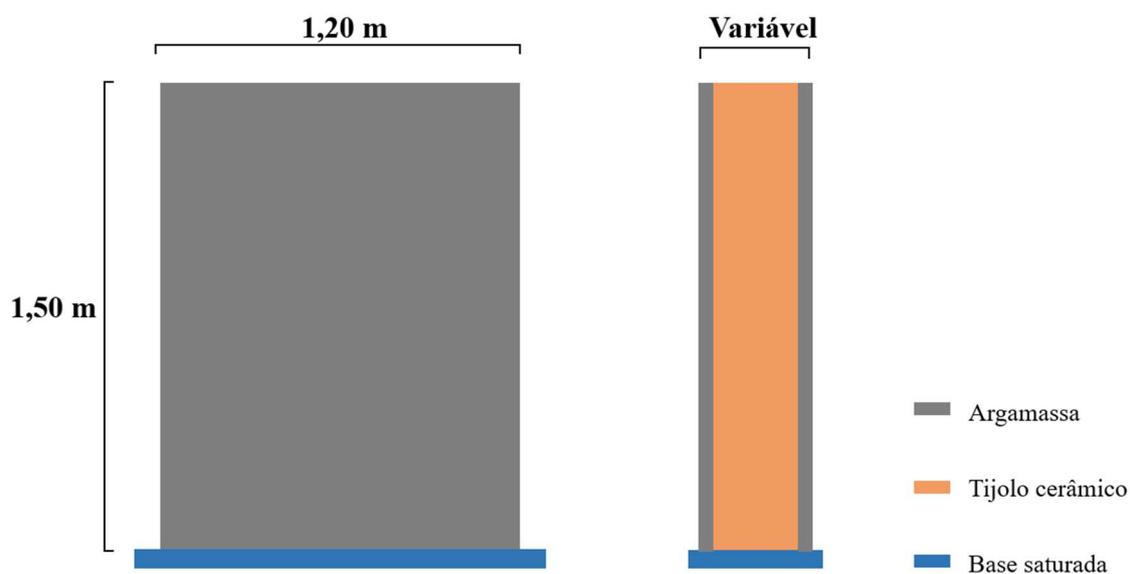
As curvas de armazenamento de água dos materiais (Figura 31), foram adaptadas das curvas padrões já disponíveis na biblioteca de dados do software, considerando-se os valores de umidade natural e absorção máxima de água dos tijolos e argamassas no ajuste das isolinhas.

Figura 31 - Curvas de retenção de água dos materiais.



Os painéis de alvenarias simuladas foram modeladas com dimensões de 1.50 m x 1.20 m e espessura a depender do plano experimental, sendo o perfil formado por um núcleo de tijolos cerâmicos maciços e camada de revestimento argamassado em ambas as faces, com ou sem pintura. Ademais, considerou-se que a base das paredes estão em contato com uma camada de material supersaturado que pode ou não ter sal diluído, a depender do programa experimental, de forma a simular a ocorrência da umidade ascensional (Figura 32).

Figura 32 - Dimensões das paredes simuladas



4.3.1 Informações geométricas e cenários de simulação

A observação da influência das propriedades das paredes na umidade ascensional foi feita modificando-se algumas das características das paredes e comparando-se cada uma das configurações obtidas entre si. As características alteradas foram: a espessura da camada de tijolo cerâmico maciço, a espessura das camadas de revestimento argamassado, a presença de pinturas, a composição do aglomerante dos revestimentos argamassados e a salinidade da água ascendente.

A configuração das paredes de alvenaria histórica variam significativamente dentro de um mesmo monumento, como é o caso da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, mas também entre diferentes igrejas, que seguem padrões construtivos diferentes (ARAÚJO et al., 2020). Tendo isso em vista, optou-se por variar a espessura dos blocos nas simulações em dois níveis, de forma a avaliar o impacto desta variação na ascensão capilar. Desta forma, optou-se por usar a espessura de 350 mm, que representa o valor médio da espessura dos blocos nas paredes da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, e 650mm, que representa uma das dimensões de parede encontrada na construção.

As argamassas por sua vez foram simuladas para 5 cm e 3 cm, que representa o valor médio para a Igreja. Ademais, variou-se a configuração de pinturas em 3 níveis, que são sem pintura, com pintura de cal e com pintura acrílica. As argamassas de revestimento foram simuladas para duas situações, nomeadamente considerando a cal, que é o aglomerante originalmente utilizado na Igreja e em muitas CH, e cimento, que é o aglomerante mais utilizado em edificações modernas e por vezes utilizado em reformas de CH. Desta forma, buscou-se variar os principais fatores de controle quando se realiza modificações nas CH, para identificar quais destes contribuem para o aumento da ascensão capilar.

A salinidade das paredes, por sua vez, foi simulada para duas situações, quais sejam: ausência de sais (situação ideal) e presença de NaCl, que é considerado por (ARENDR; SEELE, 2001) como um dos sais mais agressivos para as edificações, além de ter tido sua utilização no WUFI 2D validada por (RUCKER; HOLM; KRUS, 2000). No total, considerando todas as variações realizadas, foram consideradas 48 configurações diferentes de paredes quanto à umidade ascensional, apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Variação das configurações das paredes simuladas

Configurações do Experimento					
Espessura dos tijolos	Espessura da argamassa	Sem sal		NaCl	
		Arg. Cal	Arg. Cimento	Arg. Cal	Arg. Cimento
35 cm	5 cm	#1	#2	#3	#4
		#5	#6	#7	#8
		#9	#10	#11	#12
	3 cm	#13	#14	#15	#16
		#17	#18	#19	#20
		#21	#22	#23	#24
65 cm	5 cm	#25	#26	#27	#28
		#29	#30	#31	#32
		#33	#34	#35	#36
	3 cm	#37	#38	#39	#40
		#41	#42	#43	#44
		#45	#46	#47	#48

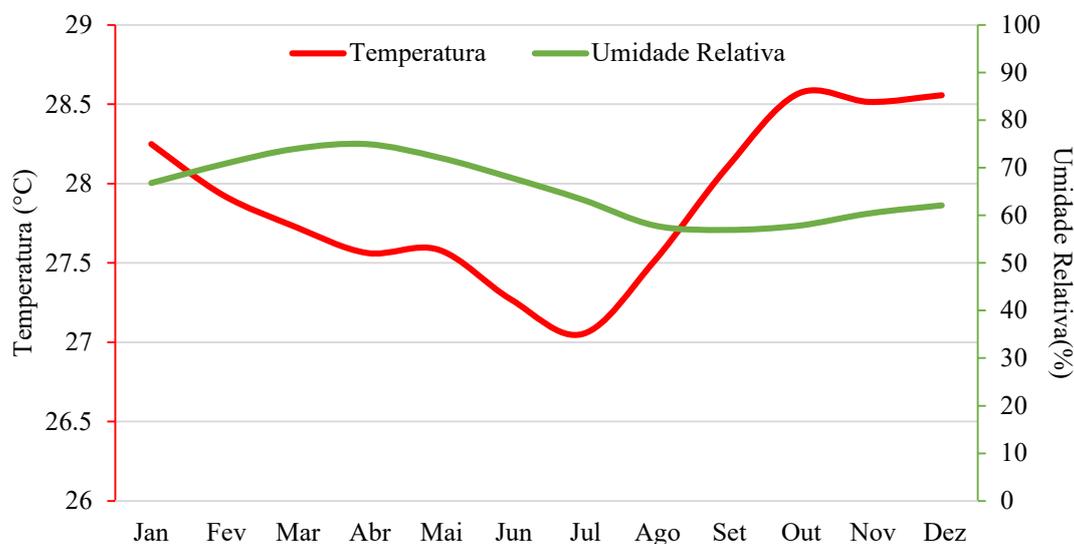
Sem Pintura		Pint. Cal		Pint. Acrílica	
-------------	--	-----------	--	----------------	--

4.3.2 Simulação numérica

O Software de cálculo utilizado nesta pesquisa para realização das análises numéricas por meio de simulações computacionais foi o WUFI 2D versão 4.3, desenvolvido pelo Fraunhofer Institute for Building Physics. Este software permite avaliar as mudanças na umidade de geometrias sob determinadas condições de contorno, como as propriedades dos materiais constituintes e fatores externos, como as condições meteorológicas.

As principais propriedades meteorológicas inseridas estão relacionadas à variação de temperatura e umidade relativa do local. Em vista disto, foram obtidas as curvas de umidade relativa e temperatura da cidade de Aracati ao longo do ano (Figura 33). As curvas correspondem aos valores médios destes parâmetros nos últimos 10 anos, e foram obtidos a partir das coletas feitas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 33 – Médias dos registros das condições climáticas de Aracati, nos últimos 10 anos



Outras configurações aplicadas à simulação foi a alteração do grid padrão de elementos finitos do software, utilizando-se um grid com mais elementos de forma a aumentar a eficácia da análise. Ademais, os materiais inseridos foram considerados como isotrópicos, ou seja, com propriedades iguais nos eixos x e y. As propriedades físicas e higrotérmicas dos tijolos e argamassas foram editadas para representar os valores encontrados em laboratório.

A análise numérica foi realizada utilizando-se os modelos matemáticos inseridos no software que consideram a transferência simultânea de calor e umidade. O período de simulação considerado foi de 8760 h, equivalente ao período de um ano de simulação. O cálculo numérico do WUFI tem como base um sistema de equações não lineares de transferência simultânea de umidade e calor, obtidas por Künzle (1995).

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla(\delta_p \nabla(\phi p_{sat})) \quad (7)$$

$$\frac{dw}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi p_{sat})) \quad (8)$$

Onde:

$\frac{dH}{dT}$ é a capacidade de armazenamento de calor do material úmido ($J/(m^3 \cdot K)$)

$\frac{dw}{d\phi}$ Capacidade de armazenamento de umidade do material húmido (kg/m^3)

λ - Condutibilidade térmica do material húmido ($W/(m.K)$)

h_v - Entalpia de evaporação da água (J/kg)

D_ϕ - Coeficiente de condução líquida ($kg/(m.s)$)

δ_p - Permeabilidade ao vapor de água do material ($kg/(m.s.Pa)$)

T - Temperatura ($^{\circ}C$)

w - Teor de humidade do material (kg/m^3)

ϕ - Humidade relativa (-)

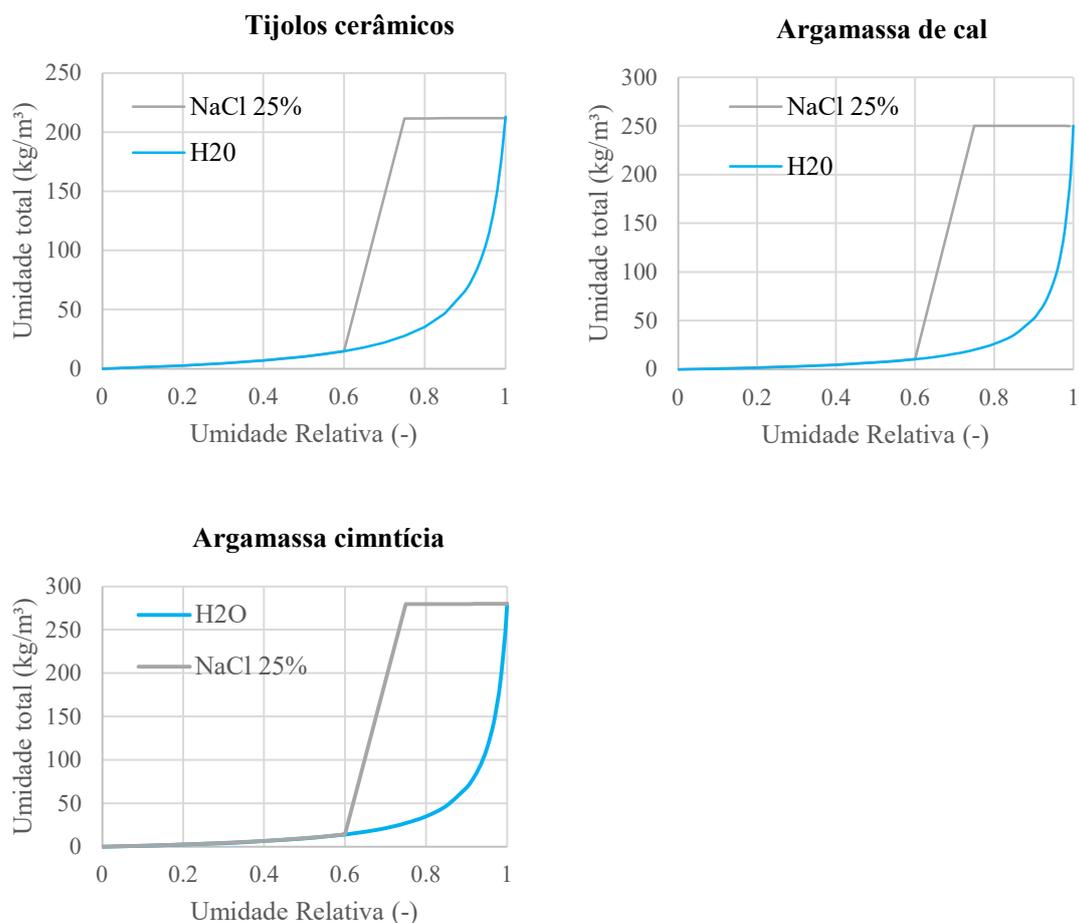
p_{sat} - Pressão de saturação do vapor de água (Pa)

Apesar do software WUFI ser amplamente validado para diversas aplicações numéricas no estudo da transferência de umidade e temperatura dos materiais, não há, no software, um modelo integrado para medição e avaliação do transporte de líquidos contendo sais.

Esta limitação pode ser contornada usando o método de Rucker, Holm e Krus (2000), que descobriram em sua pesquisa que o principal efeito higroscópico da presença de sais no estudo da umidade é uma modificação nas isolinhas da curva de retenção de água dos materiais.

Em sua pesquisa, (Rucker, Holm e Krus (2000) perceberam que os efeitos higrotérmicos dos sais ocorrem a partir de um determinado valor de umidade relativa (ϕ_h). Antes de ϕ_h , as curvas de absorção de água são praticamente iguais entre soluções salinas e sem sal. Ao se aproximar de ϕ_h , as curvas crescem rapidamente até atingir o valor de saturação de água do material, mantendo-se constantes até atingir a umidade relativa de 100%. O autor demonstrou a eficácia deste método para soluções salinas de baixa concentração, tendo obtido e validado a curva adaptada de absorção de água da solução de $NaCl$ 25%. As curvas de absorção de águas adaptadas para os tijolos cerâmicos e argamassas de cal e cimento, obtidas por este método, são apresentadas na Figura 34.

Figura 34 - Curvas de absorção de água – Adaptado de Rucker, Holm e Krus (2000)



4.4 Resultados

Os resultados de ascensão capilar obtidos para cada uma das configurações são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados das simulações computacionais

Configurações do Experimento					
Espessura dos tijolos	Espessura da argamassa	Sem sal		NaCl	
		Arg. Cal	Arg. Cimento	Arg. Cal	Arg. Cimento
35 cm	5 cm	55.86	76.53	108.05	140.98
		58.88	78.26	136.97	139.34
		75.72	79.10	140.88	141.63
	3 cm	52.50	75.06	100.94	139.88
		55.57	77.80	135.64	138.76
		75.11	79.57	139.90	141.34

65 cm	5 cm	69.82	83.96	126.30	142.73
		71.83	85.12	140.41	141.86
		83.33	85.52	142.76	143.24
	3 cm	67.79	83.35	123.25	142.42
		69.84	85.07	139.83	141.82
		83.34	86.07	142.31	143.11

Sem Pintura		Pint. Cal		Pint. Acrílica	
-------------	---	-----------	---	----------------	---

As curvas de ascensão capilar ao longo de um ano de simulação de cada um dos cenários analisados são apresentadas no Apêndice C. Por sua vez, a imagem do perfil de umidade das paredes para cada um dos cenários simulados são apresentadas no Apêndice D.

4.4.1 Espessura dos tijolos cerâmicos

Analisando-se os resultados das simulações para estudar a influência da espessura dos tijolos na ascensão capilar, há evidências para se afirmar, com 95% de intervalo de confiança, que há diferenças no valor de água absorvida quando se varia a espessura de 35 cm a 65 cm, como pode ser aferido a partir da Análise de Variância (ANOVA) realizada (Tabela 15). Por razões de limitação do software de análise estatística utilizado para calcular a ANOVA, apenas 4 dos 5 fatores de variação estudados são apresentados na Tabela 15, excluindo-se o fator variação da espessura da camada de argamassa, que como será visto no próximo tópico, não interfere de forma significativa na ascensão capilar.

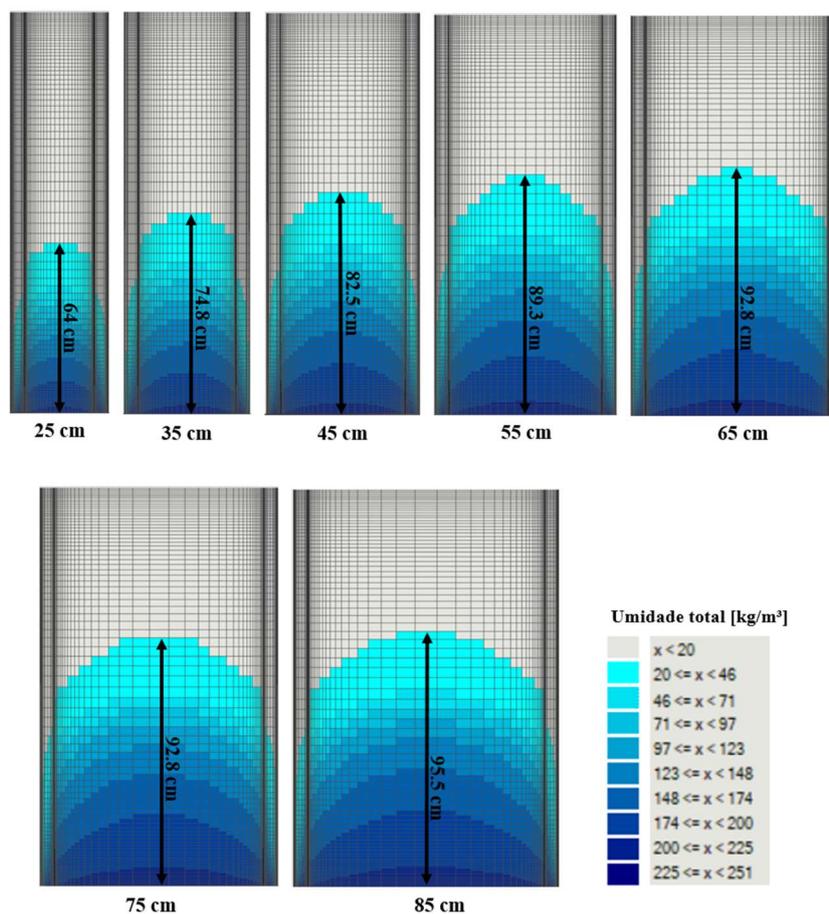
Tabela 15 - Análise de Variância dos resultados

ANOVA					
	SS	Df	MS	F	p
Interseção	535382	1	535382	7865.9	0.000000
Espessura dos tijolos	681	1	681	10.0	0.002860
Espessura das argamassas	17	1	17	0.3	0.616763
Composição das argamassas	1583	1	1583	23.3	0.000018
Salinidade	45594	1	45594	669.9	0.000000
Erro	2927	43	68	-	-

Ademais, constatou-se que a diferença média entre o valor de água contida, em kg/m^3 , nas paredes de 65 cm e 35 cm é de cerca de 9,8%, sendo maior para blocos de maior espessura. Constatou-se, além disto, que esta diferença média sobe para 14,8% quando se analisam apenas as paredes sem salinidade e para 14,2% quando se analisam apenas paredes com argamassa de cal, demonstrando que o aumento da umidade relacionado à variação da espessura dos blocos é mais sensível quando as paredes não possuem salinidade e são feitas com argamassa de cal.

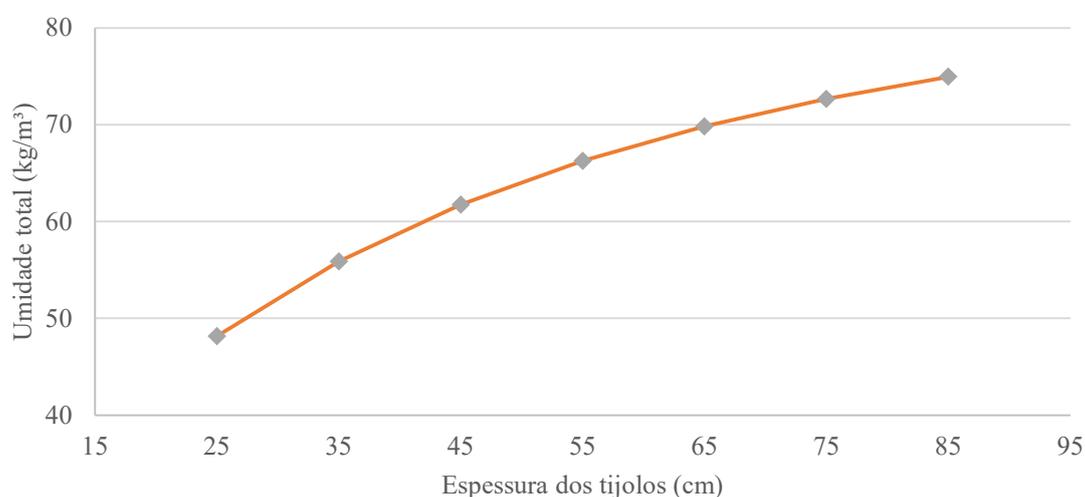
Já se sabendo que a espessura dos tijolos é um fator de influência na umidade, foram simuladas, para melhor compressão da influência da espessura dos blocos na umidade, novas configurações de paredes, variando-se a espessura dos tijolos de 25 cm até 85 cm e mantendo-se todas os demais fatores fixos na condição sem salinidade, sem pintura, com argamassa de cal e com 5 cm de espessura da camada de argamassa. A Figura 35 apresenta o perfil de umidade nas paredes e a altura de ascensão capilar após a simulação de 8760 horas, com as alturas aproximadas do pico da frente úmida em cada configuração.

Figura 35 – Influência da espessura dos tijolos na umidade ascensional



Como previsto, observa-se que a frente de umidade é tanto maior quando mais espessa for a camada de tijolos cerâmicos (Figura 36). Esta influência da espessura dos tijolos na progressão da umidade pode ser explicada pela alteração do estado de equilíbrio das paredes quanto à ascensão capilar. À medida que a área da seção das paredes aumenta, o potencial capilar, relacionado à penetração de umidade nas paredes, aumenta também. O mesmo não ocorre com a saída de água das paredes, que ocorre basicamente devido as condições externas das paredes (evaporação), que se mantém inalteradas visto que a área lateral se mantém a mesma ao se variar a espessura dos tijolos.

Figura 36 - Umidade total ao final de um ano de simulação



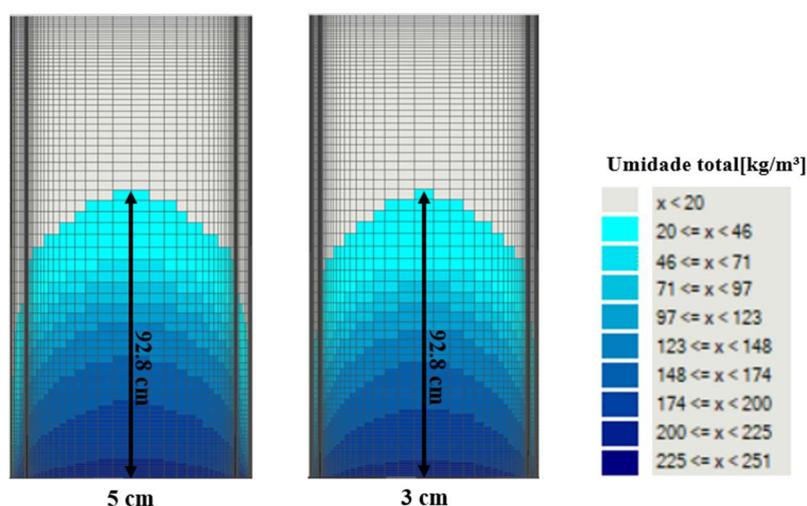
Os resultados encontrados estão de acordo com as observações feitas por Guimarães, Delgado e Freitas (2013) e Torres e Freitas (2010) quanto à influência da espessura na ascensão capilar, apesar destes trabalhos estarem relacionados com a espessura total da parede e não apenas da camada de tijolos.

4.4.2 *Espessura da camada de argamassa*

Ao se realizar Análise de Variância nos resultados apresentados na Tabela 14 para estudar a influência da espessura da camada de argamassa na progressão da umidade, tem-se que, para qualquer ANOVA gerada com 4 dos fatores (limitação do software de análise), o resultado é sempre o mesmo: não há evidências para se afirmar que a espessura da argamassa influencia no aumento ou redução da umidade ascensional, com intervalo

de confiança de 95%. A diferença média entre o total de água contido nas paredes com espessura da camada de argamassa de 5 cm e 3 cm é de apenas 1,4%. A Figura 37 apresenta a frente úmida das simulações realizadas com argamassa de cal, sem pintura, com espessura dos blocos de 65 cm e sem salinidade, variando-se a espessura de 35 a 65 cm, representando uma das configurações testadas para se analisar o impacto deste fator na progressão da umidade.

Figura 37 - Influência da espessura da argamassa de revestimento na umidade ascensional



É possível afirmar que a baixa relação entre a umidade ascensional e a espessura das paredes está relacionada à pouca contribuição deste material em relação à seção total das paredes, constituídas predominantemente por tijolos cerâmicos. Além disso, as camadas de argamassa possuem menor valor do fator de resistência à difusão de vapor e maior porosidade em relação aos tijolos cerâmicos, tendo então menos significância nos efeitos higroscópicos totais da parede e sendo, portanto, um fator de menor importância a ser considerado em reformas e reconstituição de paredes de edificações históricas atacadas por umidade ascensional.

4.4.3 Pintura

Analisando-se estatisticamente (Tabela 15) os resultados da Tabela 14, há evidências para se afirmar, com 95% de intervalo de confiança, que o tipo de pintura possui influência na progressão da umidade ascensional nas paredes. Ademais,

aprofundando-se a análise por meio de uma comparação múltipla de médias por meio do teste de Tukey (Tabela 16), é possível afirmar, com intervalo de confiança de 95%, que a condição sem pintura difere significativamente da condição com pintura de cal e com pintura acrílica, mas não há diferenças significativas quando se compara a condição com pintura de cal e com pintura acrílica.

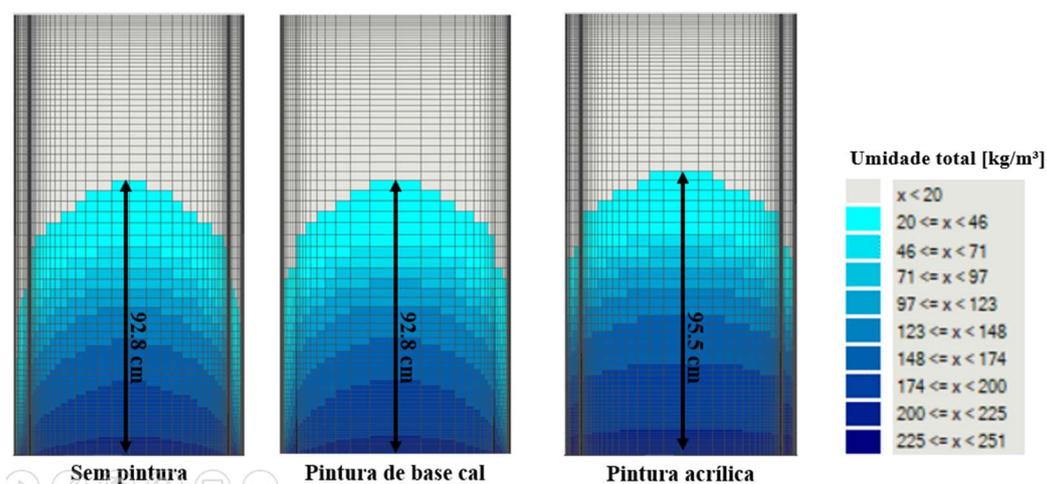
Tabela 16 - Comparação múltipla de médias para diferentes pinturas

Teste Tukey			
Revestimento	Sem pintura	Pintura de Cal	Pintura Acrílica
Sem pintura	-	0.0149	0.0001
Pintura de Cal	0.0149	-	0.0611
Pintura Acrílica	0.0001	0.0611	-

Ao se analisar as diferenças médias entre o total de água contida nas paredes para as situações analisadas, observa-se que a configuração com pintura com cal absorve em média 6,8% mais água do que sem pintura. A condição com pintura acrílica, por sua vez, absorve em média 12,5% mais água do que sem pintura, mas apenas 5,4% mais água do que a condição de pintura com cal.

A Figura 38 apresenta as frentes úmidas das paredes após realização das simulações realizadas com argamassa de cal, camada de argamassa de 5 cm de espessura, blocos com 65 cm de espessura e sem salinidade, variando-se somente o tipo de pintura. Nesta configuração específica a pintura acrílica possui maior frente úmida em comparação às demais, apesar deste não representar o comportamento global.

Figura 38 - Influência do tipo de pintura na umidade ascensional



Esta variação indica que a inserção de membranas com significativas diferenças nas propriedades higrotérmicas em relação aos demais materiais constituintes da parede pode ter efeitos que favorecem o aumento da umidade nas paredes, à medida que podem dificultar a saída da água nas paredes pelo processo de evapotranspiração, modificando assim o estado de equilíbrio da frente úmida. Desta forma, destaca-se que a inserção das pinturas à base de cal ou acrílica favorecem a progressão da frente úmida em relação à condição sem pintura.

É provável que outras pinturas com diferenças higrotérmicas em relação às argamassas e aos blocos constituintes, como pinturas à base de óleo, também possuam influência na progressão da umidade ascensional, mas a validade desta hipótese carece de estudos mais aprofundados que considerem estes outros tipos de tintas. Em estudo feito por (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008), relacionando diferentes revestimentos das paredes com a progressão da umidade, também foi constatada variação da frente úmida quando utilizados revestimentos com diferentes propriedades higrotérmicas.

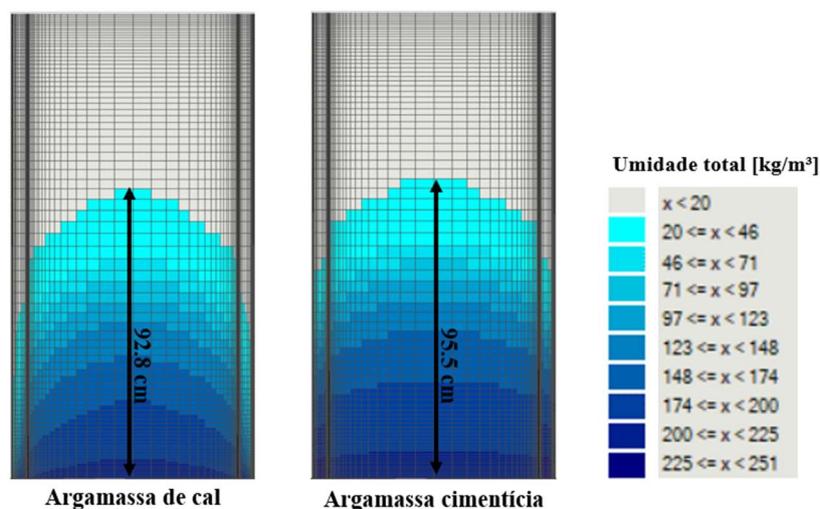
Tem-se, portanto, que é de extrema importância considerar o estado atual das paredes para embasar a escolha do tipo de pintura a ser utilizado. A utilização de pintura acrílica em paredes sem impermeabilização e sujeitas à umidade ascensional pode aumentar ainda mais o potencial capilar e por consequência o aparecimento de patologias construtivas relacionadas à presença da umidade.

4.4.4 Composição das argamassas

Ao se analisar estatisticamente os resultados obtidos (Tabela 15), é possível afirmar, com intervalo de confiança de 95%, que há influência da constituição da argamassa no total de água armazenado nas paredes, considerando-se as argamassas testadas: cal e cimento. Quando se analisam as diferenças médias entre os resultados para os tipos de argamassas utilizados, pode-se observar que as argamassas cimentícias absorveram em média 15% mais água do que as argamassas à base de cal.

A Figura 39 apresenta a frente de umidade considerando-se apenas as paredes com 65 cm de espessura dos blocos, 5 cm de espessura da camada de argamassa, sem pintura e sem salinidade, variando-se apenas a constituição da argamassa utilizada.

Figura 39 - Influência da composição das argamassas na umidade ascensional



As diferenças entre a progressão da umidade ascensional em argamassas de cimento e argamassas de cal se mostra de importante consideração em processos de restauro, à medida que as argamassas de cimento, apesar de muito utilizada em edificações modernas, possui diferenças consideráveis no processo de progressão da umidade em relação à argamassa de cal, que possui uso muito comum em CH (MOROPOULOU; BAKOLAS; BISBIKOU, 1995). Em processos de restauro e reabilitação das CH, a inserção de argamassas de cimento em detrimento de argamassas de composição igual ou similar às argamassas originalmente presentes na construção pode gerar incompatibilidade nas propriedades higrotérmicas, favorecendo a ascensão capilar no longo prazo em razão de sua maior resistência à troca de umidade da parede com o meio externo.

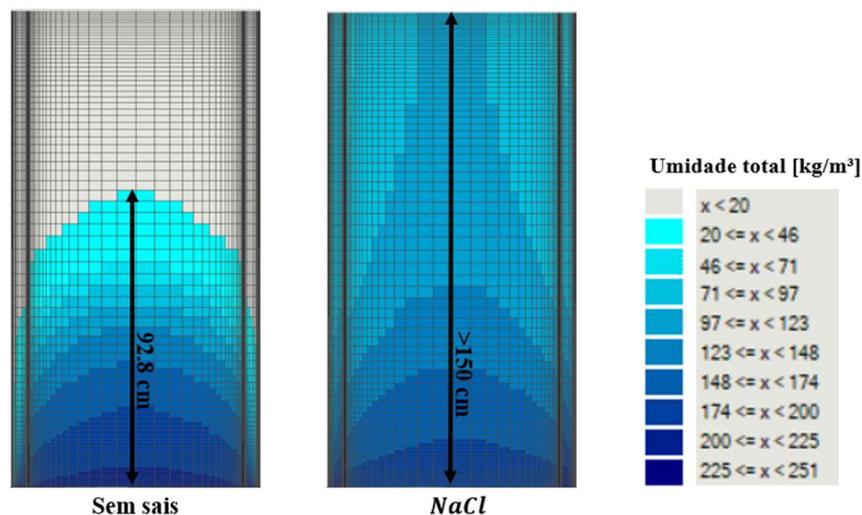
4.4.5 Salinidade

Os resultados da análise estatística dos dados permitem afirmar, com intervalo de confiança de 95%, que a presença do sal NaCl influencia na absorção de água por capilaridade. Dentre os fatores analisados, a presença de sais é a que mais afeta na frente úmida. Ao se analisar as diferenças médias entre as condições analisadas, observa-se que a configuração com presença do sal NaCl absorve em média 84,5% mais água do que a configuração sem salinidade.

A Figura 40 apresenta a frente de umidade considerando-se apenas as paredes com 65 cm de espessura dos blocos, 5 cm de espessura da camada de argamassa, sem pintura,

com argamassa de cal, variando-se apenas a presença de salinidade na água de ascensão capilar.

Figura 40 - Influência da presença de sais na umidade ascensional



Tem-se, portanto, que o sal cloreto NaCl, além de agressivo às alvenarias, ainda favorece significativamente o aumento da umidade ascendente nas paredes, o que é especialmente importante considerando-se que este sal é abundante na natureza, especialmente em regiões litorâneas, como a situação de Aracati, ou em locais que utilizem sais para degelo.

Uma das possíveis razões para explicar este fenômeno pode estar relacionado à grande solubilidade do NaCl em água, o que favorece a entrada deste sal diluído na água que ascende por capilaridade. Ao se ocorrerem os ciclos de evapotranspiração da água nas faces das paredes, apenas a água é evaporada, fazendo com que os sais fiquem depositados em forma sólida nos poros do material. Isso gera uma redução do diâmetro médio dos poros dos materiais construtivos, aumentando-se por consequência o potencial capilar, que possui altura da frente úmida inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, segundo a Lei de Jurin, que governa a altura de ascensão capilar.

4.5 Conclusões

Esta pesquisa teve como principal objetivo o estudo da influência de diversos fatores na umidade ascensional nas CH, tais como a espessura dos blocos das paredes, a espessura da camada de argamassa, o tipo de pintura utilizada, a composição da argamassa e a presença de salinidade na água de ascensão capilar, utilizando-se como referência a Igreja do Nosso Senhor do Bonfim e como ferramenta de medição da umidade a análise numérica por meio de simulações computacionais.

Os resultados demonstram que a espessura da camada de blocos impacta diretamente na absorção capilar das paredes, à medida que se aumenta a área de absorção de água das paredes e se mantém constante a área lateral, por onde a água sai, no processo de evapotranspiração. Quando se varia a espessura da camada de argamassa, por sua vez, não se observa grande impacto no equilíbrio higrotérmico entre a água que entra e que sai nas paredes, o que possivelmente está relacionado à menor influência deste material nas propriedades higrotérmicas globais da parede, em função da menor contribuição do volume deste material frente ao volume total da parede.

Quando se analisa os resultados das paredes simuladas para diferentes tipos de pintura, observa-se similaridade nos resultados para as 3 pinturas analisadas, apesar de se perceber um pequeno acréscimo da umidade nas paredes simuladas com pintura a cal e acrílica em relação à situação sem pintura. Estatisticamente, não se encontrou evidências para diferenças entre os resultados obtidos para pinturas a cal e acrílica para as condições de simulação utilizadas. Ao se analisar o impacto da constituição da argamassa, por sua vez, tem-se que há incremento do potencial de umidade ascensional quando se utiliza argamassas cimentícias em relação às argamassas de cal. Desta forma, apesar da utilização de argamassas cimentícias em construções modernas e reformas, não se recomenda a sua utilização em restauro de CH que utilizam outros tipos de argamassas, principalmente argamassas de cal.

Na análise da salinidade, foi percebido que a presença do sal *NaCl* gera incremento significativo na absorção capilar das paredes, elevando a quantidade total de água nas paredes e a altura da frente úmida. A abundância destes sais na natureza e seu impacto agressivo nas edificações torna de extrema importância sua consideração nas edificações históricas em áreas onde há ocorrência deste sal, como regiões litorâneas e locais que utilizam sais de degelo.

Os resultados encontrados contribuem para a compreensão dos fatores que impactam na umidade ascensional, com ênfase nas edificações históricas, nas quais a umidade pode se mostrar mais agressiva em função da degradação natural dos materiais e a ausência de impermeabilização. Ademais, este trabalho demonstra a importância de se conhecer as propriedades da estrutura histórica quando forem realizados restauros e quando forem utilizadas técnicas de mitigação da umidade ascensional, visto que os diferentes materiais empregados e as diferentes características física e geométricas dos materiais pode impactar na progressão da umidade ascensional.

Recomenda-se para trabalhos futuros a expansão deste estudo, com análise de mais fatores que caracterizam as paredes de construções históricas e variação de mais níveis dentro de cada um dos fatores, como o estudo de outras constituições das argamassas, outras pinturas e presença de outros sais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Caracterizar o patrimônio histórico edificado constitui-se de um grande desafio no estudo da conservação e restauração das construções históricas. Sua importância vai além de apenas conhecer as propriedades físicas, geométricas e mecânicas dos materiais que constituem as construções, mas também serve de subsídio para a seleção das técnicas de restauro e materiais de construção mais indicadas para cada caso, de forma a respeitar as particularidades de cada monumento e garantir a manutenção de sua história para as gerações futuras. Além disso, o conhecimento acerca dos materiais de construção e técnicas construtivas utilizadas nos séculos passados constitui uma grande fonte de conhecimento para entender melhor a evolução das sociedades para o estado que estão atualmente.

No Brasil, que ainda carece de caracterização de boa parte de seu patrimônio histórico, os esforços realizados para compreender as particularidades construtivas das CH se mostram de grande importância, considerando a riqueza histórica e a grande diversidade do território brasileiro, que possui influência histórica, herdada do período colonial e pós-colonial, da cultura portuguesa, holandesa, francesa, alemã, japonesa e africana, dentre outras. Considerando isto, a caracterização dos materiais da Igreja do Nosso Senhor do Bonfim, com arquitetura marcante de influência portuguesa, fornece informações de relevância histórica e construtiva acerca deste monumento do século XVIII, localizada na cidade de Aracati, estado do Ceará, que atualmente se encontra em processo de restauro. Ademais, este trabalho de caracterização se mostra como uma referência para realização de novos estudos de caracterização que podem ser realizados nas diversas CH brasileiras, além de poder ser comparada com outras CH caracterizadas na região cearense, de forma a contribuir com a formação da identidade histórica e construtiva desta região.

A caracterização dos materiais construtivos possibilita não só o estudo das construções históricas e suas particularidades, mas também o estudo da umidade ascensional, uma das principais formas de penetração de umidade nas construções, que por sua vez é uma das principais causas do aparecimento de manifestações patológicas. A umidade ascensional é especialmente importante nas CH, que carecem de sistemas impermeabilizantes na base das paredes, exigindo em muitos casos a utilização de sistemas corretivos. Conhecer então os principais fatores de influência na umidade ascensional se mostra então um desafio, que possui com principal contribuição otimizar

o processo de escolha de materiais construtivos e técnicas a serem empregados na revitalização das edificações patrimoniais de forma a mitigar ou reduzir a ocorrência da umidade ascensional.

Neste estudo, foi possível observar a influência de alguns fatores construtivos na progressão da umidade ascensional, como a espessura da camada de tijolos cerâmicos, a constituição da argamassa, a presença de pinturas e a presença de salinidade na água de ascensão, porém mais estudos acerca do tema são necessários para e compreender melhor o impacto de cada fator na progressão capilar e analisar mais fatores que podem ter influência na umidade ascensional além dos já estudados. Apesar da unanimidade na literatura acerca da influência da espessura das paredes na progressão da capilaridade, outros estudos ainda são necessários quanto aos outros fatores analisados neste estudo, como a influência das pinturas, a constituição das argamassas e a presença de salinidade.

Como uma das principais ferramentas utilizadas no estudo da umidade ascensional, tem-se o estudo numérico realizado por meio de simulações computacionais, que se mostra como uma ferramenta de significativa importância no estudo da umidade, à medida que possibilita a realização de mais análises em um menor tempo, além de reduzir custos relacionados às análises e permitir um maior controle das variáveis envolvidas. Nesta pesquisa, utilizou-se o software WUFI 2D como ferramenta de análise numérica, que utiliza como princípio matemático o método dos elementos finitos em suas análises.

Em resumo, este trabalho possui contribuições no estudo da caracterização dos materiais construtivos históricos, em especial as argamassas e tijolos maciços cerâmicos, apresentando algumas das técnicas de caracterização destes materiais e sua importância na manutenção e restauro das CH. Além disso, foi estudado também a umidade ascensional e seus fatores de influência, que podem contribuir para a melhor compreensão deste fenômeno, principalmente quando ocorre nas CH, que são mais suscetíveis à umidade.

Finalmente, apesar dos avanços apresentados no estudo se mostrarem como uma complementação a diversos estudos já realizados acerca das CH, com contribuições aos estudos de reabilitação de construções históricas e caracterização dos complexos materiais presentes nestas construções, além de um melhor conhecimento acerca da umidade ascensional nestas construções e como simular condições diversas para se avaliar a progressão desta umidade ascensional, esta pesquisa abre também algumas oportunidades de estudos acerca da caracterização dos materiais e da umidade ascensional. Os principais temas de pesquisa sugeridos são apresentados a seguir:

- Mapear as propriedades dos materiais construtivos das CH cearenses e brasileiras, dos diversos períodos históricos, de forma a contribuir com a identificação dos processos evolutivos aos quais passaram as sociedades, não só no aspecto construtivo, mas também social;
- Estudar as propriedades de outros materiais construtivos das CH além das argamassas e tijolos, como os revestimentos, os pisos, os forros, as esquadrias e outros elementos que fazem parte da identidade estrutural e arquitetônica das construções;
- Estudar a fundo os fatores que interferem na umidade aqui citados, como saber até que ponto a espessura dos blocos interfere na ascensão capilar, testando também para outros tipos de materiais; testar a influência de outros tipos de pinturas e sistemas de revestimento na ascensão capilar, como pinturas látex e pintura texturizada; analisar outras constituições da argamassa de revestimento na progressão da umidade, como argamassas de gesso e argamassas mistas; testar a influência de outros teores de salinidade na progressão da umidade e testar a influência de outros sais, como nitratos e sulfatos;
- Experimentar em laboratório os resultados obtidos nesta pesquisa e testar outros fatores que possam impactar a umidade ascensional, como a porosidade dos materiais construtivos, as condições climáticas das paredes e as propriedades do solo;
- Desenvolvimento de técnicas de medição da umidade não destrutivas, para serem utilizadas nas CH, e que considerem as propriedades das paredes em suas medições, como tipo de argamassa, espessura das paredes e que possam identificar a presença de salinidade na umidade ascendente.

Acredita-se que estes temas sugeridos podem contribuir para a melhor compreensão acerca da caracterização dos materiais históricos e da umidade ascensional. A importância dos estudos destes temas pode se mostrar ainda mais significativa se realizada em locais com poucos estudos realizados relacionados às edificações históricas, como é caso do Brasil, que é um país continental ainda pouco explorado neste aspecto, e de forma mais específica é o caso do estado do Ceará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEEN, H. H. **Properties of Fired Clay Bricks Mixed with Waste Glass**. [s.l.: s.n.].
- ABNT. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 6, 2003.
- AHMET, G.; AHMET, E. Characterization of Ancient Mortars: Evaluation of Simple and Sophisticated Methods. **Journal of Architectural Conservation**, v. 4, p. 56–67, 1998.
- ALFANO, G. et al. Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing. **Building and Environment**, v. 41, n. 8, p. 1060–1069, 2006.
- ALMEIDA, L.; SILVA, A.; ALMEIDA, I. Caracterização das argamassas da muralha tardo-romana de Olisipo. **Digitar**, v. 4, p. 15–21, 2017.
- ALVAREZ, J. I. et al. Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1061–1065, 1999.
- ARAÚJO, E. et al. Physical and mechanical characterization of traditional Brazilian clay bricks from different centuries. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 1, p. 22, dez. 2020.
- ARENDRT, C.; SEELE, J. **Feuchte und Salze in Gebäuden: Ursachen, Sanierung, Vorbeugung**Leinfelden-Echterdingen, 2001.
- ARIZZI, A.; VILES, H.; CULTRONE, G. Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 807–818, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 6467. Agregados – determinação do inchamento de agregados miúdos – método de ensaio**.Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 7211. Versão corrigida 2019. Agregados para concreto - Especificação**.Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575. Impermeabilização - seleção e projeto**Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 8492. Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – método de ensaio**.Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 15270-2. Componentes cerâmicos – blocos e tijolos para alvenaria parte 2: métodos de**

ensaio.Rio de Janeiro, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 15270-1. Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos.**Rio de Janeiro, 2017b.

BARBOSA, M. Os agentes modeladores da cidade de Aracati-CE no período colonial. **GeoTextos**, v. 7, n. 2, p. 13–44, 2011.

BARLUENGA, G. et al. Brick masonry identification in a complex historic building , the Main College of the University of Alcalá , Madrid (Spain). **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 39–46, 2014.

BHATTARAI, J. et al. Study os the Phisical and Mechanical Properties of Ancient Clay Brick Smples of Kathmandu Valley, Nepal. **Tribhuvan University Journal**, v. 32, n. 2, p. 1–18, 2018.

BISCONTIN, G.; BIRELLI, M. P.; ZENDRI, E. Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. **Journal of Cultural Heritage**, v. 3, p. 31–37, 2002.

CARRAN, D. et al. A Short History of the Use of Lime as a Building Material Beyond Europe and North America. v. 3058, 2012.

Carta de Veneza. II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos de Monumentos Históricos, 1964.

CAZALLA, O. et al. Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality. **Ceramics International**, v. 27, p. 401–406, 2001.

COLLEPARDI, M. **Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings**, 1990.

DELGADO, J. M. P. Q. et al. Salt Damage and Rising Damp Treatment in Building Structures. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 13 p., 2016.

DONAIS, M. K. et al. Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry characterization of wall mortars with principal component analysis: Phasing and ex situ versus in situ sampling. **Journal of Cultural Heritage**, v. 43, p. 90–97, 2020.

ELERT, K. et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure. **Journal of Cultural Heritage**, v. 4, p. 91–99, 2003.

FERNANDES, F. M.; LOURENÇO, P. B.; CASTRO, F. Ancient Clay Bricks : Manufacture and Properties. In: **Materials, technologies and practice in historic heritage structures**. Dordrecht: Springer, 2010. p. 29–48.

- FONTENELE, A. et al. Structural vulnerability assessment of facades of Ceará historic cities. **Journal of Building Engineering**, v. 42, n. April 2020, p. 102461, 2021.
- FRANZONI, E. Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 123–136, 2014.
- FRANZONI, E. State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry. **Journal of Cultural Heritage**, v. 31, p. S3–S9, 2018.
- FREITAS, V. P.; ABRANTES, V.; CRAUSSE, P. Moisture Migration in Building Walls-Analysis of the Interface Phenomena. **Building and Environment**, v. 31, n. 2, p. 99–108, 1996.
- FREITAS, V. P.; GUIMARÃES, A. S. Tratamento da humidade ascensional no património histórico. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 1, p. 1–13, 2014.
- FREITAS, V. P.; GUIMARÃES, A. S.; DELGADO, J. M. P. Q. The “Humivent” Device for Rising Damp Treatment. **Recent Patents on Engineering**, v. 5, n. 3, p. 233–240, 2011.
- FREITAS, V. P.; GUIMARÃES, A. S.; DELGADO, J. M. P. Q. Wall-base ventilation system to control rising damp: a case study of Vilar de Frades historical church in Portugal. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 9, n. 7, p. 859–865, 2015.
- FREITAS, V. P.; TORRES, I.; GUIMARÃES, A. S. **Humidade Ascensional (Vol 3)**. 2008.
- GEWEHR, U. **Aplicabilidade e eficiência de dois métodos de saneamento de paredes degradadas por umidade e sais a partir de uma revisão bibliográfica e de um estudo de caso**, 2004.
- GLEIZE, P. J. P. et al. Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 5, p. 342–346, 2009.
- GUALTIERI, M. L. et al. Applied Clay Science Thermal conductivity of fi red clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. **Applied Clay Science**, v. 49, p. 269–275, 2010.
- GUIMARÃES, A. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; FREITAS, V. P. Rising damp in walls: Evaluation of the level achieved by the damp front. **Journal of Building Physics**, v. 37, n. 1, p. 6–27, 2013.
- HALL, C.; HOFF, W. D. Rising damp: capillary rise dynamics in walls. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 463, n. 2084, p. 1871–1884, 2007.

- HOLM, A.; KÜNZEL, H. M. Two dimensional transient heat and moisture simulations on rising damp with WUFI-2D. In: **Research in Building Physics**. [s.l: s.n.]. p. 363–367.
- IBRACON. **Materiais de Construção Civil - e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais: Sistema de Impermeabilização e Isolamento térmico (vol 2)**. São Paulo: [s.n.].
- ICOMOS. **RECOMENDAÇÕES PARA A ANÁLISE, CONSERVAÇÃO E RESTAURO ESTRUTURAL DO PATRIMÓNIO ARQUITECTÓNICO**, 2003.
- KERSTIN, E. et al. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure. **Journal of Cultural Heritage**, v. 4, n. 2, p. 91–99, 2003.
- KONIORCZYK, M.; WOJCIECHOWSKI, M. Influence of salt on desorption isotherm and hygral state of cement mortar – Modelling using neural networks. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 9, p. 2988–2996, 2009.
- KÜNZEL, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters: one- and two-dimensional calculation using simple parameters. **IRB-Verlag Stuttgart**, v. 65, p. 65 p., 1995.
- LOPEZ-ARCE, P. et al. Treatment of rising damp and salt decay : the historic masonry buildings of Adelaide , South Australia. **Materials and Structures**, v. 42, p. 827–848, 2009.
- LOPEZ-ARCE, P.; GARCIA-GUINEA, J. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. **Building and Environment**, v. 40, n. 7, p. 929–941, 2005.
- LOUREIRO, A. M. S. et al. Investigation of historical mortars from Belém do Pará, Northern Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 233, 2020.
- LUBELLI, B.; HEES, R. P. J. V.; BROCKEN, H. J. P. Experimental research on hygroscopic behaviour of porous specimens contaminated with salts. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 339–348, 2004.
- LUBELLI, B.; HEES, R. P. J. VAN; BOLHUIS, J. Effectiveness of methods against rising damp in buildings : Results from the EMERISDA project. **Journal of Cultural Heritage**, v. 31, p. S15–S22, 2018.
- LUBELLI, B.; VAN HEES, R. P. J.; HACQUEBORD, A. Experimental study of the distribution of chemical products against rising damp in substrates with different water saturation degrees. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 891–898, 2013.
- LUCIE, F. et al. The effect of wood ash on the properties and durability os lime mortars for pointing damp historic buildings. **Construction and Building Materials**, v. 212, p.

500–513, 2019.

MARQUES, S. M. F. **Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2005.

MESQUITA, E. et al. Boletim Técnico 11: Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas. **ALCONPAT-BRASIL**, p. 18, 2015.

MESQUITA, E. et al. Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 240, 2016.

MESQUITA, E. et al. Ambient vibrational characterization of the nossa senhora das dores church. **Engineering Structures and Technologies**, v. 9, n. 4, p. 170–182, 2017.

MESQUITA, E. et al. Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. January, p. 172–180, 2018.

MICHETTE, M.; LORENZ, R.; ZIEGERT, C. Clay barriers for protecting historic buildings from ground moisture intrusion. **Heritage Science**, p. 1–11, 2017.

MØLLER, E. B.; OLSEN, B. **Rising damp , a reoccurring problem in basements – a case study with different attempts to stop the moisture**. 9th Nordic Symposium on Building Physics: Proceedings. **Anais...2011**

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, p. 779–795, 1995.

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

OLIVEIRA, L. M. G. et al. Investigation of the mortars and clay bricks of a luso-brazilian historic structure from XVIII century: The Nosso Senhor do Bonfim Church. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103592, jan. 2022.

PAPAYIANNI, I.; STEFANIDOU, M. Durability aspects of ancient mortars of the archeological site of Olynthos. **Journal of Cultural Heritage**, v. 8, n. 2, p. 193–196, 2007.

PEREIRA, C.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings. **Engineering Failure Analysis**, v. 90, n. October 2017, p. 103–115, 2018.

RIRSCH, E.; ZHANG, Z. Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 1815–1820, 2010.

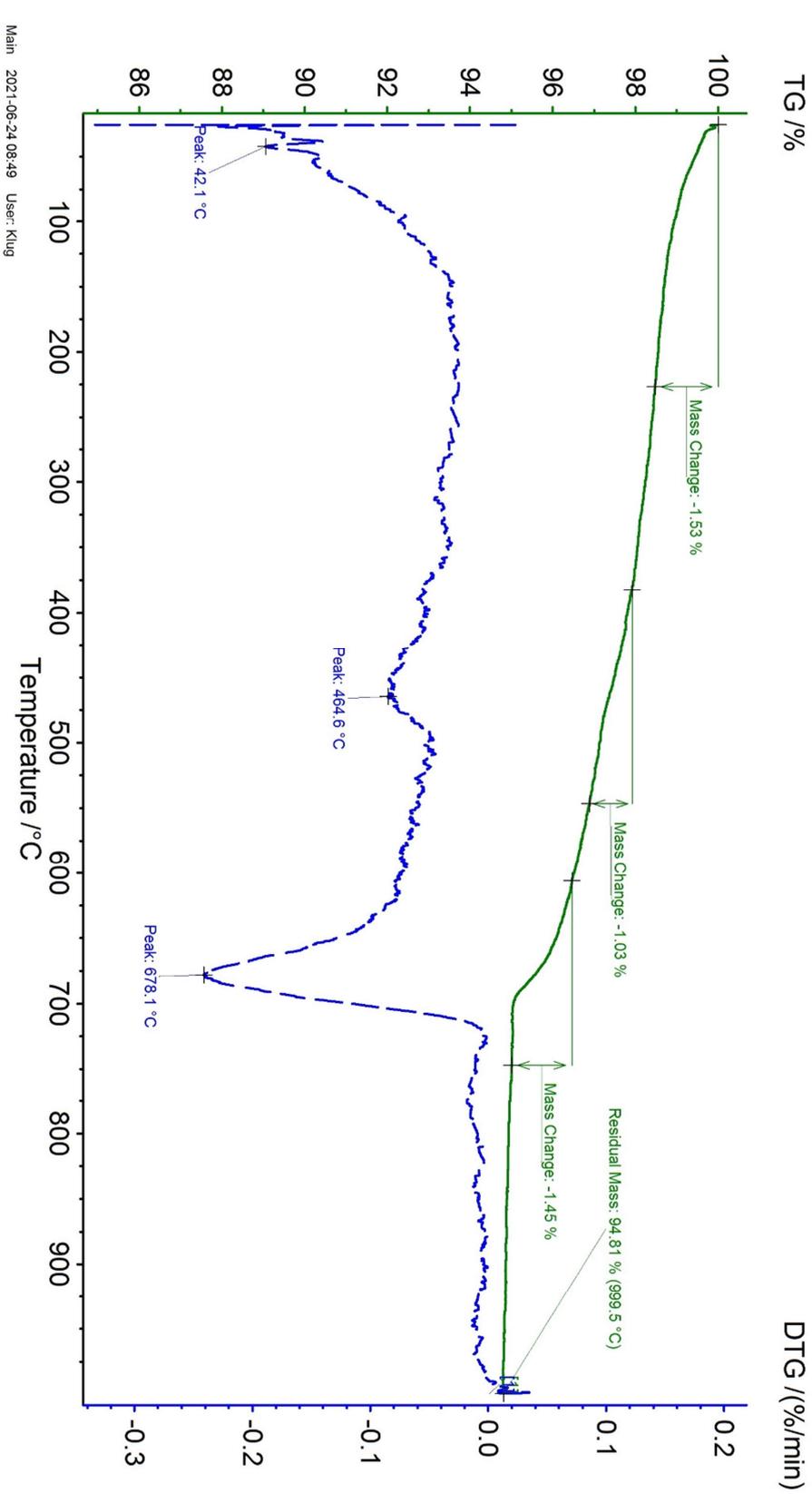
RISPOLI, C. et al. The ancient pozzolanic mortars of the Thermal complex of Baia (

- Campi. **Journal of Cultural Heritage**, v. 40, p. 143–154, 2019.
- RUCKER, P.; HOLM, A.; KRUS, M. Determination of moisture and salt content distributions by combining NMR and gamma ray measurements. **Proceedings Materials Week, Munich**, 2000.
- SANDROLINI, F.; FRANZONI, E. An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1372–1380, 2006.
- SANTOS, B. A capella do Senhor do Bonfim erecta em Aracaty. In: **Revista do Instituto do Ceará**. RIC, TOMO ed. [s.l: s.n.]. p. 336–353.
- SARDELLA, A.; LUBELLI, B.; BONAZZA, A. Effectiveness of a dehumidifying render system in tackling rising damp: Laboratory, small scale and field tests. **Construction and Building Materials**, v. 306, n. March, p. 124810, 2021.
- SILVA, A. S. et al. Characterization of historical mortars from Alentejo's religious buildings. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 4, n. 2, p. 138–154, 2010.
- SILVA, V.; DIAS, B. A construção e manutenção da memória de um povo através do patrimônio histórico arquitetônico: O caso do município de Aracati, Ceará. In: **Sociabilidades Urbanas**. [s.l: s.n.]. p. 61–72.
- SILVEIRA, D. et al. Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 36–44, 2012.
- SOCOLOSKI, R. F.; MASUERO, A. B. Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 660–672, 2019.
- STEFANIDOU, M.; PACHTA, V. Analysis and characterization of hydraulic mortars from ancient cisterns and baths in Greece. **Materials and Structures**, p. 571–580, 2014.
- TESCH, V.; MIDDENDORF, B. Occurrence of thaumasite in gypsum lime mortars for restoration. v. 36, p. 1516–1522, 2006.
- THIRUMALINI, S.; RAVI, R.; RAJESH, M. Experimental investigation on physical and mechanical properties of lime mortar : Effect of organic addition. **Journal of Cultural Heritage**, v. 31, p. 97–104, 2018.
- TORRES, I. New technique for treating rising damp in historical buildings: Wall base ventilation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 31, p. S60–S70, 2018.
- TORRES, I.; FREITAS, V. P. DE. The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings. **Construction and**

Building Materials, v. 24, n. 8, p. 1331–1339, 2010.

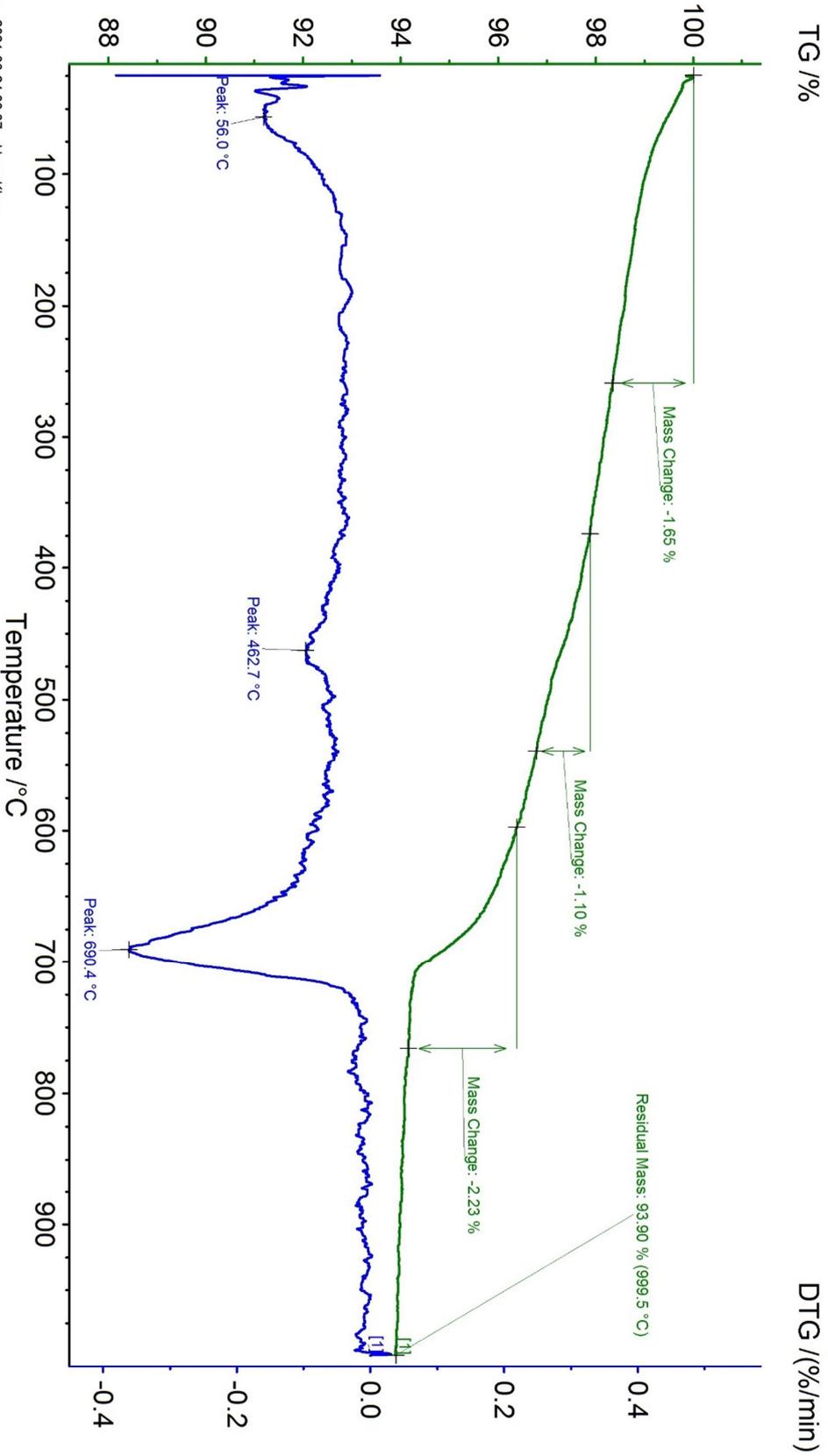
APÊNDICE A – CURVAS DE TERMOGRAVIMETRIA DOS MATERIAIS

Argamassa A1P



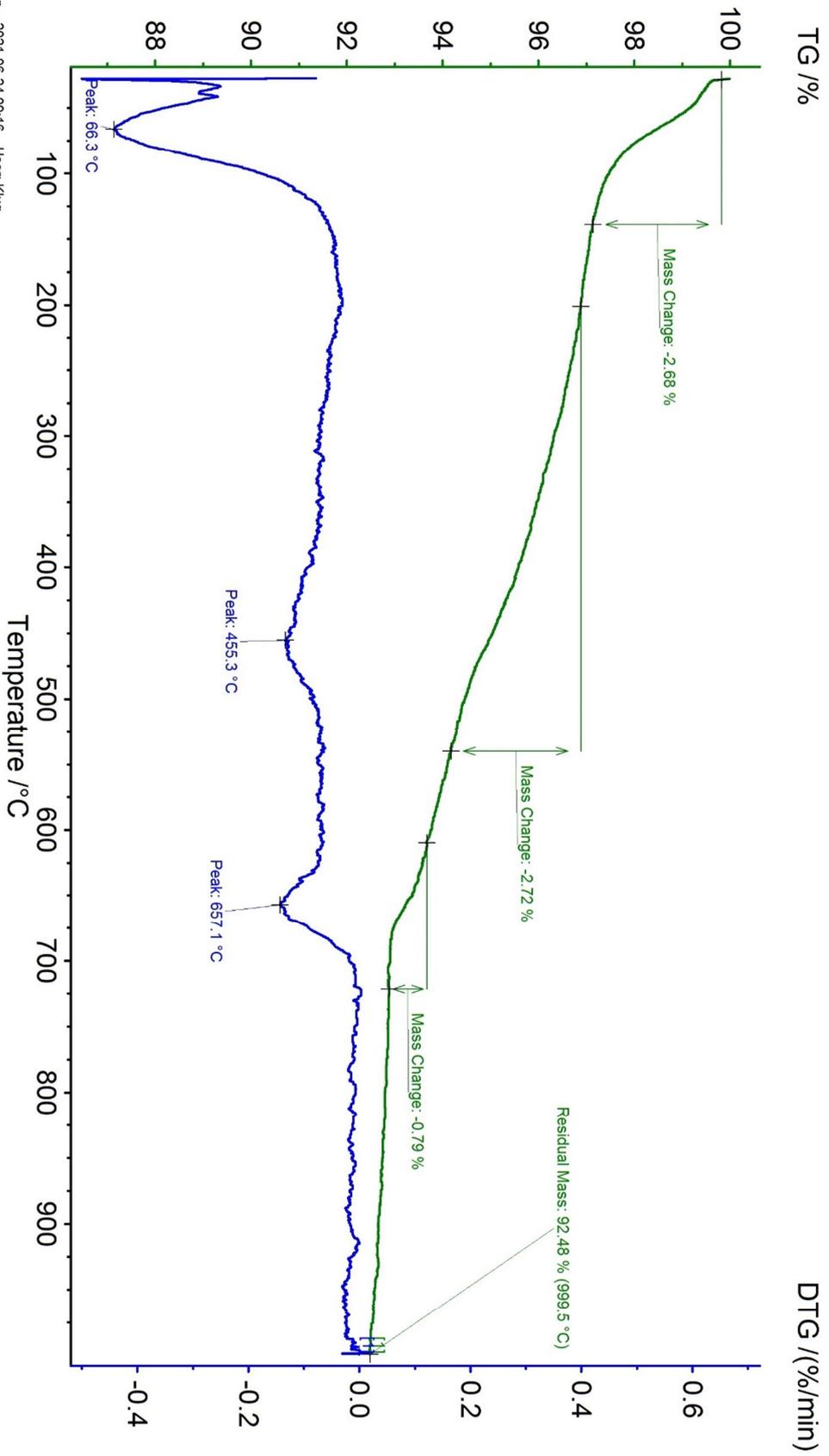
Argamassa A1S

Main: 2021-06-24 08:37 User: Klug



Instrument : NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1067-M		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\21-0064.ngb-ds3	
Project :	21-0064	Sample :	A1S Luis Eng Civil, 16.053 mg
Identity :	21-0064	Material :	
Date/time :	15/06/2021 07:36:45	Correction file :	21-0063.ngb-bs3
Laboratory :	Fundição/ Mat Avançados	Temp. Cal./Sens. Files :	TG/TG/TCX/ SENSZERO.EXX
Operator :	Téc. Lab. Samuel Medeiros	Range :	25°C/10.0(K/min)/1000°C
		Sample car./TC :	DSC/TG Std S / S
		Model/type of meas. :	DSC-TG / sample with correction
		Segments :	1/1
		Crucible :	DSC/TG pan A1203
		Atmosphere :	<no gas>/NITROGEN/50 / NITROGEN/20
		TG corr./m. range :	020/35000 mg
		DSC corr./m. range :	020/5000 µV

Argamassa A2P

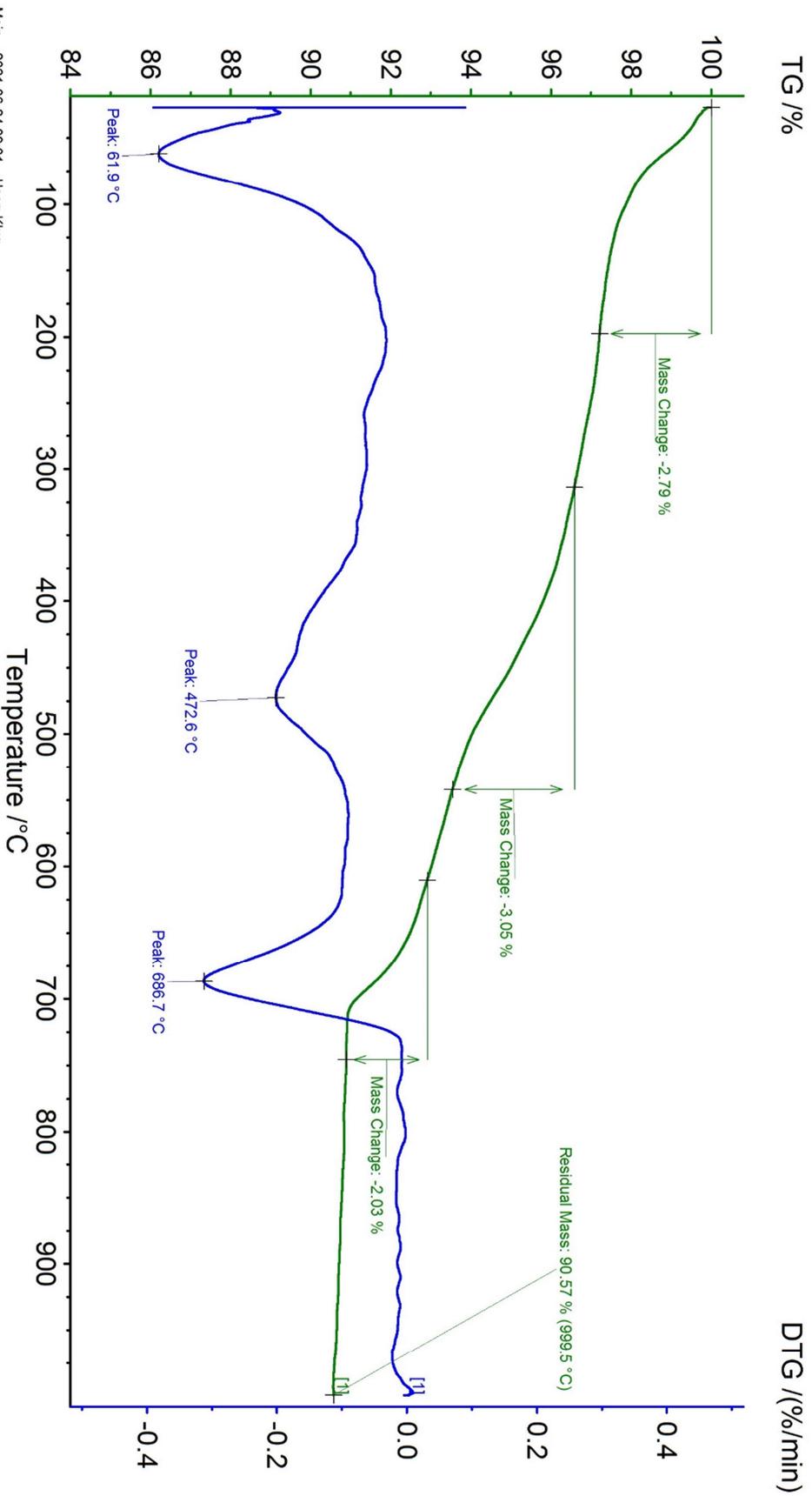


Main 2021-06-24 09:16 User: Klug

Instrument : NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1067-M File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\21-0068.ngb-ds3

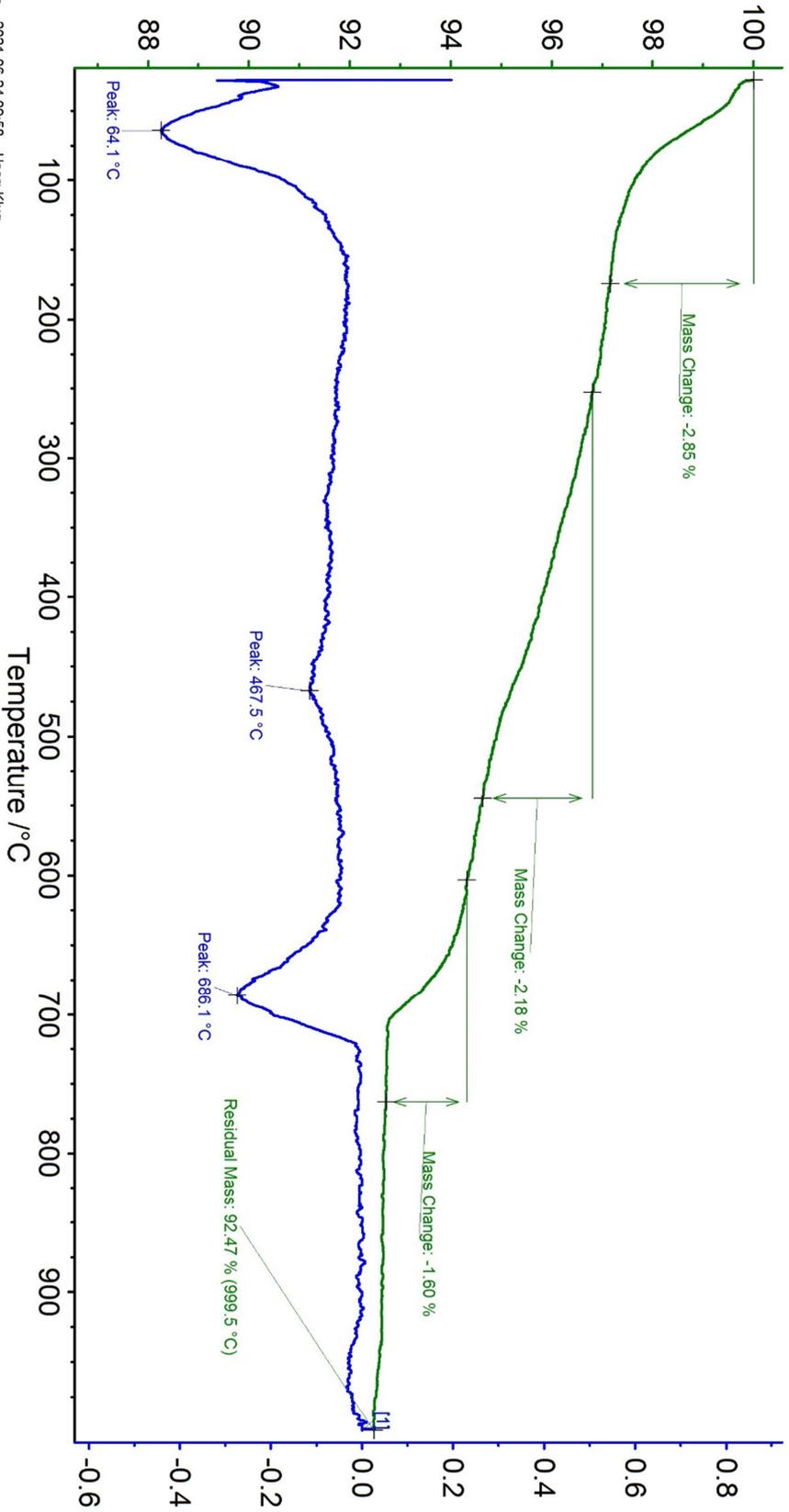
Project :	21-0068	Sample :	A2P Luis Eng CiviL 15.827 mg	Sample car./T/C :	DSC/TG Std S / S	TG corr./m. range :	020/35000 mg
Identity :	21-0068	Material :		Model/type of meas. :	DSC-TG / sample with correction	DSC corr./m. range :	020/5000 µV
Date/time :	16/06/2021 14:32:00	Correction file :	21-0063.ngb-bs3	Segments :	1/1		
Laboratory :	Fundição Mat Avançadas	Temp.Cal/Sens. Files :	TGALZERO.TCX / SENZZERO.EXX	Crucible :	DSC/TG pan Al2O3		
Operator :	Téc. Lab. Samuel Medeiros	Range :	25°C/10.0(K/min)/1000°C	Atmosphere :	<no gas>/--- / NITROGEN/50 / NITROGEN/20		

Argamassa A2S



TG /%

DTG /(%/min)

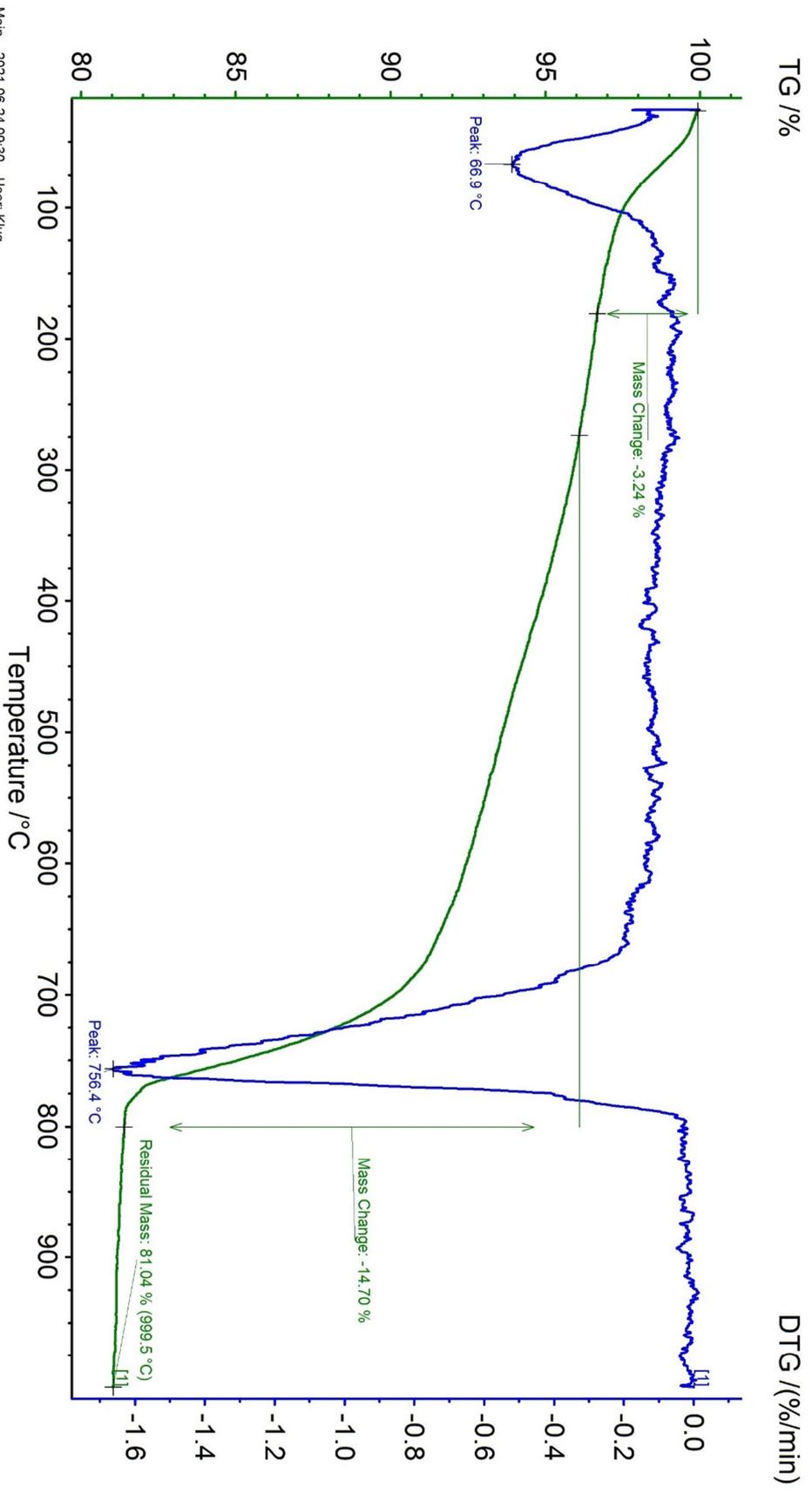


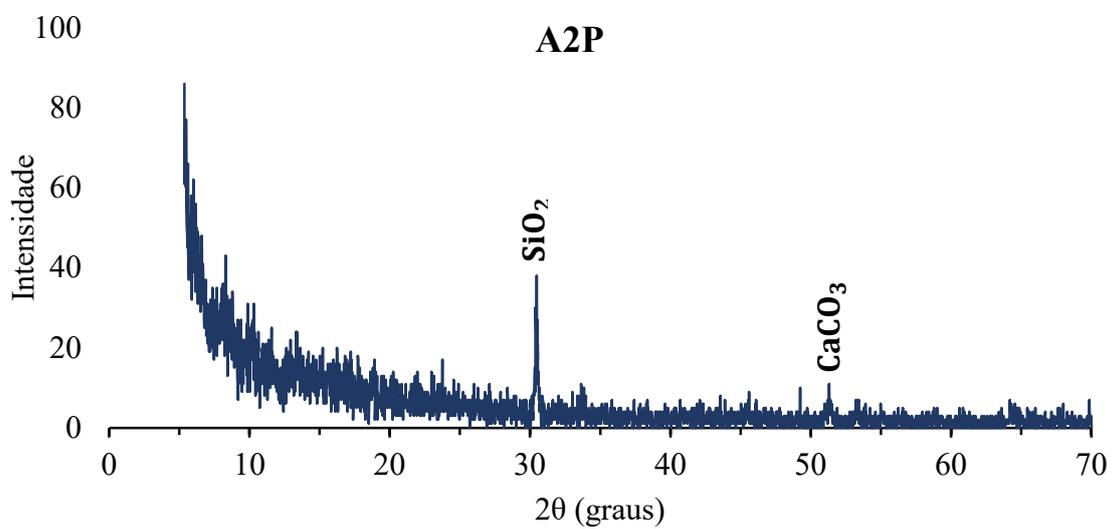
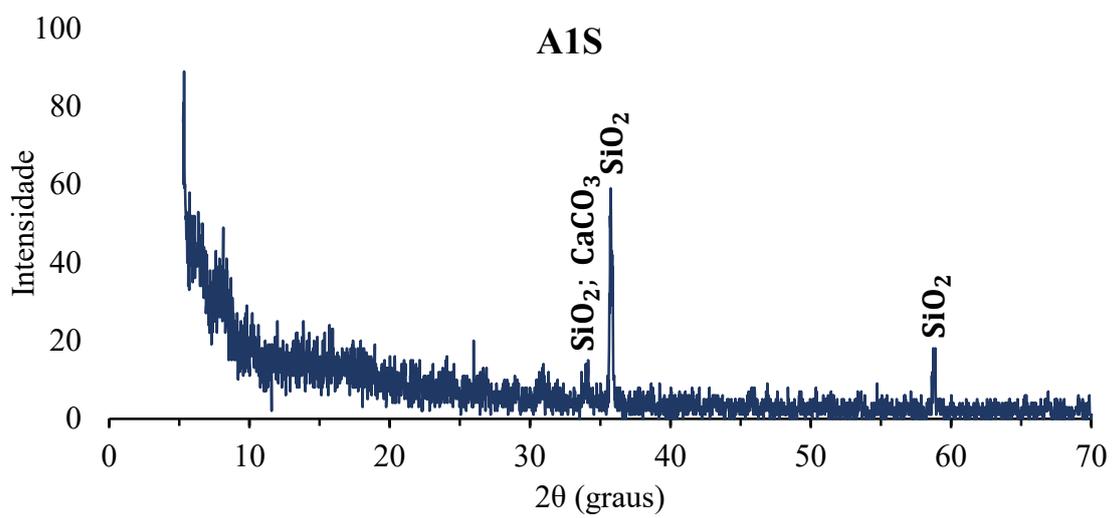
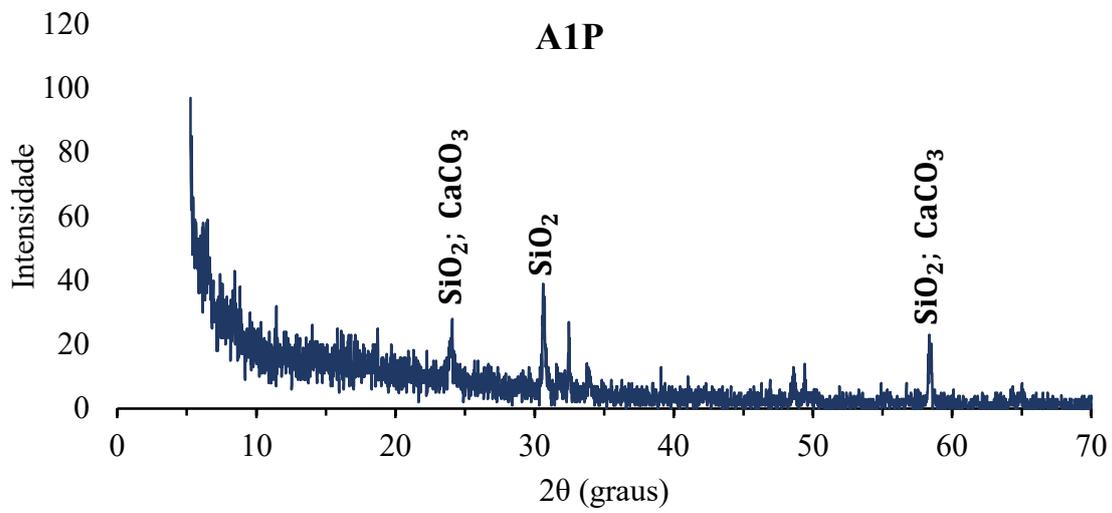
Main 2021-06-24 09:58 User: Klug

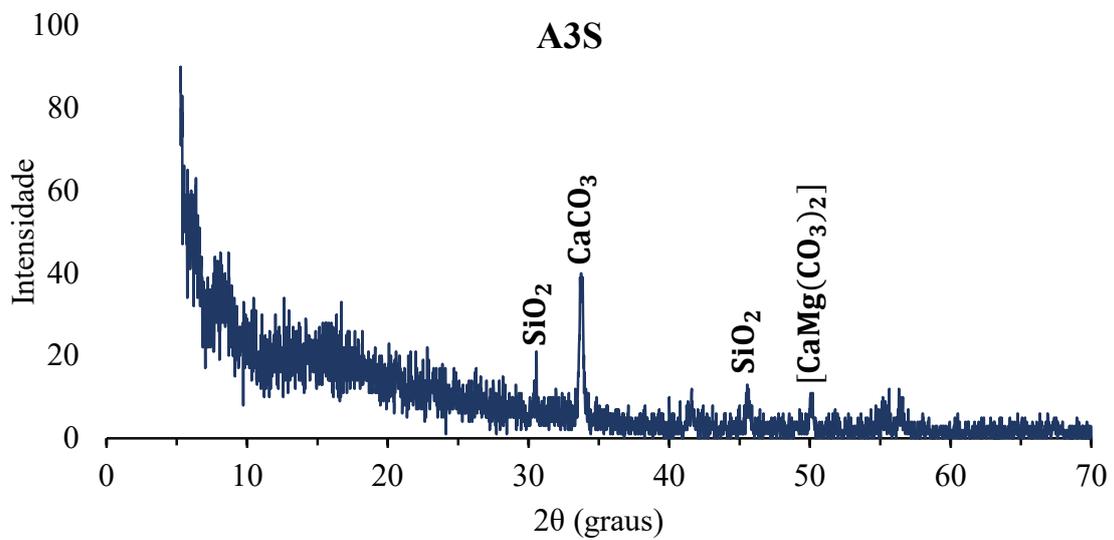
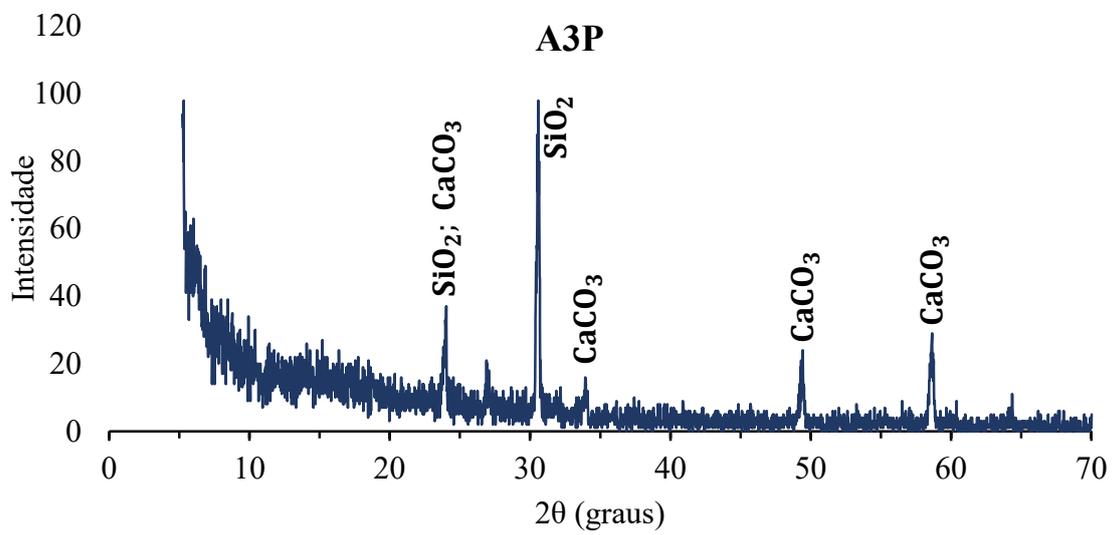
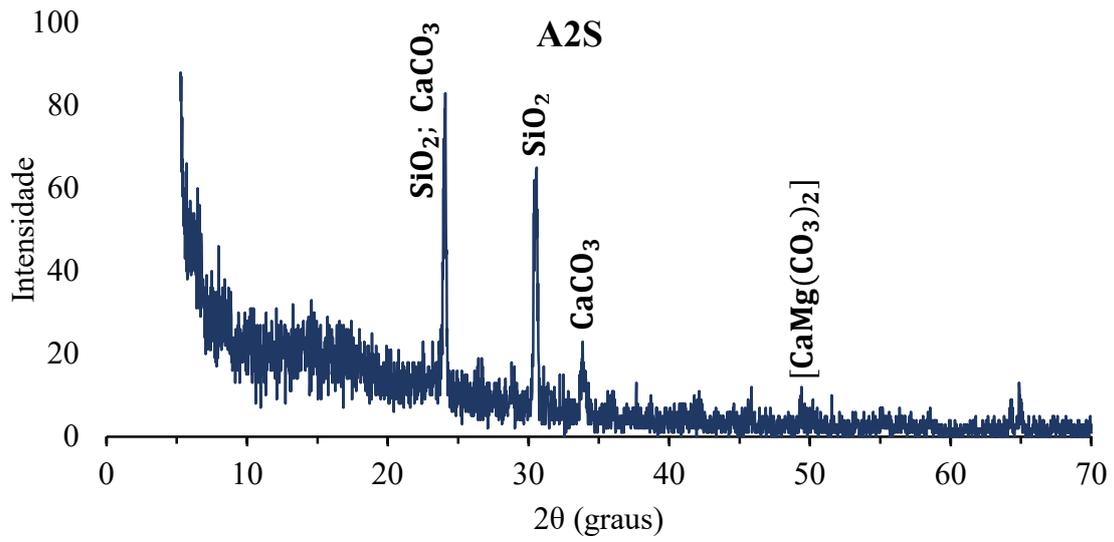
Instrument : NETZSCH STA 449F3 STA449F3A-1067.M		File : C:\NETZSCH\Proteus6\data\21-0071.ngb-ds3	
Project :	21-0071	Material :	
Identity :	21-0071	Correction file :	21-0063.ngb-bs3
Date/time :	17/06/2021 14:35:26	Temp.Cal./Sens. Files :	agst 2019 temperatura calibracao.ngb-ts3 / SENSZERO.EXX
Laboratory :	Fundição/ Mat Avancados	Range :	25°C/10.0(K/min)/1000°C
Operator :	Téc. Lab. Samuel Medeiros	Sample car./TC :	DSC/TG Std S / S
Sample :	A3P Luis Eng Civil, 16.260 mg	Model/type of meas. :	DSC-TG / sample with correction
Segments : 1/1		Crucible :	DSC/TG pan Al2O3
Atmosphere :		Atmosphere :	<no gas>/--- / NITROGEN/50 / NITROGEN/20
TG corr./m. range :		TG corr./m. range :	020/35000 mg
DSC corr./m. range :		DSC corr./m. range :	020/5000 µV

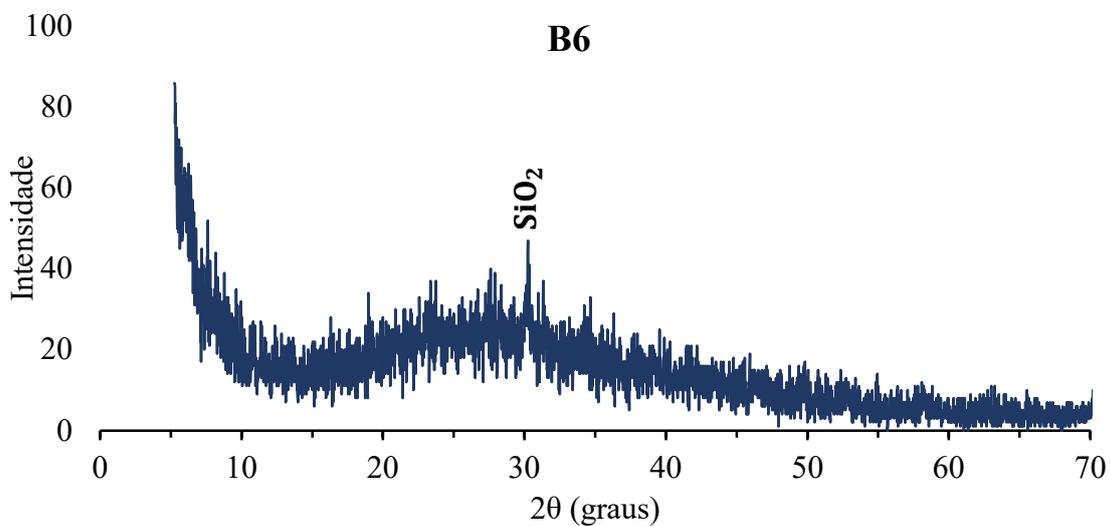
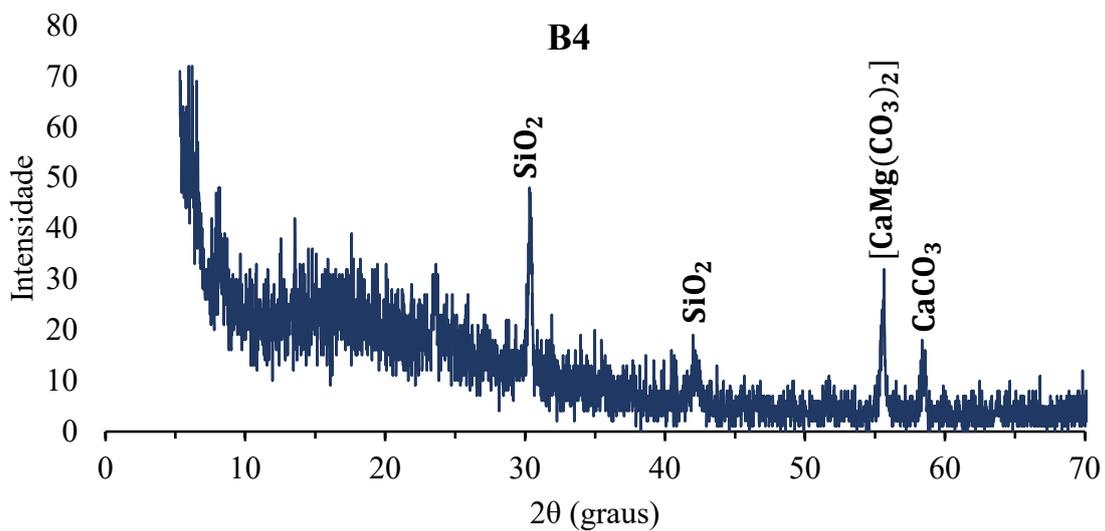
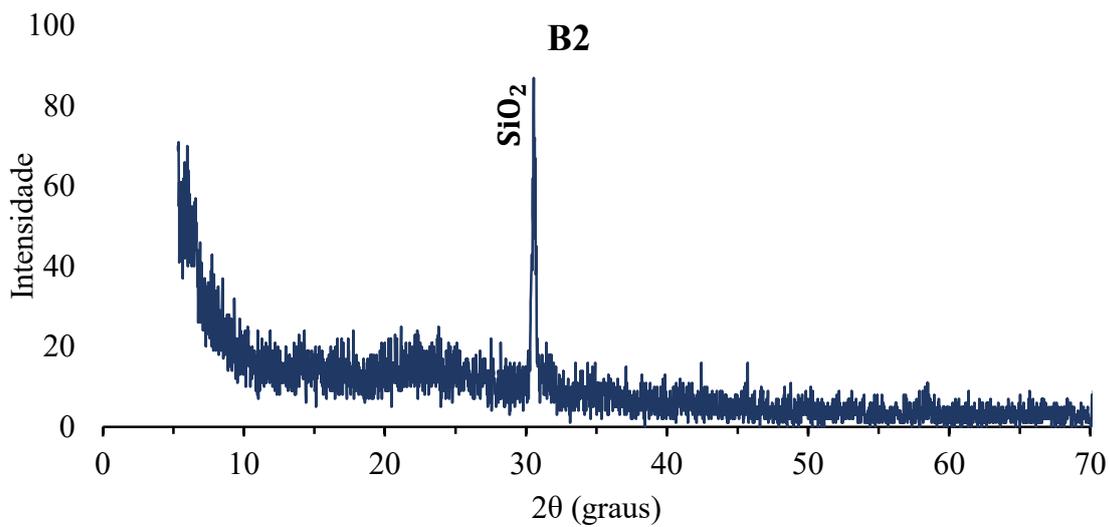
Argamassa A3P

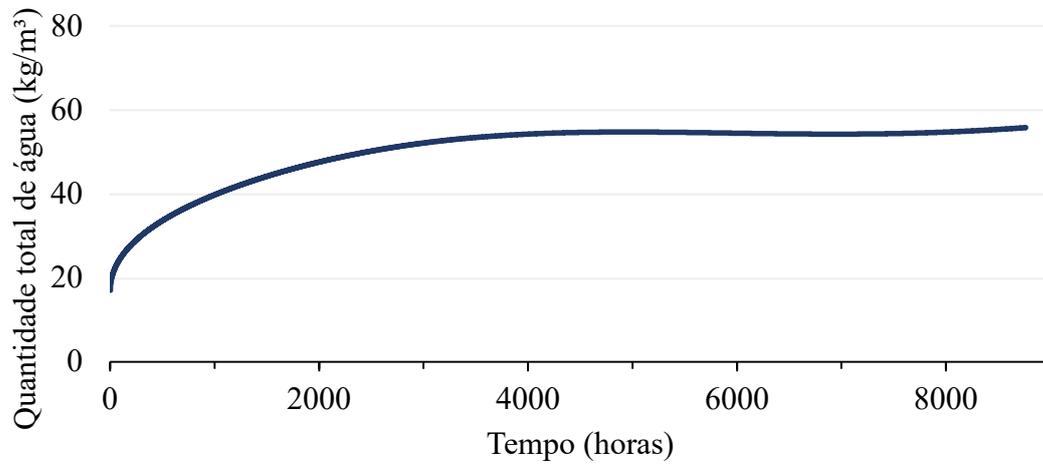
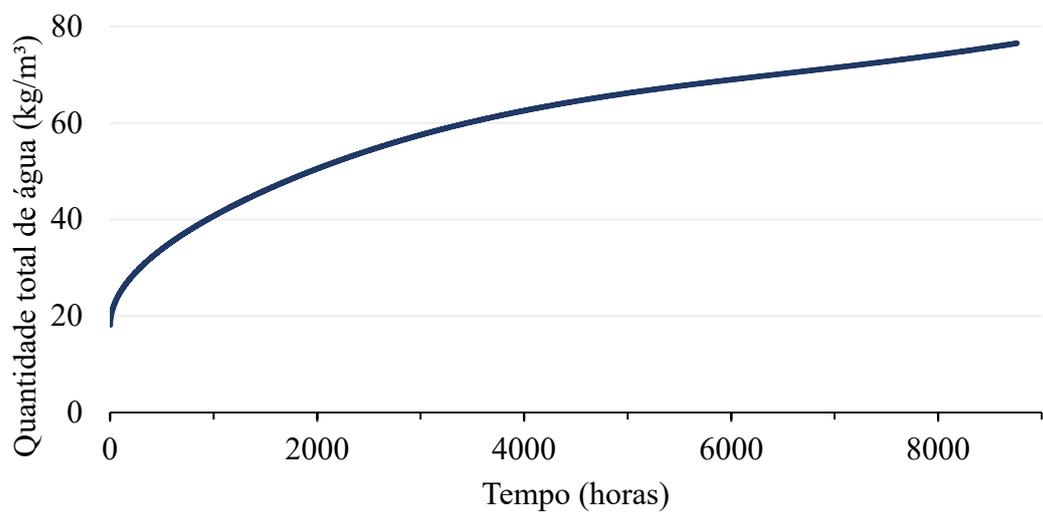
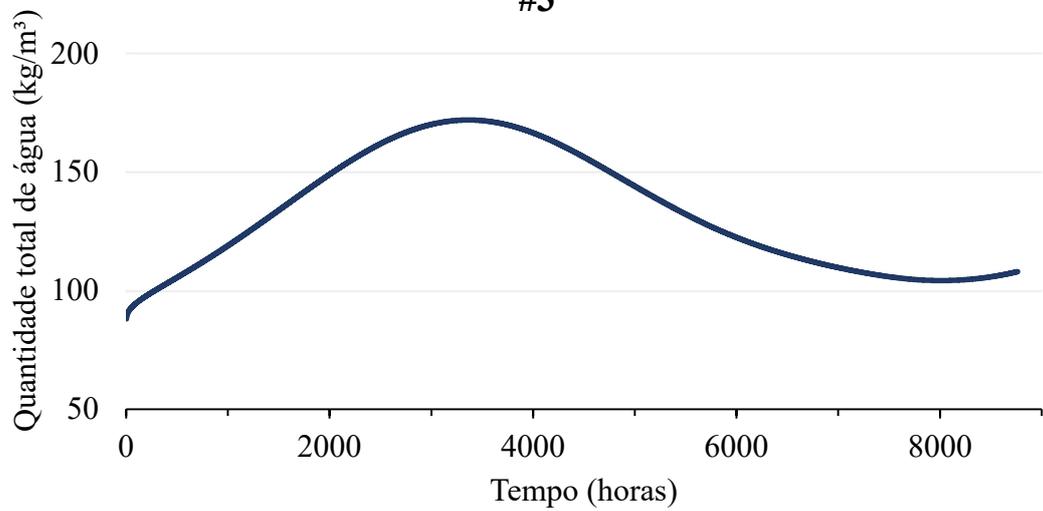
Argamassa A3S

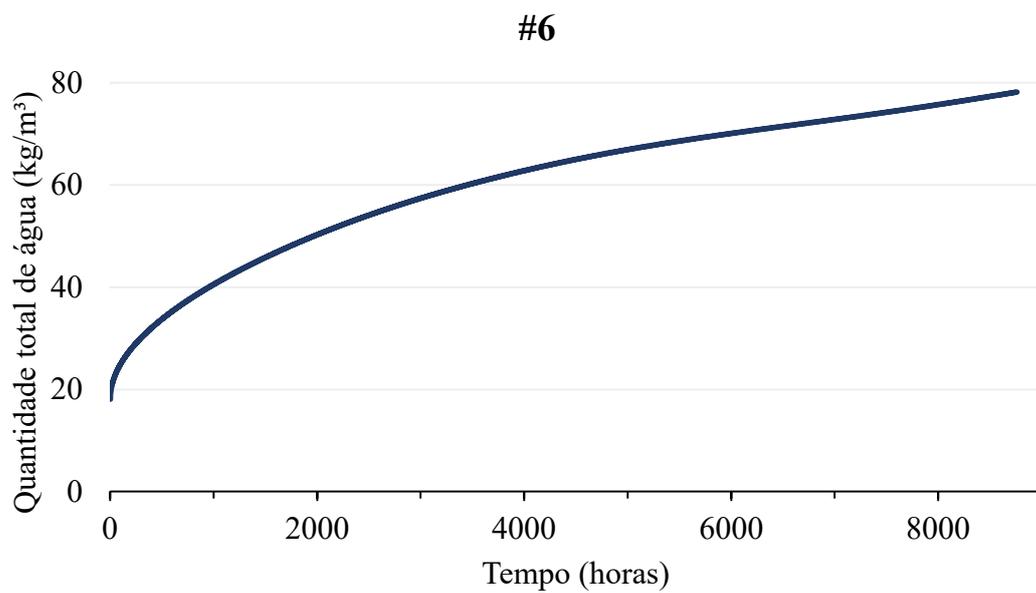
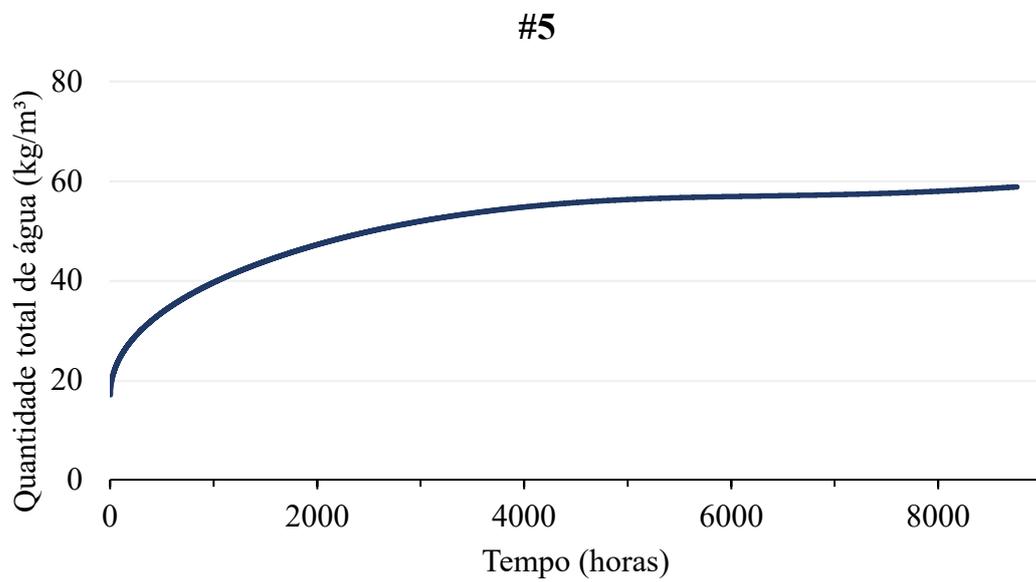
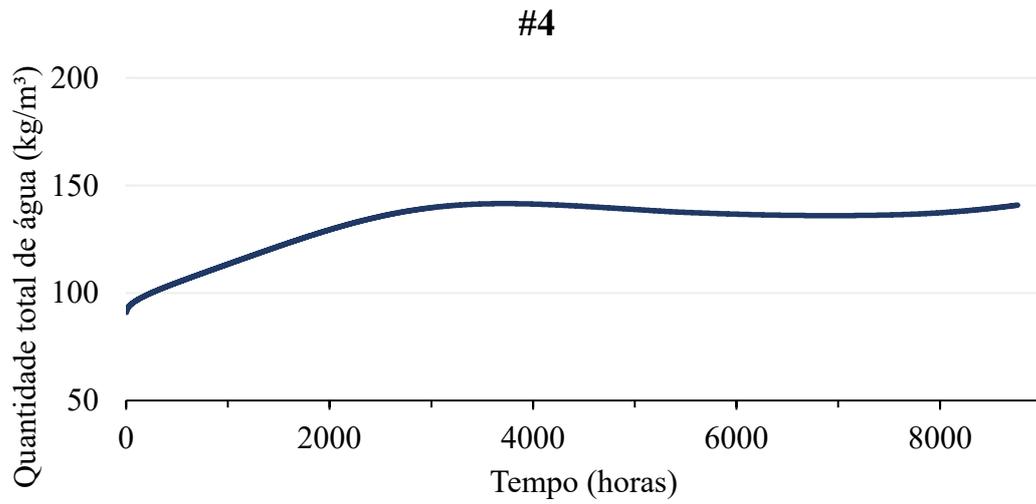


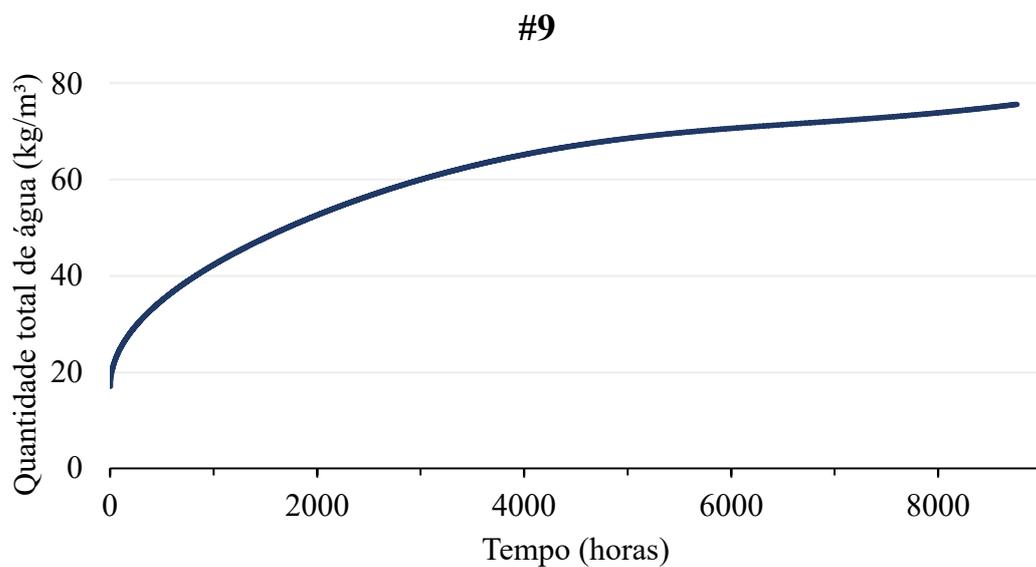
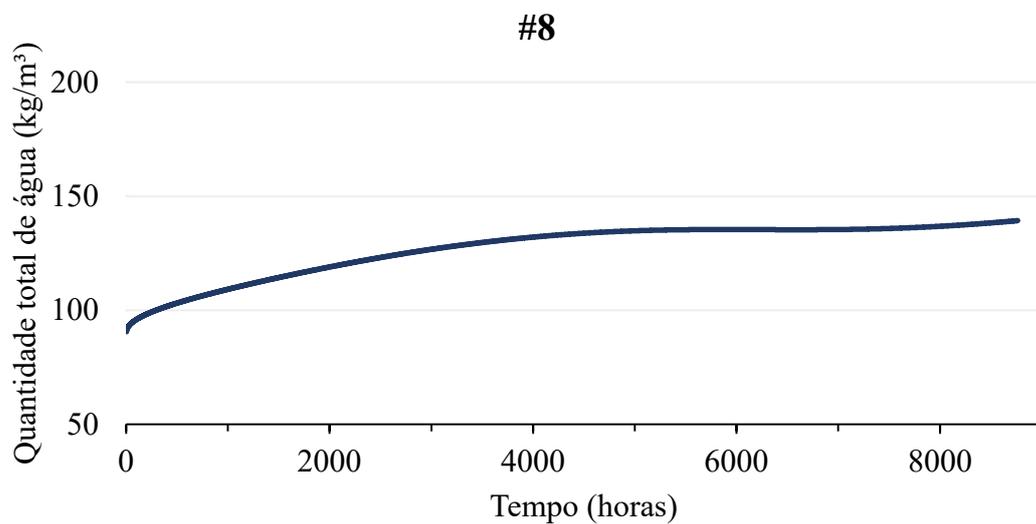
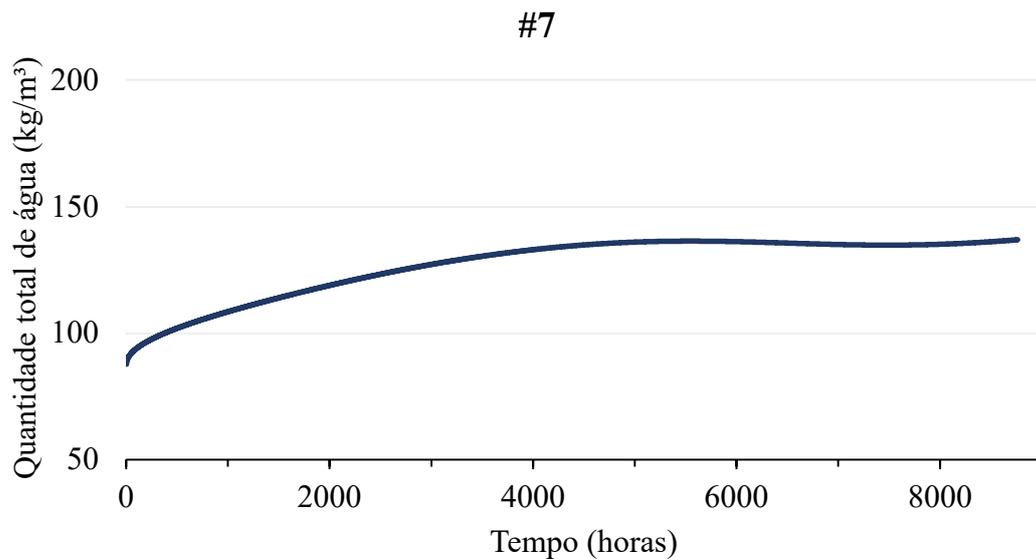
APÊNDICE B – CURVAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X**Argamassas**

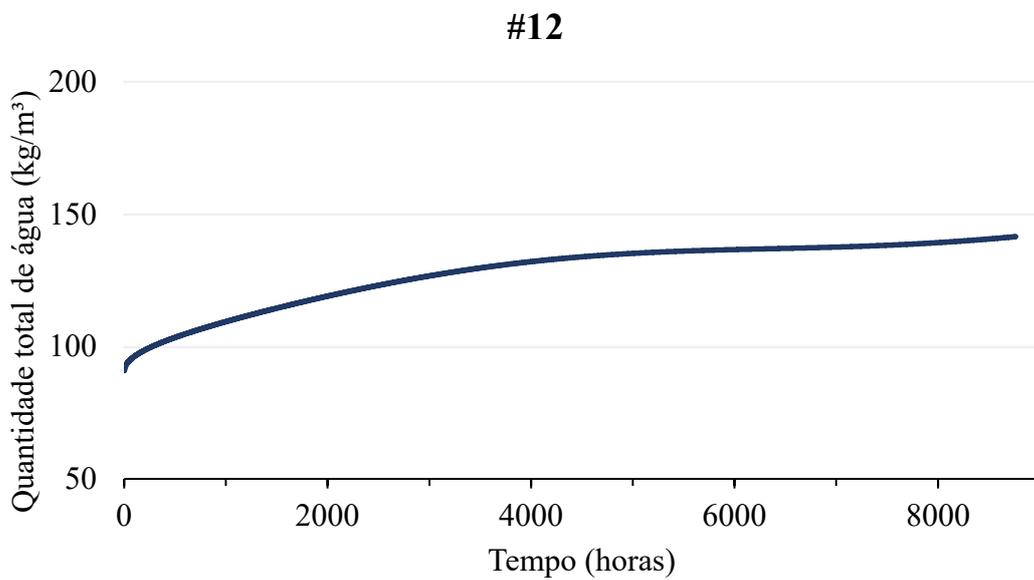
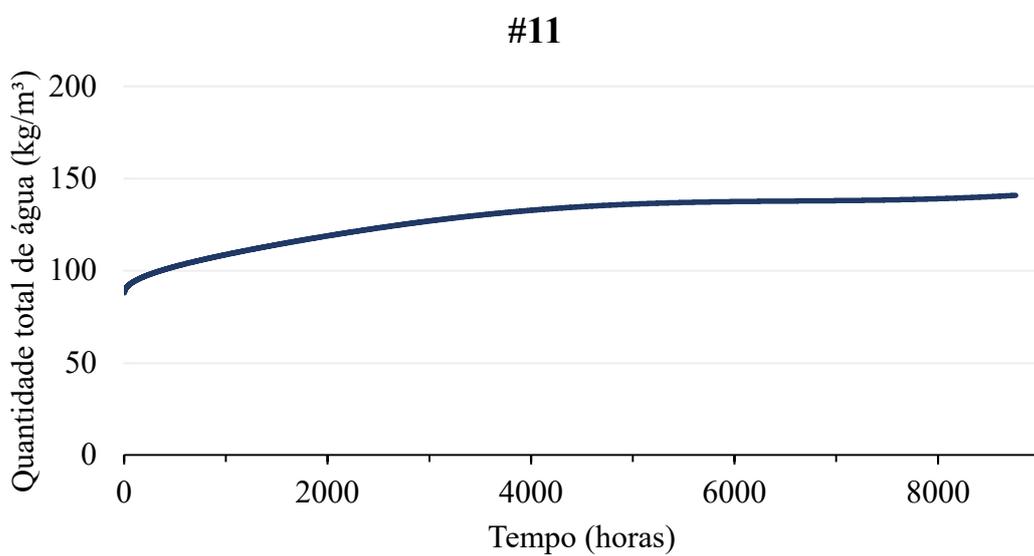
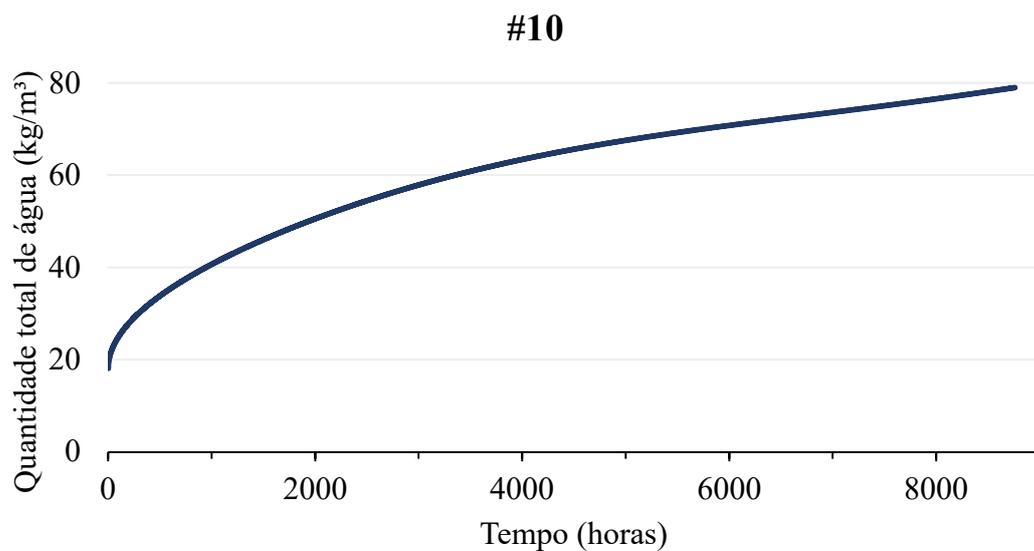


Tijolos

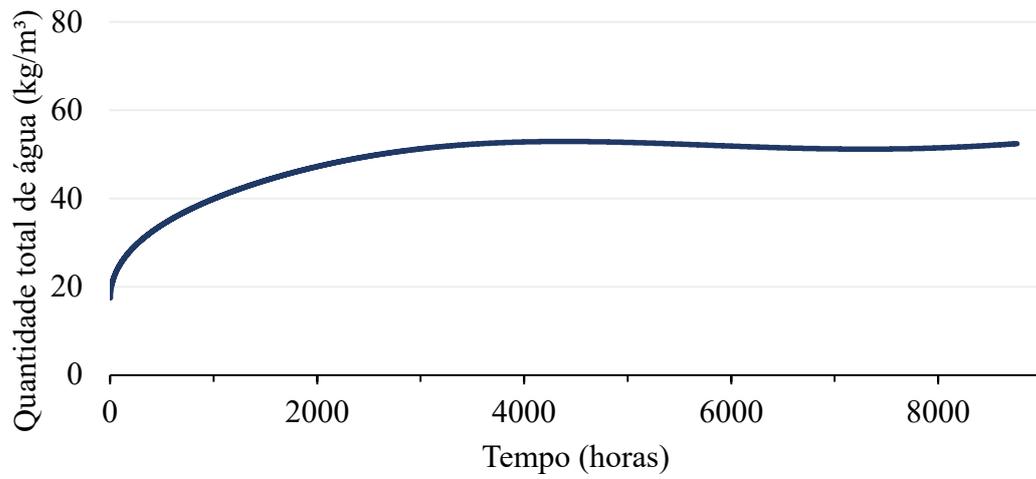
APÊNDICE C – CURVAS DE ASCENSÃO CAPILAR**#1****#2****#3**



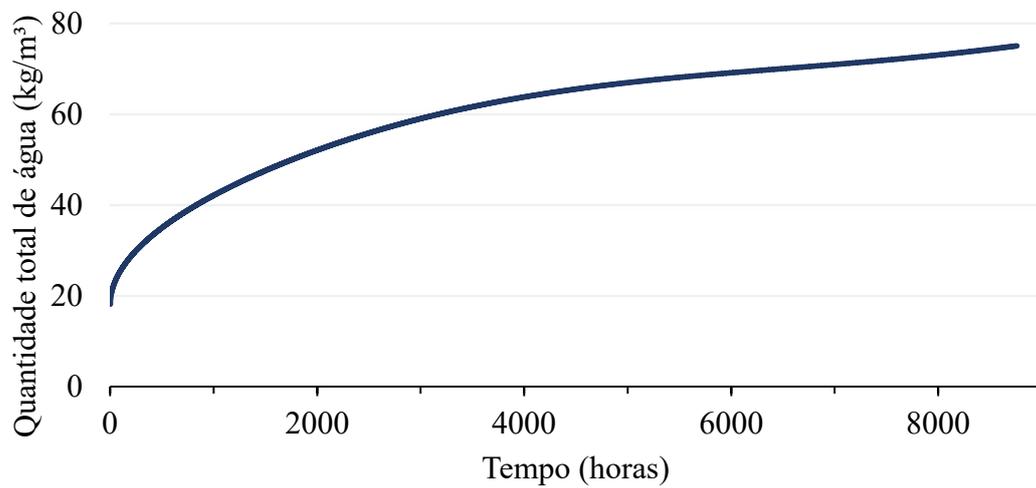




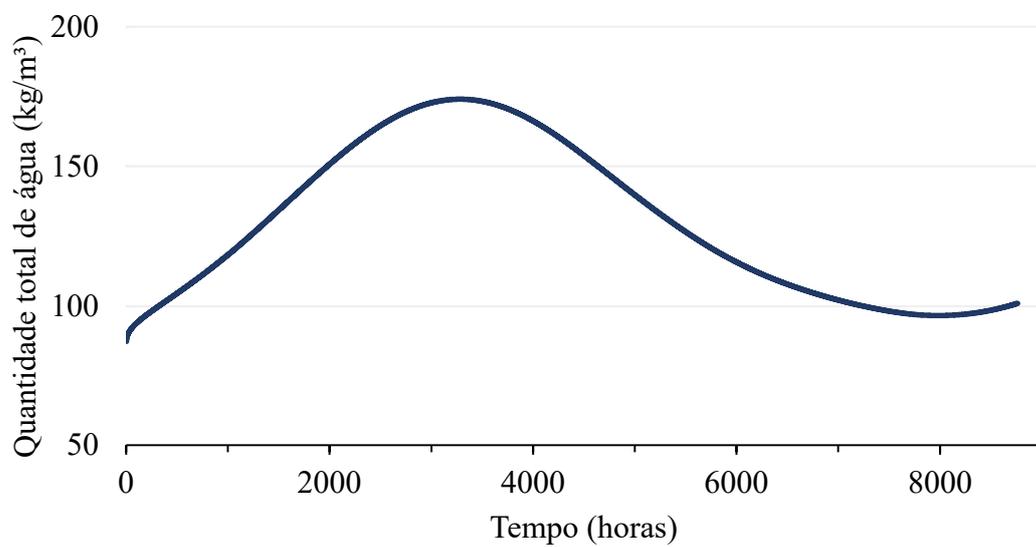
#13

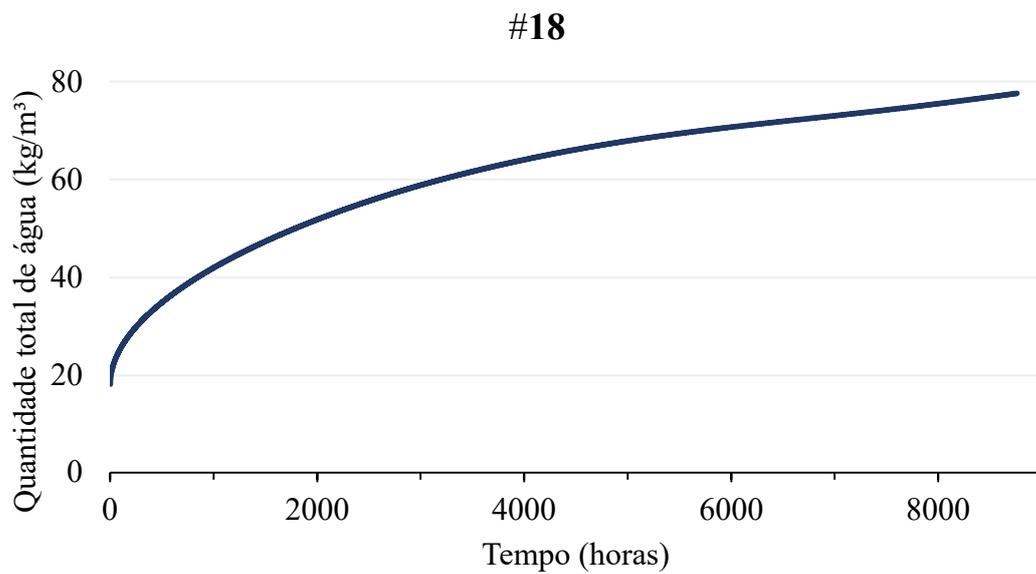
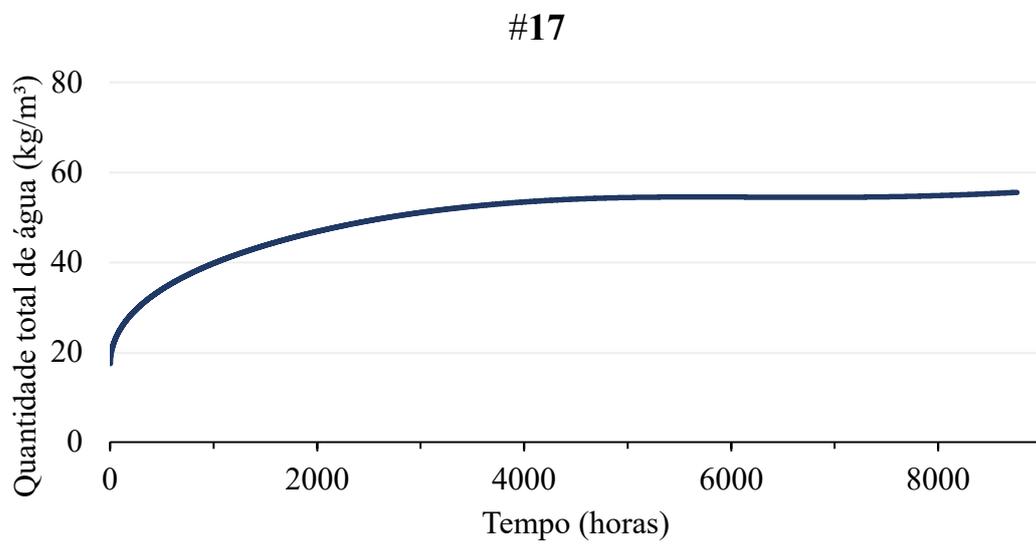
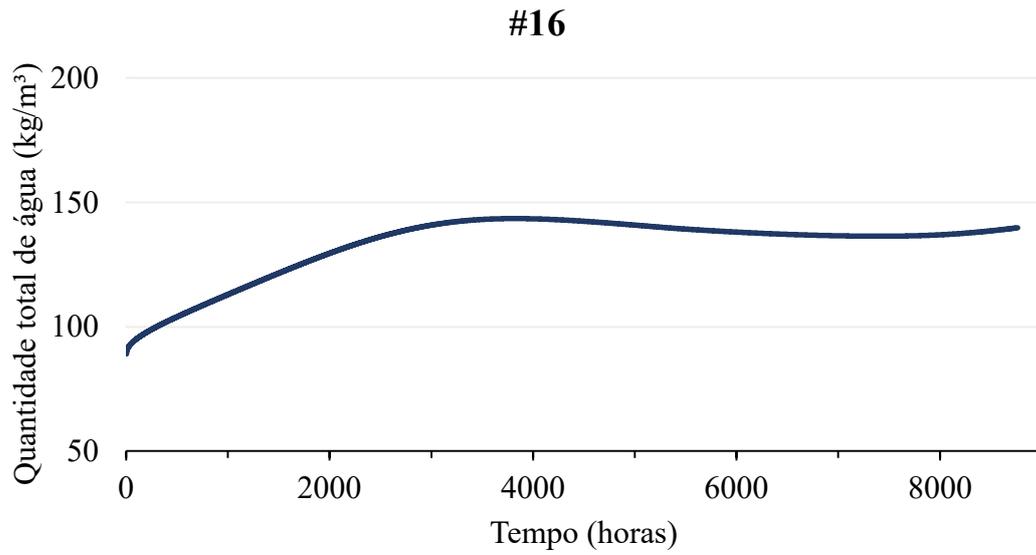


#14

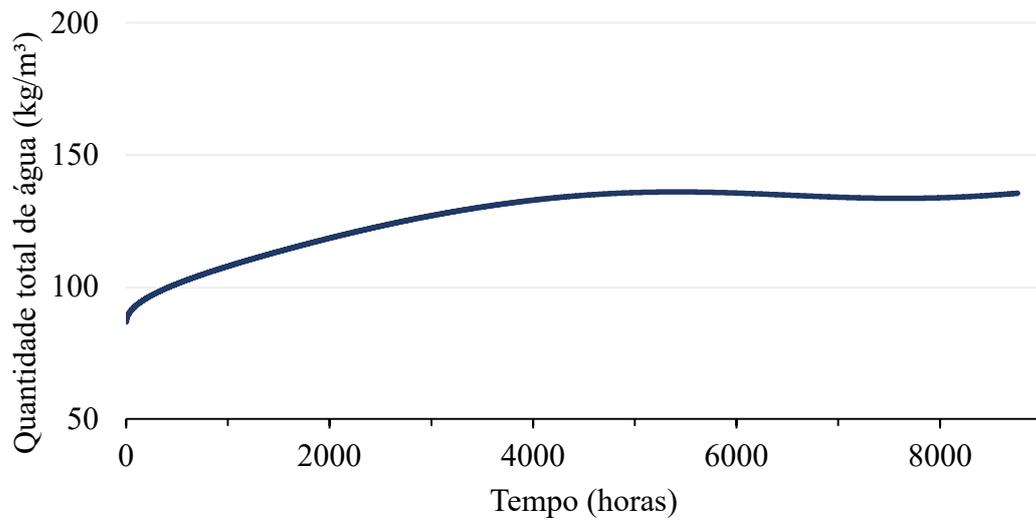


#15

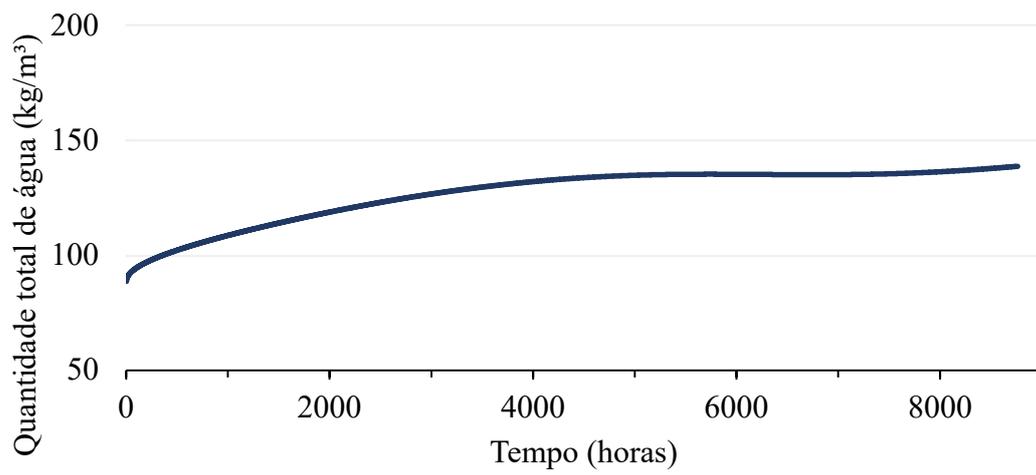




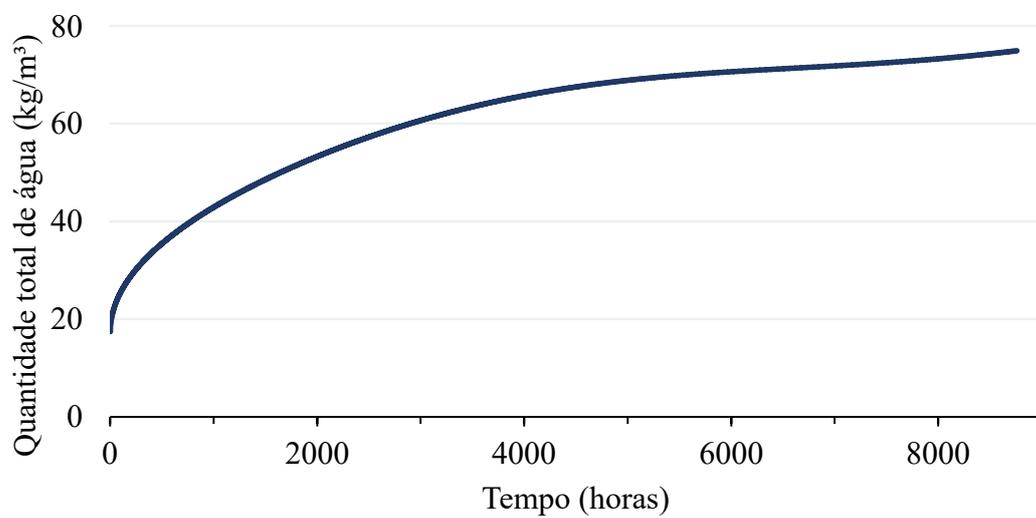
#19

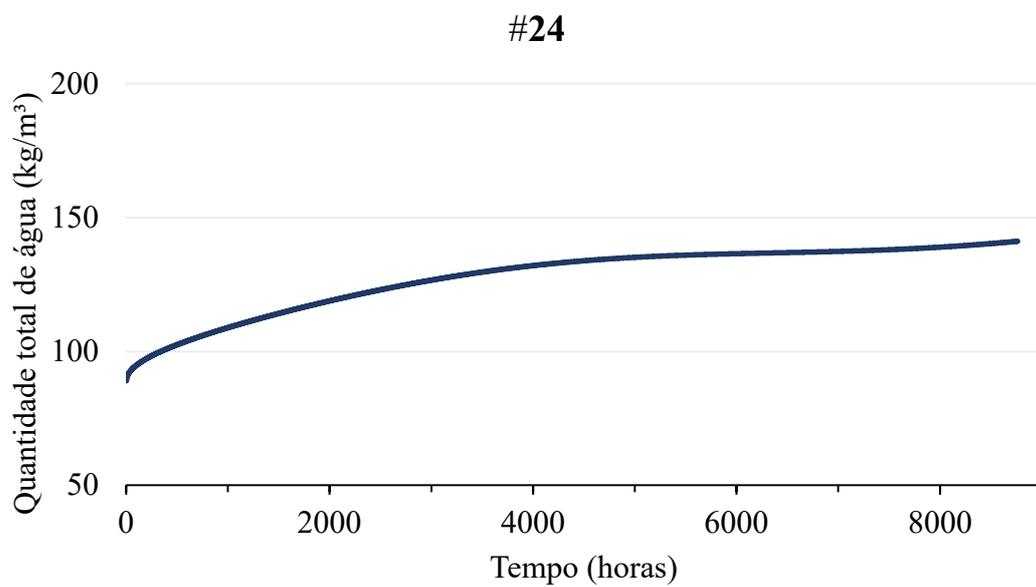
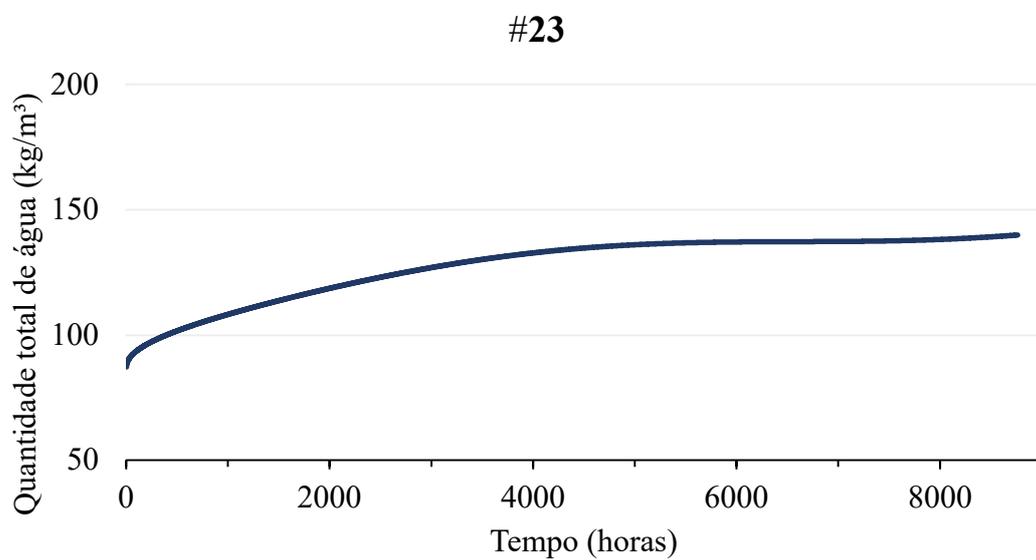
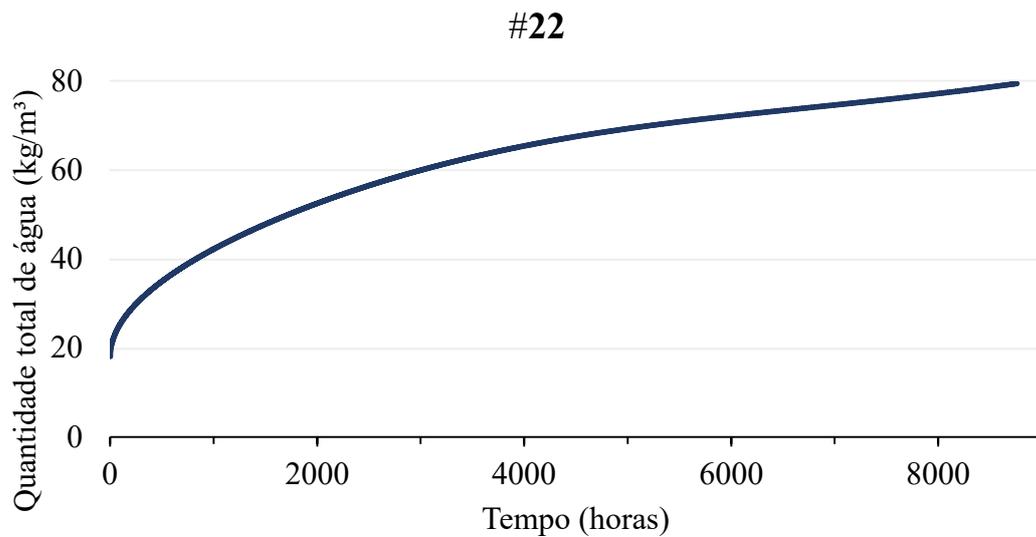


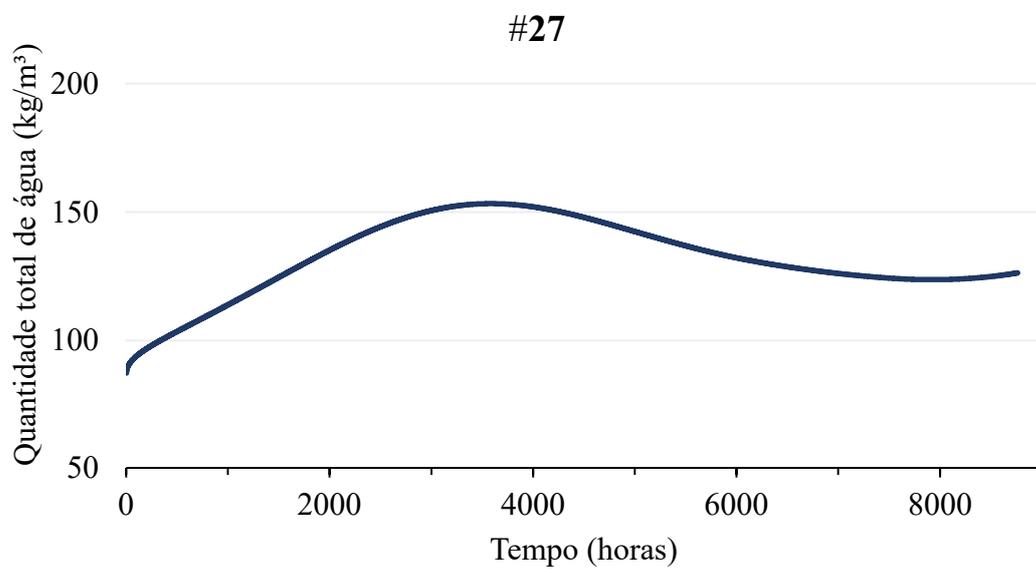
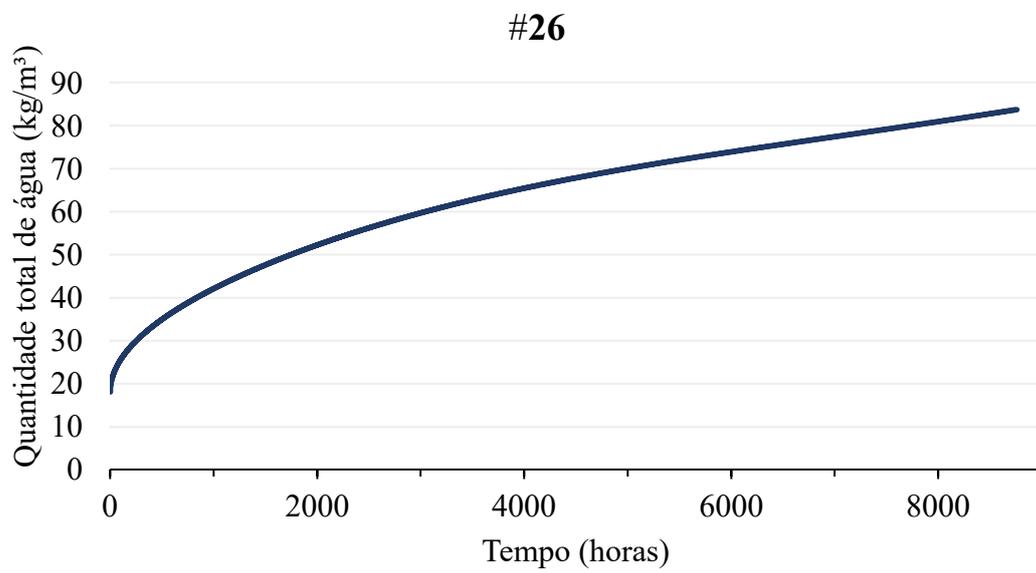
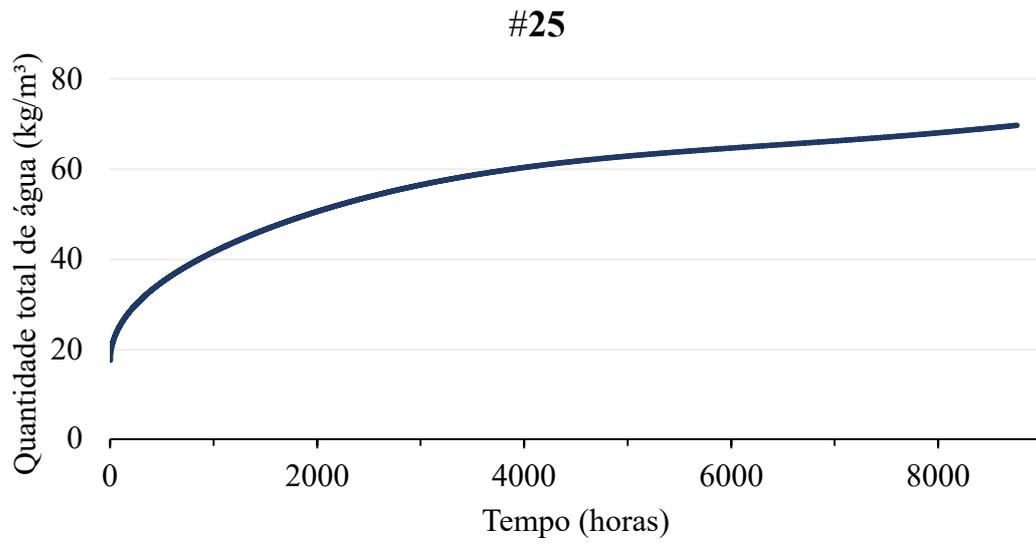
#20

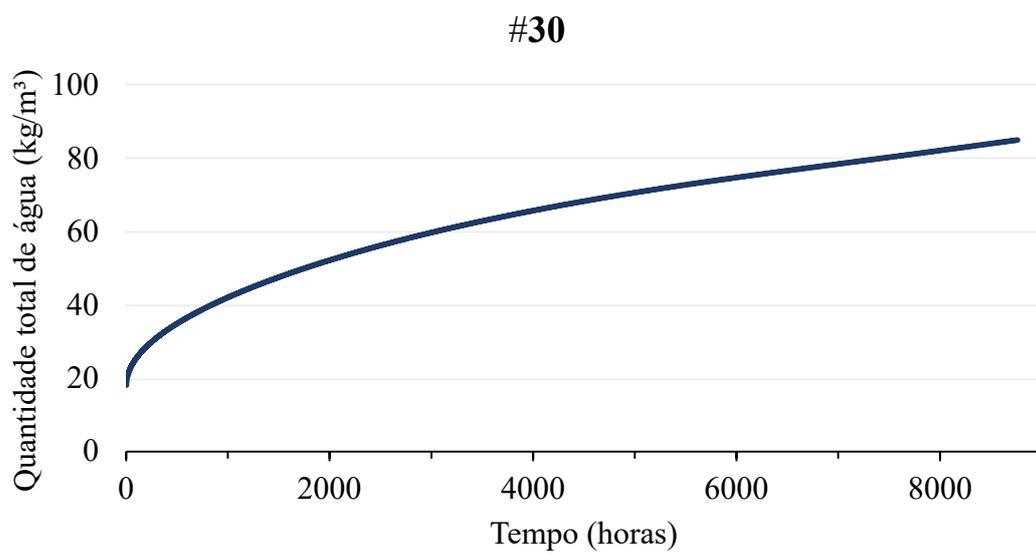
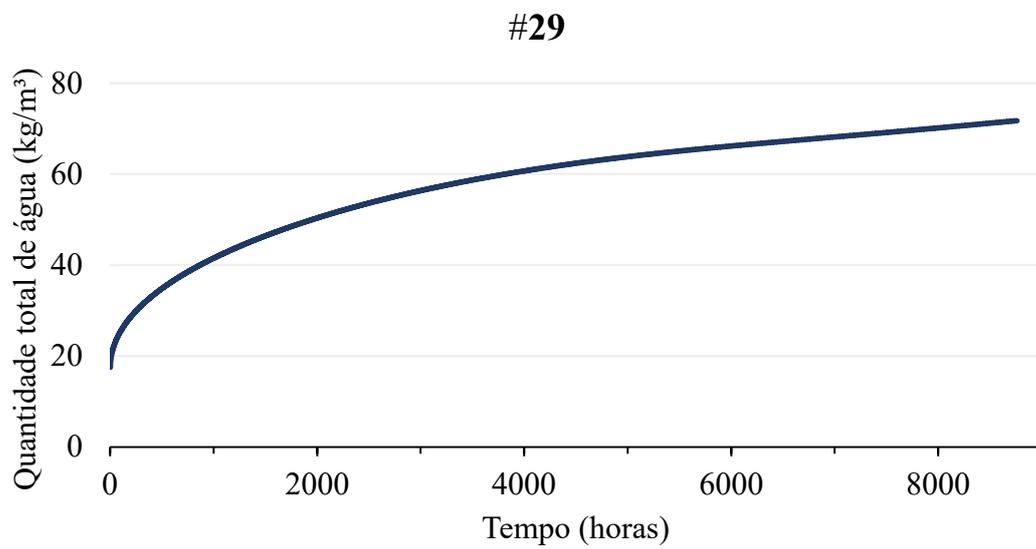
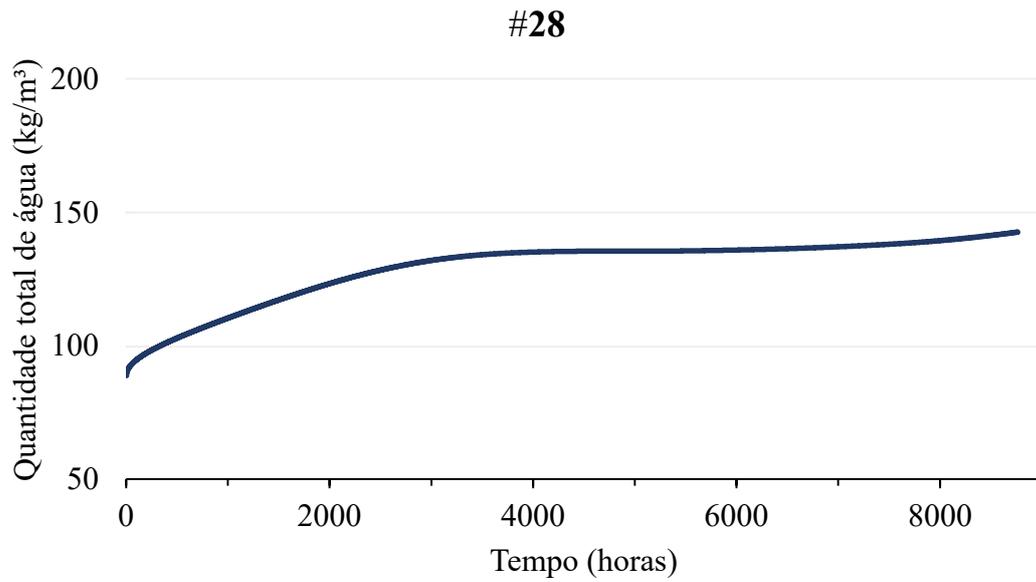


#21

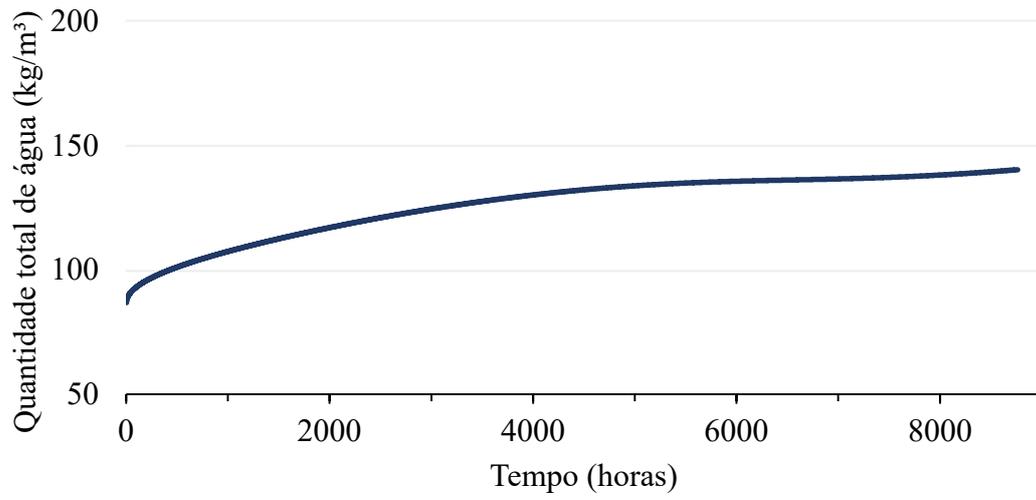




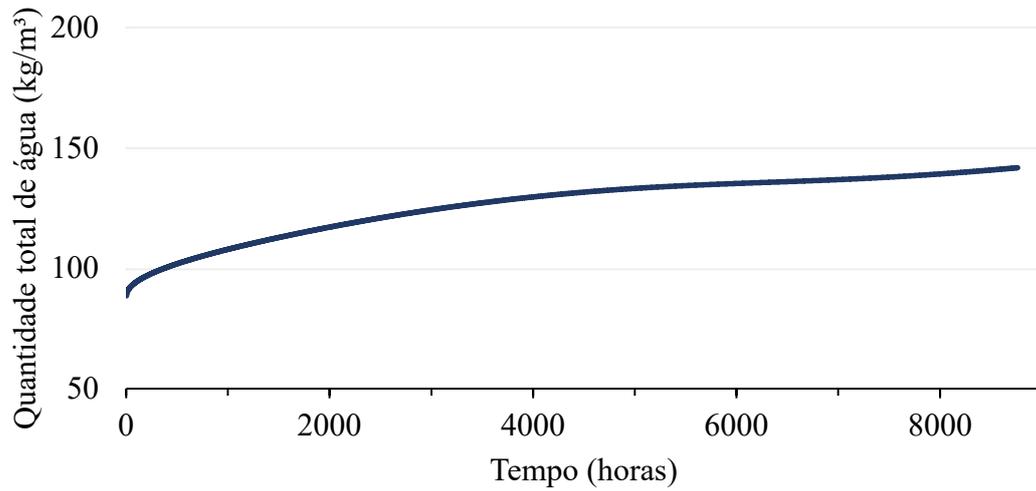




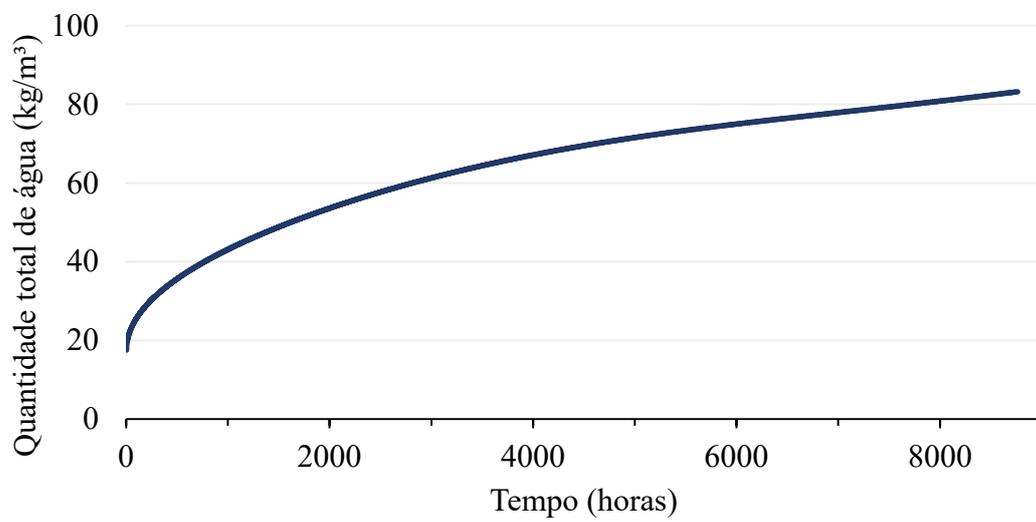
#31

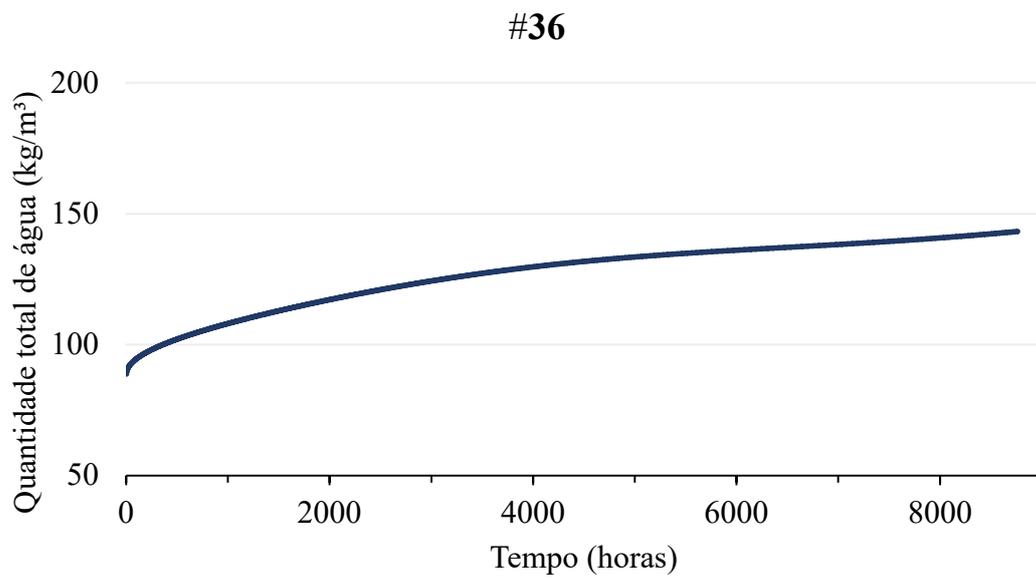
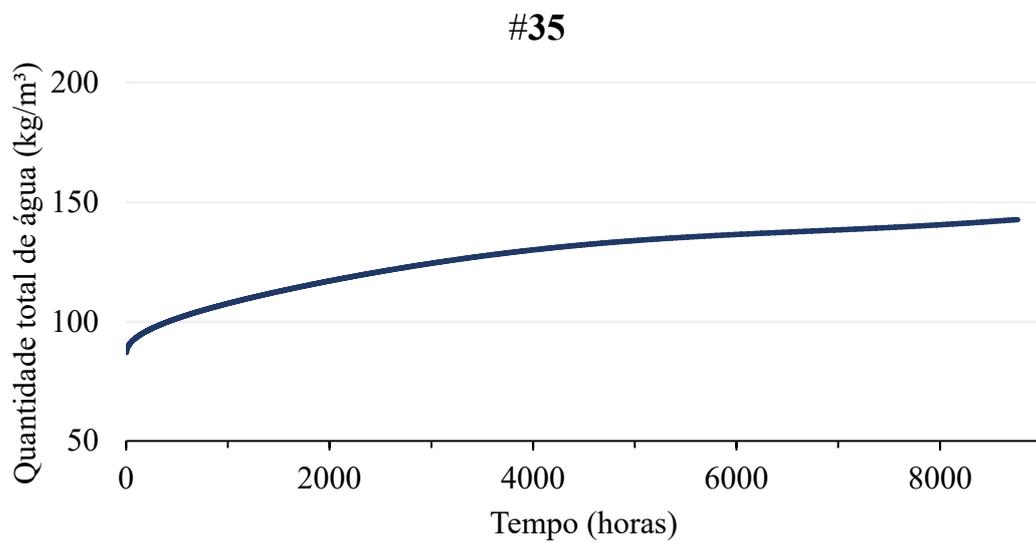
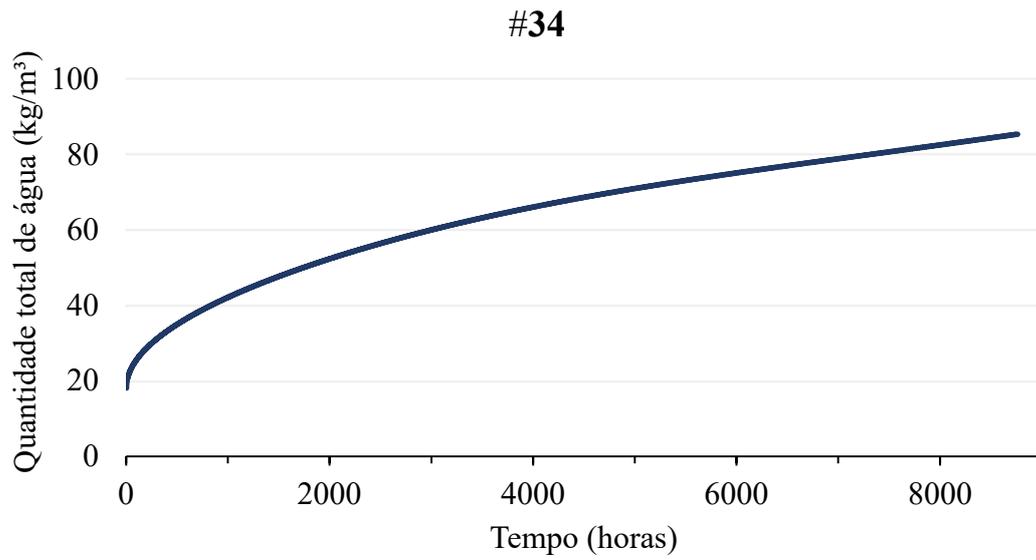


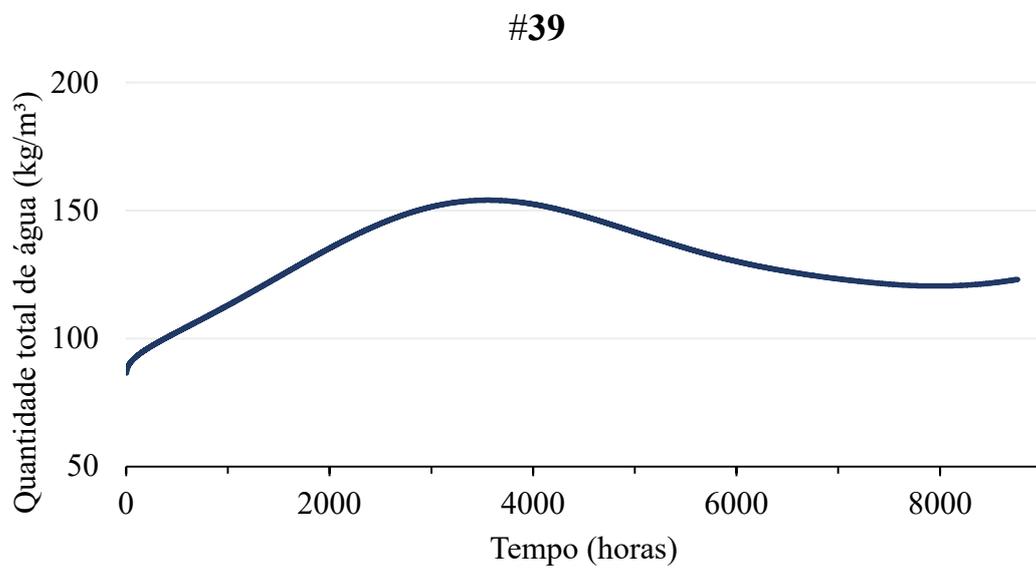
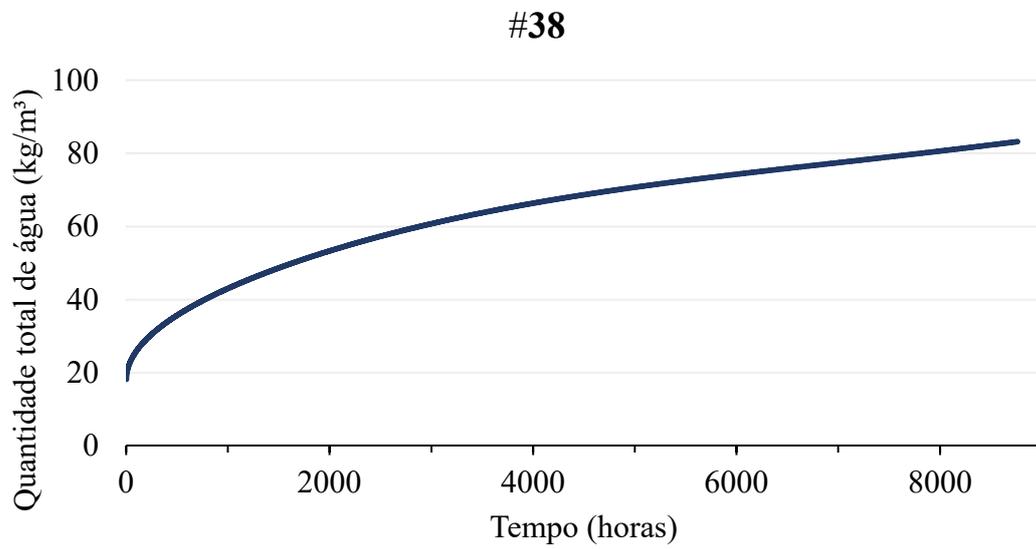
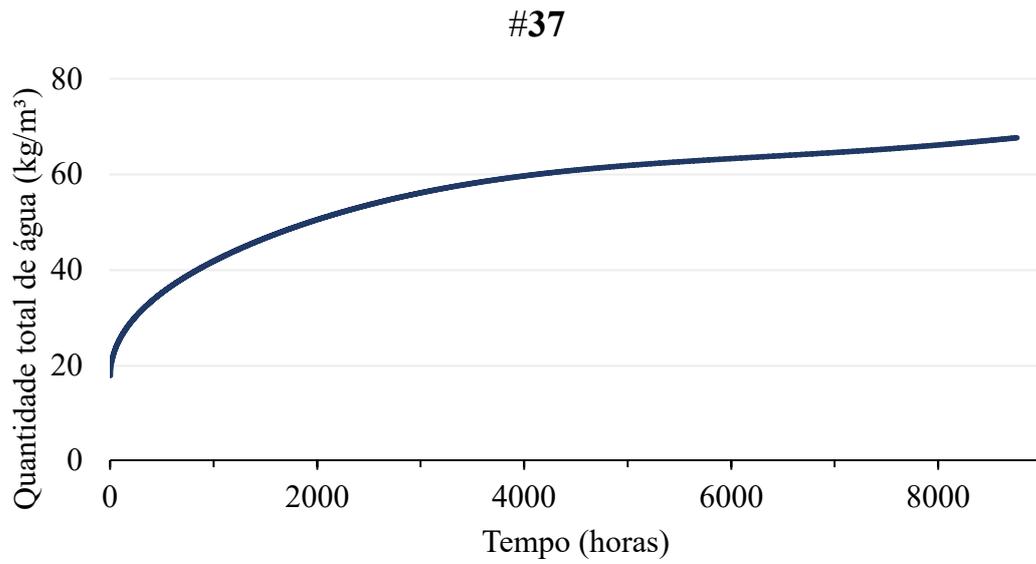
#32

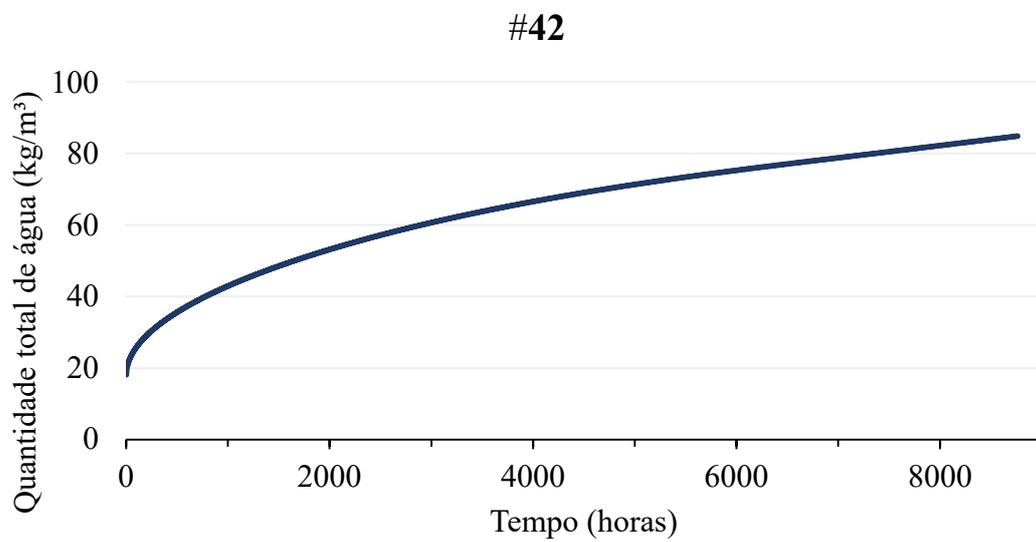
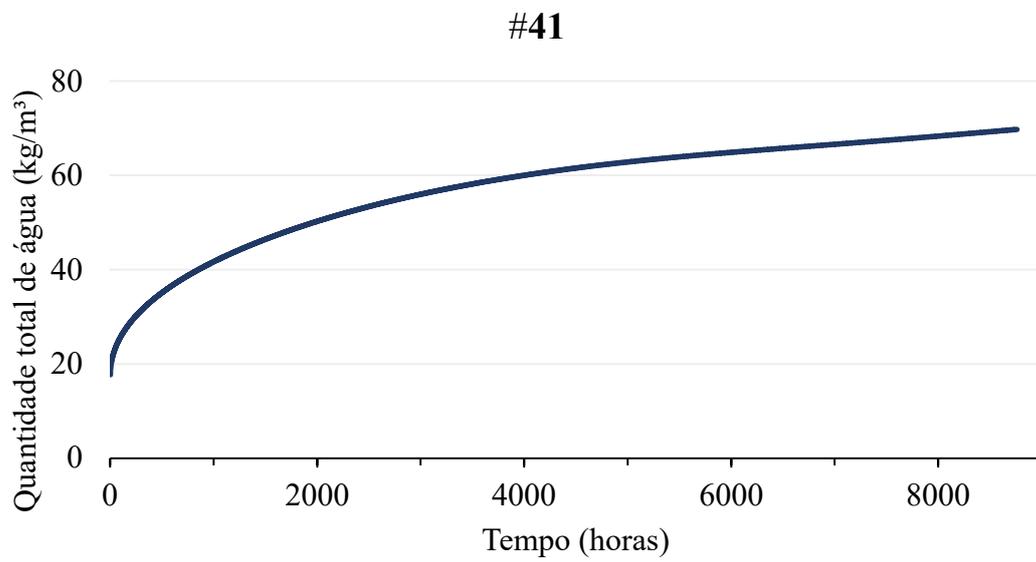
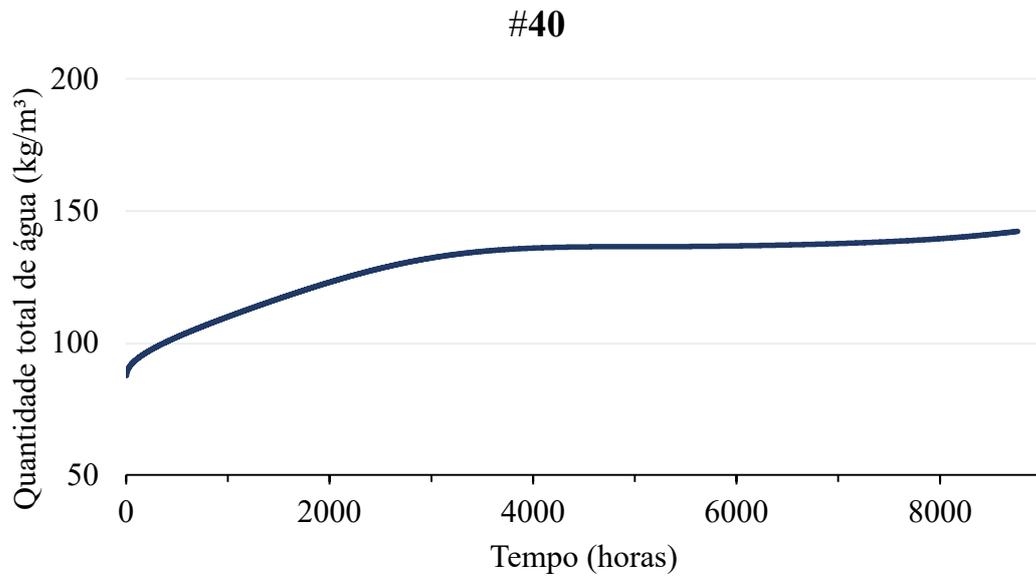


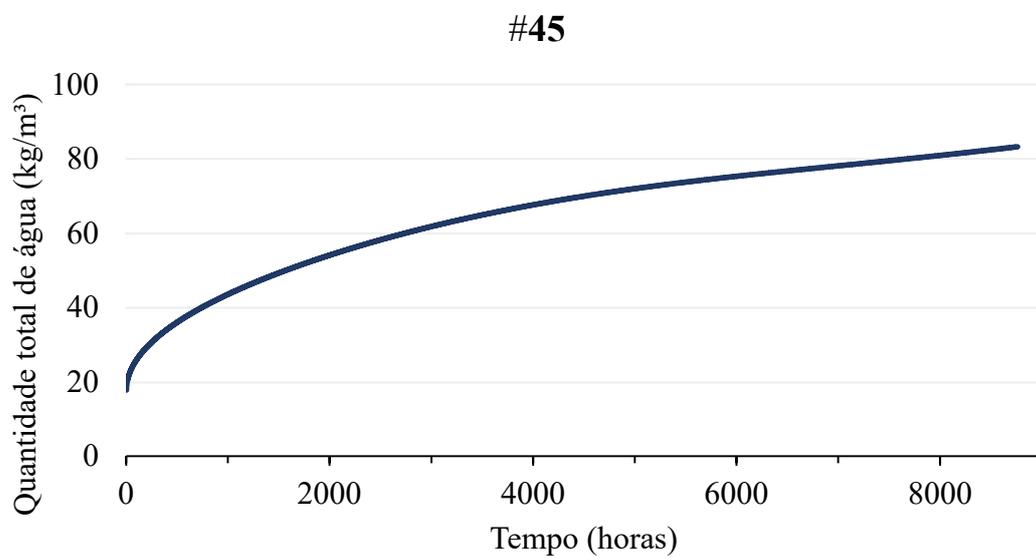
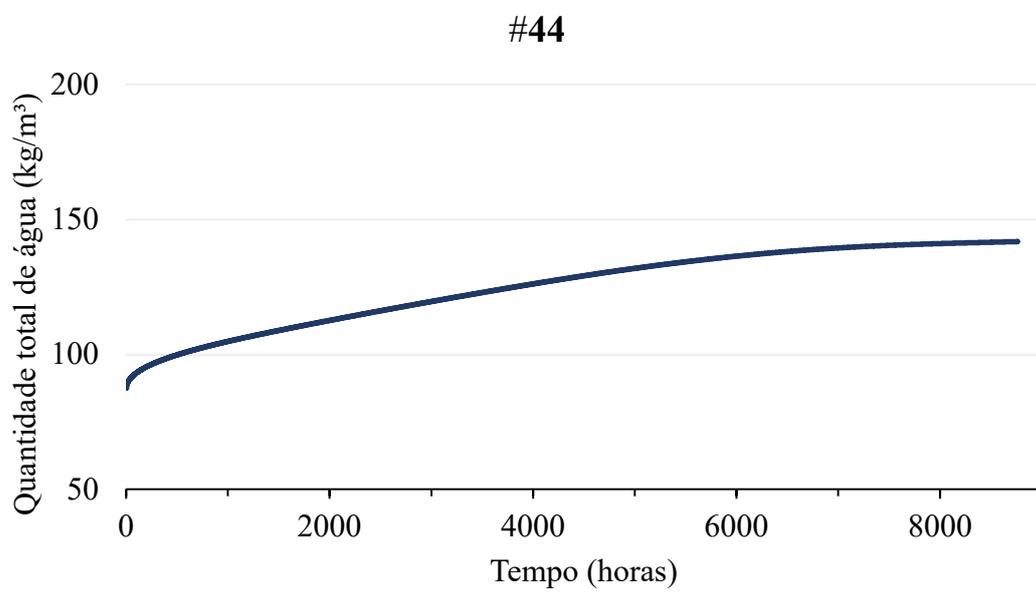
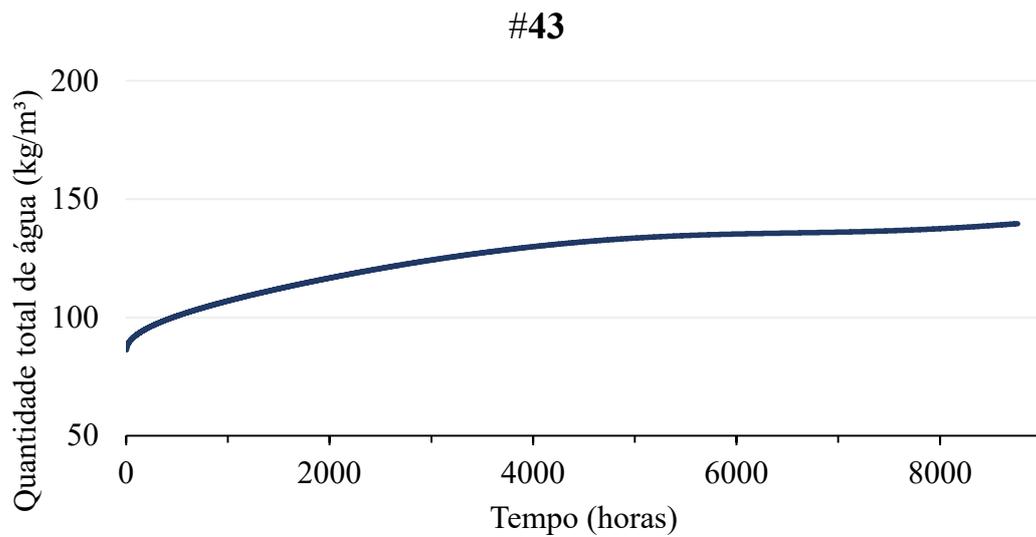
#33

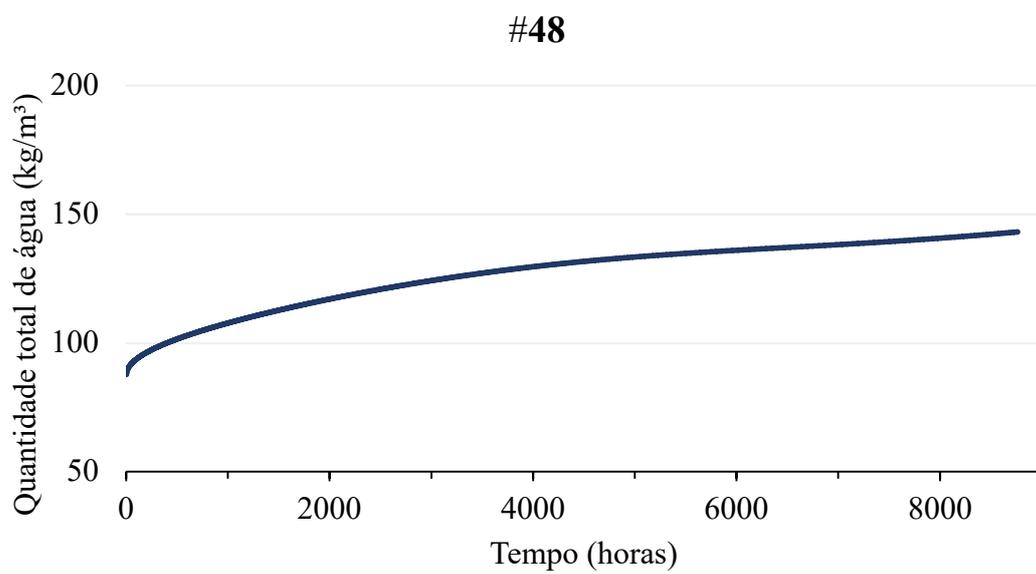
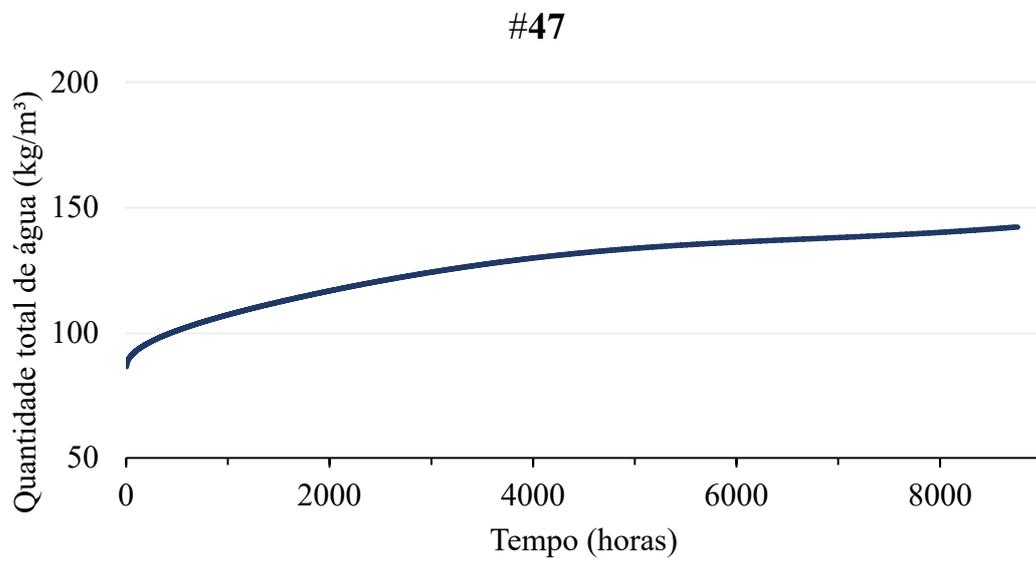
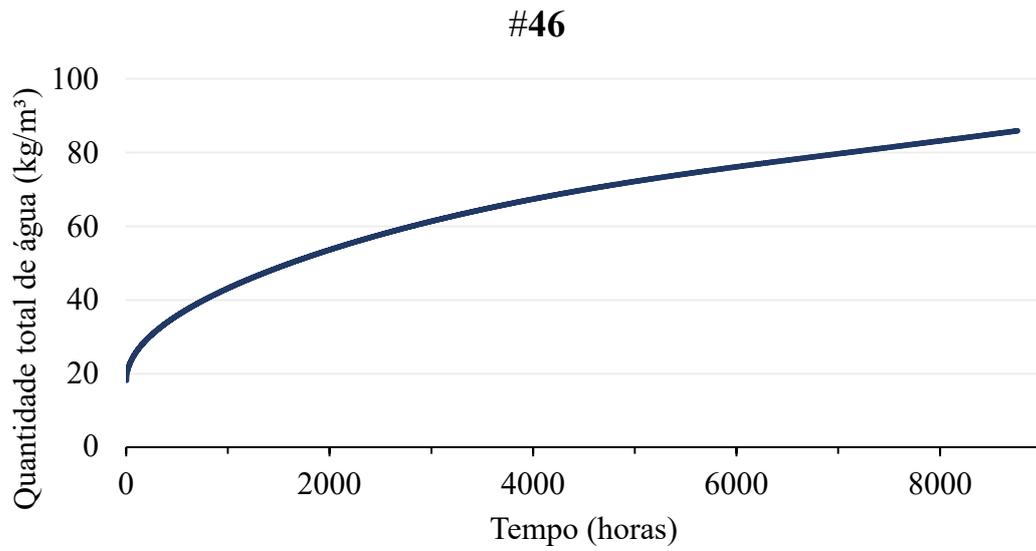












APÊNDICE D – FRENTE ÚMIDA DAS PAREDES

