

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LETÍCIA MENDES DE FREITAS

**Contribuição ao Entendimento do Fenômeno do  
Transporte de Umidade na Alvenaria De Blocos  
Cerâmicos Assentada com Argamassa Cimentícia**

RECIFE  
2022

LETÍCIA MENDES DE FREITAS

**Contribuição ao Entendimento do Fenômeno do  
Transporte de Umidade na Alvenaria De Blocos  
Cerâmicos Assentada com Argamassa Cimentícia**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia das Construções.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira  
Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio Azevedo

RECIFE  
2022

F866c Freitas, Letícia Mendes de.  
Contribuição ao entendimento do fenômeno do transporte de umidade na alvenaria de blocos de cerâmicas assentada com argamassa cimentícia / Letícia Mendes de Freitas, 2022.  
80 f. : il.

Orientador: Fernando Artur Nogueira.  
Coorientador: Antônio Azevedo  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2022.

1. Alvenaria. 2. Argamassa. 3. Construção civil.  
4. Blocos (Materiais de construção). 5. Solos - Umidade.  
I. Título.

CDU 624.012

Pollyanna Alves - CRB-4/1002

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Aluno (a): Letícia Mendes de Freitas**

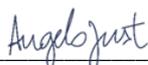
### **CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO FENÔMENO DO TRANSPORTE DE UMIDADE NA ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS ASSENTADA COM ARGAMASSA CIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) para obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Civil. A presente dissertação foi defendida e aprovada em 30 de setembro de 2022 pela banca examinadora e constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva



---

Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva



---

Prof. Dr. João Manuel do Paço Quesado Delgado

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação à minha filha, Lua, que nasceu poucas semanas antes da defesa deste trabalho foi minha fortaleza para finalizar este ciclo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Unicap e a todos os professores que por anos me incentivaram e me inspiraram na jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Fernando Artur, que há anos vem me orientando em diversos trabalhos. A ele agradeço a paciência, os conhecimentos passados, as cobranças e os conselhos.

Agradeço imensamente ao meu co-orientador, Antônio Azevedo, que me acompanhou de perto durante esses 3 anos, me incentivando e me apoiando da melhor forma, com suas palavras de conforto e sabedoria. Obrigada por acreditar em mim quando nem eu mesma acreditei.

Por fim, agradeço aos profissionais de saúde que cuidaram de mim e tornaram possível eu defender minha dissertação.

“É justo que muito custe o que muito vale”

Santa Tereza D'Ávila

## RESUMO

Comentado [1]: Melhorar o resumo. ficou generico, colocar conclusoes

No Brasil as edificações utilizam tijolos cerâmicos e argamassa de cimento Portland como materiais constituintes das paredes das construções, que atuam como revestimentos e elementos delimitadores de áreas internas. Esses materiais são porosos e altamente suscetíveis à degradação devido à presença de umidade. A água penetra nas estruturas por meios dos poros e compromete a vida útil das edificações se não identificada e tratada precocemente. A região existente entre uma camada e outra de uma parede é chamada de interface, e devido à presença dessa região, o transporte de umidade em elementos multicamadas divergem daqueles encontrados em elementos monolíticos. A mudança de comportamento do transporte de umidade é proporcional à mudança da natureza do contato e das propriedades hídricas da interface, e é chamada de Resistência da Interface. A pesquisa discute o comportamento do transporte de umidade em corpos de prova compostos por tijolo cerâmico e argamassa cimentícia, com diferentes configurações de contato, traços de argamassa e dimensões de base. Buscou-se entender como estes fatores influenciam o fluxo de umidade cumulativo, o teor de umidade dos materiais porosos e a resistência hídrica da interface. Um extenso programa experimental foi desenvolvido com ensaios em 180 corpos de prova. Três traços de argamassa, em massa, utilizando cimento CP V, cal hidratada, areia lavada e água destilada foram confeccionados: 1:2:9, 1:1:6 e 1:0,5:4. Os corpos de prova tinham base quadrada com lados medindo 5 cm, 7 cm e 10 cm. A pesquisa investigou o contato hidráulico e perfeito. Para cada configuração de contato foram confeccionados 90 corpos de prova, sendo 30 para cada traço de argamassa. Desempenhos diferentes foram observados para os corpos de prova de diferentes traços, onde alguns absorveram menos água que outros. Quando comparados entre as diferentes áreas das bases dos corpos de prova para cada traço, em todos os casos a absorção (teor de umidade) de água aumenta quando a área é aumentada. O cálculo da resistência hídrica foi realizado por duas metodologias diferentes, havendo importante diferença entre elas no resultado final, ainda que estivessem na mesma ordem de grandeza.

Palavras-chave: Transporte de umidade, Bloco cerâmico, Alvenaria.

## ABSTRACT

In Brazil, buildings use ceramic bricks and Portland cement mortar as constituent materials for the walls of buildings, which act as coatings and delimiting elements for internal areas. These materials are porous and highly susceptible to degradation due to the presence of moisture. Water penetrates structures through pores and compromises the useful life of buildings if not identified and treated early. The region between one layer and another of a wall is called the interface, and due to the presence of this region, the moisture transport in multilayer elements differs from those found in monolithic elements. The change in moisture transport behavior is proportional to the change in the nature of the contact and the water properties of the interface, and is called the Interface Resistance. The research discusses the behavior of moisture transport in specimens composed of ceramic brick and cementitious mortar, with different contact configurations, mortar traces and base dimensions. We sought to understand how these factors influence the cumulative moisture flow, the moisture content of porous materials and the water resistance of the interface. An extensive experimental program was developed with tests on 180 specimens. Three mixes of mortar, in mass, using CP V cement, hydrated lime, washed sand and distilled water were prepared: 1:2:9, 1:1:6 and 1:0.5:4. The specimens had a square base with sides measuring 5 cm, 7 cm and 10 cm. The research investigated hydraulic and perfect contact. For each contact configuration, 90 specimens were made, 30 for each mortar mix. Different performances were observed for specimens of different traits, where some absorbed less water than others. When comparing the different areas of the bases of the specimens for each mix, in all cases the absorption (moisture content) of water increases when the area is increased. The calculation of the water resistance was carried out by two different methodologies, with an important difference between them in the final result, even though they were in the same order of magnitude.

Keywords: Moisture transport, Ceramic block, Mansory.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parede de alvenaria em contato com água externa	18
Figura 2 - Relação entre os custos da qualidade	19
Figura 3 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma cerâmica sintetizada contendo poros abertos e fechados	25
Figura 4 - Tipos de configurações de contato: contato hidráulico (esquerda), contato perfeito (centro) e espaço de ar (direita)	30
Figura 5 - Perfil de absorção de umidade e mudança de direção dos gráficos.	33
Figura 6 - Representação dos corpos de prova	36
Figura 7 - Corpos de prova confeccionados	38
Figura 8 - Corpos de prova impermeabilizados	38
Figura 9 - Recipiente para ensaio	41
Figura 10 - Tijolos desprendidos da camada de argamassa	48
Figura 11 – Comparativo entre os valores das resistências hídricas.	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de absorção capilar das amostras de tijolo em função da raiz quadrada do tempo	49
Gráfico 2 - Curva de absorção capilar das amostras do traço 1 em função da raiz quadrada do tempo	50
Gráfico 3 - Curva de absorção capilar das amostras do traço 2 em função da raiz quadrada do tempo	51
Gráfico 4 - Curva de absorção capilar das amostras do traço 3 em função da raiz quadrada do tempo	52
Gráfico 5 – Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 5 cm x 5 cm base	53
Gráfico 6 - Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 7 cm x 7 cm base	54
Gráfico 7 - Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 10 cm x 10 cm base	54
Gráfico 8 - Todas as configurações	55
Gráfico 9 - Comparação entre as áreas do traço 1	56
Gráfico 10 - Comparação entre as áreas do traço 2	56
Gráfico 11 - Comparação entre as áreas do traço 3	57
Gráfico 12 - Teor de umidade entre as amostras moldados com o traço 1	58
Gráfico 13 - Teor de umidade entre as amostras moldadas com o traço 2	58
Gráfico 14 - Teor de umidade entre as amostras moldadas com o traço 3	59
Gráfico 15 - Teor de umidade entre CP's de 5 cm x 5 cm	60
Gráfico 16 - Teor de umidade entre CP's de 7 cm x 7 cm	60
Gráfico 17 - Teor de umidade entre CP's de 10 cm x 10 cm	61
Gráfico 18 - Comparação entre os traços nas dimensões 5 cm x 5 cm	62
Gráfico 19- Comparação entre os traços nas dimensões 7 cm x 7 cm	62
Gráfico 20- Comparação entre os traços nas dimensões 10 cm x 10 cm	63
Gráfico 21 - Todas as configurações	63
Gráfico 22 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas moldados com o traço 1	64
Gráfico 23 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas	

moldados com o traço 2	65
Gráfico 24 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas moldados com o traço 3	65
Gráfico 25 - Teor de umidade entre os corpos de prova moldados com o traço 1	66
Gráfico 26 - Teor de umidade entre os corpos de prova moldados com o traço 2	66
Gráfico 27 - Teor de umidade entre os corpos de prova moldados com o traço 3	67
Gráfico 28 - Teor de umidade entre CP's de 5 cm x 5 cm	68
Gráfico 29 - Teor de umidade entre CP's de 7 cm x 7 cm	68
Gráfico 30 - Teor de umidade entre CP's de 10 cm x 10 cm	69
Gráfico 31 - Fluxo cumulativo ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de todas as configurações para o contato hidráulico	70
Gráfico 32 - Teor de umidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) de todas as configurações para o contato hidráulico	70
Gráfico 33 - Teor de umidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) de todas as configurações para o contato perfeito	71
Gráfico 34 - Fluxo cumulativo ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de todas as configurações para o contato perfeito	72

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

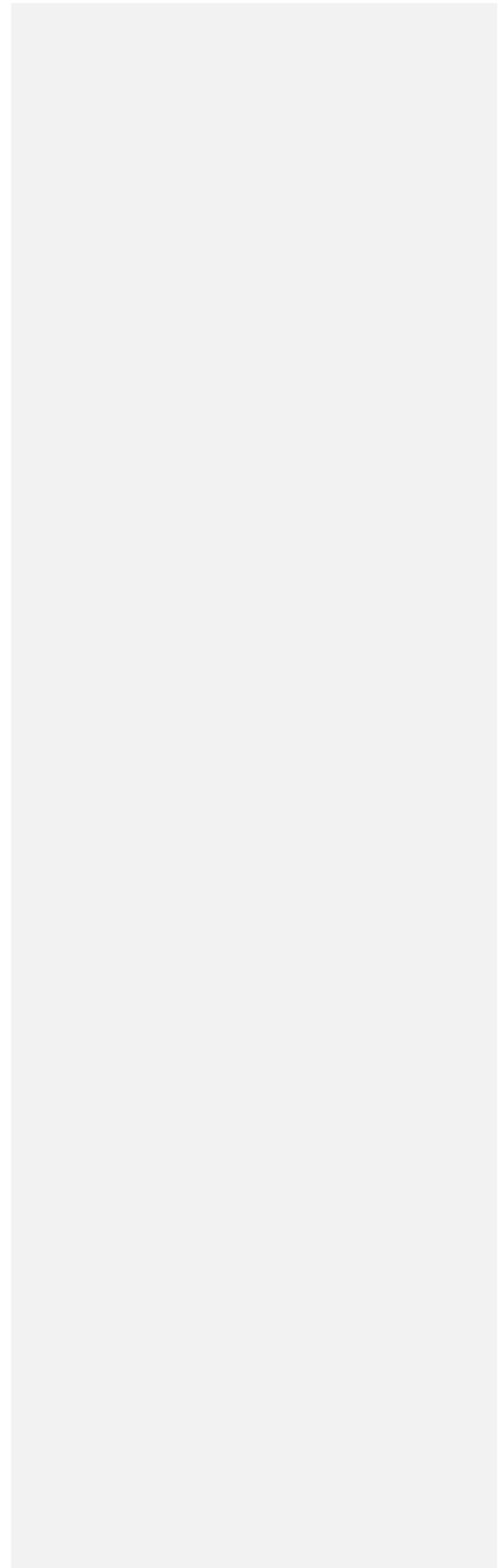
Tabela 1 - Configuração dos corpos de prova	36
Tabela 2 - Proporções dos traços das argamassas utilizadas	44
Tabela 3 – Saturação média dos tijolos	49
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas dos tijolos	49
Tabela 5 – Saturação média das amostras do traço 1	50
Tabela 6 – Saturação média das amostras do traço 2	51
Tabela 7 – Saturação média das amostras do traço 3	52
Tabela 8 - Propriedades das argamassas ensaiadas	53
Tabela 9 – Resistência hídrica para as nove configuração dos corpos de prova em relação às dimensões das bases e dos traços, e também do tipo de contato da interface	73
Quadro 1 - Tipos e classificação dos poros de materiais cerâmicos	26



## SUMÁRIO

<b>1</b>	17
1.1	17
1.2	20
1.3	20
1.4	21
1.5	21
1.6	21
1.7	22
<b>2</b>	23
2.1	23
<b>2.1.1</b>	23
<b>2.1.2</b>	25
<b>2.1.3</b>	27
2.2	28
<b>2.2.1</b>	30
<b>2.2.2</b>	31
2.2.2.1.	31
<b>2.2.3</b>	32
2.2.3.1.	32
<b>3</b>	35
3.1	37
<b>3.1.1</b>	37
<b>3.1.2</b>	37
<b>3.1.3</b>	37
<b>3.1.4</b>	38
3.2	39
<b>3.2.1</b>	42
3.3	43
<b>3.3.1</b>	43
3.3.1.1.	43
3.3.1.2.	43
3.3.1.3.	43
<b>3.3.2</b>	44

3.3.2.1.	45
3.3.2.2.	45
3.3.2.3.	45
3.4	45
<b>4</b>	47
4.1	48
<b>4.1.1</b>	48
4.1.1.1.	48
<b>4.1.2</b>	49
4.1.2.1.	50
4.2	53
4.3	61
4.4	69
4.5	72
<b>5</b>	75



## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil é comum que as edificações utilizem tijolos cerâmicos e argamassa de cimento Portland como os principais materiais constituintes das paredes das construções, as quais atuam como revestimentos e também como elementos delimitadores de áreas internas.

Esses materiais são porosos, e, por isso, altamente suscetíveis à degradação decorrente da umidade. A água, sendo uma das maiores responsáveis por patologias em construções, penetra nas estruturas por meios dos poros, e sozinha ou em associação com outros elementos ou fenômenos, pode comprometer a vida útil de edificações se não identificada e evitada precocemente.

### 1.1 IMPORTÂNCIA

O estudo da transferência de umidade no interior de materiais e elementos de construção civil é de fundamental importância para a caracterização do seu comportamento e entendimento de suas influências na durabilidade, estanqueidade, desempenho térmico e estético das edificações em geral (FREITAS, 1992).

A criação de uma base de dados sobre os mecanismos do transporte de umidade em materiais de construção é indispensável para a adequada simulação numérica deste fenômeno. Investigações prévias trataram uma parede de alvenaria como um elemento único em simulações numéricas de transporte de umidade e calor, porém a existência de uma resistência da interface, decorrente do contacto entre variados materiais de construção, revela que esta estratégia de simulação pode não ser a mais eficiente (FREITAS, 1992).

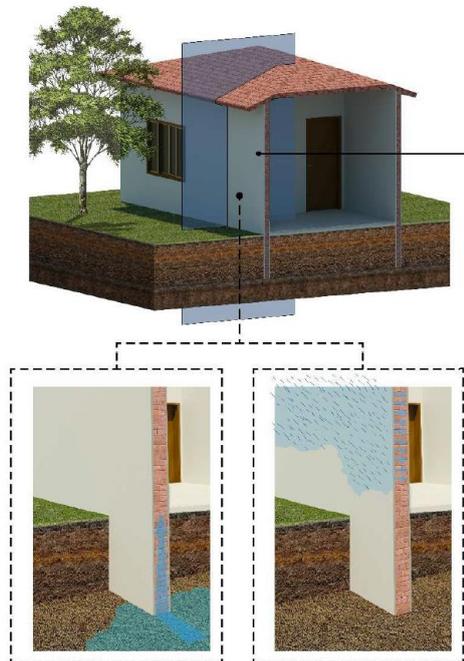
O estudo desenvolvido na pesquisa tem importância na medida em que investiga o desempenho em serviço de um importante elemento construtivo que está presente na totalidade das edificações – a parede de alvenaria de blocos cerâmicos assentados com argamassa cimentícia. Este tema está em consonância com as demandas das normas brasileiras de desempenho, notadamente a NBR 15575/13: Edificações habitacionais — Desempenho. O foco desta norma técnica, segundo a própria NBR 15575 (ABNT, 2013), “está nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos”.

As motivações da pesquisa realizada se inserem nas demandas normativas de se dispor de edificações que, para além da segurança estrutural nos estados limites últimos, ofereçam igualmente adequadas condições de utilização e contribuam para a qualidade de vida de seus usuários, tendo como base os limites sensoriais padronizados para condições climáticas, sonoras e visuais.

**Comentado [2]:** apresentar fotos do problema na pratica

Paredes de alvenaria são expostas diariamente a chuvas incidentes, condensação, umidade ascendente. Este processo de molhagem e secagem da alvenaria pode resultar em degradação, tais como expansão volumétrica, diminuição das resistências mecânicas, abrasão e impacto, transferência térmica, formação de mofo, presença de fungos e bactérias.

Figura 1 - Parede de alvenaria em contato com água externa

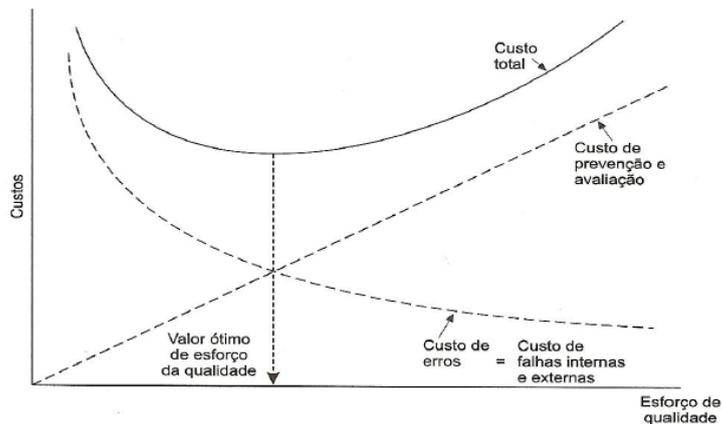


Fonte: (AZEVEDO, 2019)

A prevenção e correção dos danos causados pelo contacto da parede com a água exigem entendimento profundo sobre o comportamento hídrico do transporte de umidade (JANSSEN; DERLUYN; CARMELIET, 2012). Se considerarmos os fatores econômicos deste fenômeno, o seu estudo assume mais relevância, uma vez que os custos de correções das eventuais patologias associadas ao contacto da alvenaria com a água aumentam exponencialmente quando comparados aos custos iniciais de prevenção.

Segundo Calixto e Oliveira (2004 apud ALVES; TRINDADE, 2012), “os custos da qualidade se inter-relacionam de forma inversamente proporcional”. Ou seja, à medida que aumentam os custos de prevenção e de avaliação, os custos de falhas internas e externas tendem a diminuir”, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Relação entre os custos da qualidade



Fonte: (CALIXTO; OLIVEIRA, 2004 apud ALVES; TRINDADE, 2012)

Para além deste fato, há, igualmente, o reparo de patologias aparentemente inofensivas. Turner (2002) reportou que um montante significativo de investimento financeiro é consumido nos EUA para a realização de reparos de mofo/fungos em edificações de variados usos.

Para se avaliar apropriadamente o desempenho de paredes de alvenaria submetidas ao transporte de umidade em seu interior, é necessário o entendimento dos fenômenos da interface (AZEVEDO, 2019). Este entendimento pode levar a diretrizes de projeto mais assertivas.

Embora as paredes de alvenaria sejam compostas por múltiplas camadas de tijolos e argamassa, na maioria das simulações numéricas de transferência de calor, de ar, e de umidade, a composição real da alvenaria é frequentemente simplificada adotando-se uma estratégia de considerar uma camada de tijolo homogênea. Esta estratégia de modelagem se justifica apenas quando se tem como restrições o custo e o tempo computacional associado e para obtenção de informações globais qualitativas sobre o fenômeno investigado. Por outro lado, quando, por exemplo, se deseja investigar em mais detalhes a durabilidade da parede, o nível de complexidade da modelagem não pode prescindir de uma modelagem mais detalhada que busque se aproximar o mais perto possível das condições reais de execução (VERECKEN; ROELS, 2013).

A heterogeneidade de uma parede de alvenaria torna a análise da transferência de umidade mais complexa, obrigando ao conhecimento não apenas das suas características

individuais, mas também das condições de continuidade da interface que separa os diferentes materiais (REGO, 2014).

Há décadas que o estudo do cálculo da resistência gerada na interface está evoluindo, como consequência natural do processo, diferentes abordagens foram e têm sido levadas em consideração para se buscar um modelo de abstração do fenômeno físico-químico associados ao tema de estudo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Busca-se obter informações sobre o comportamento da transferência de umidade e o seu armazenamento, ao longo da vida útil do sistema formado pelo tijolo cerâmico e argamassa de cimento Portland. Adicionalmente buscam-se investigar estratégias para o atendimento das normas de desempenho que incorporam demandas mais rigorosas quanto ao devido funcionamento em serviço dos elementos construtivos, assim como seu desempenho estético e de eficiência energética.

Dentro deste contexto, a análise do teor de umidade e como ela se movimento no interior de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos se mostra um importante procedimento para se entender o efeito e a influência dos principais fatores envolvidos, quais sejam: a absorção e a secagem desses materiais, através da realização de ensaios com corpos de prova padronizados.

Na medida em que contribui para o entendimento do fenômeno da Resistência da Interface no trânsito de umidade em materiais porosos, a pesquisa realizada avança no conhecimento e caracterização de insumos importantes para a indústria da construção civil – cerâmica e argamassa de cimento. A formação de um banco de dados e a correlação adequada aos métodos de análise trazem embasamento para que se possa chegar a uma teoria mais concisa e próxima do fenômeno real.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A elaboração de materiais mais duráveis é fundamental para o desenvolvimento tecnológico, e, no caso dos revestimentos de habitações, é exigência normativa o seu adequado desempenho.

O transporte de umidade em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos se constitui num parâmetro relevante para a produção de materiais de construção civil devido às funções de vedação e habitação desses componentes.

Desta forma, a pesquisa pretende contribuir para o entendimento do comportamento da interface no transporte de umidade em materiais porosos da indústria da construção civil, e,

para isso, busca-se responder às seguintes questões:

- Como os diferentes traços de argamassa formada por cimento Portland, cal, areia e água destilada, em diferentes proporções, influenciam no fluxo de umidade cumulativo e no teor de umidade dos materiais porosos?
- As diferentes áreas das bases podem influenciar de quais formas no fluxo cumulativo e no teor de umidade dos corpos de prova?
- Como os diferentes tipos de contato entre as interfaces dos materiais compósitos podem influenciar na Resistência da Interface?
- É possível visualizar a influência da Resistência da Interface correlacionando os diferentes resultados dos fatores analisados, entre eles os traços, as áreas das bases, e os tipos de contato das interfaces?

#### 1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é a análise experimental do comportamento do transporte de umidade em corpos de prova compostos por tijolo cerâmico e argamassa cimentícia, com diferentes configurações de contato, traços de argamassa e dimensões de base. A finalidade é compreender como estes fatores influenciam na absorção e fluxo de umidade destes materiais.

#### 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, a pesquisa se propõe a:

- Confeccionar corpos de prova, realizar ensaios de transporte de umidade e promover uma discussão dos resultados com uma análise comparativa dos resultados obtidos dos ensaios;
- Formular uma compreensão detalhada dos variados fatores que interferem no transporte da umidade, notadamente o traço, as dimensões das seções transversais estudadas e tipo de contato;
- Estimar valores da resistência da interface para as diferentes configurações das amostras estudadas.

#### 1.6 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

As conclusões do trabalho se limitam às dimensões dos materiais estudados, aos tipos de contatos entre si, às condições analisadas, e aos traços de argamassa adotados em cada etapa

e com os devidos critérios utilizados ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

### 1.7 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 5 (cinco) capítulos.

O Capítulo 1 contempla a introdução, a justificativa e a importância da pesquisa, bem como a sua problemática, o objetivo geral e os objetivos específicos e, complementarmente, a delimitação da pesquisa realizada.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica com a contextualização da ação da umidade em materiais porosos, bem como os mecanismos de degradação e patologias decorrentes dessa infiltração. Também são apresentados neste capítulo os aspectos associados ao transporte de umidade em diferentes fases, bem como os tipos de interfaces que são frequentes entre os materiais de construção investigados. Complementarmente, são apresentadas as bases conceituais dos métodos de ensaios para identificação das resistências das interfaces, assim como a metodologia para se estimar a resistência hídrica da interface.

O Capítulo 3 apresenta todo o programa experimental desenvolvido, tais como a caracterização dos materiais utilizados, tijolos, cimento, areia e água. Dados sobre a composição dos traços, bem como a etapa de confecção dos corpos de prova, quantidades e amostras por traços, dimensões de base, e tipos de contatos, são detalhados neste capítulo. O capítulo detalha, ainda, a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos ensaios de absorção capilar e os processos para a estimativa da resistência hídrica das interfaces.

O Capítulo 4 contempla os resultados dos ensaios, a análise e discussão detalhadas destes resultados. Os dados são expostos de maneira gráfica para uma melhor visualização e são acompanhados de uma análise e discussão.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes à análise dos resultados obtidos e as recomendações para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos dos distintos transportes de umidade em diferentes fases, assim como os tipos de interfaces entre os materiais e os métodos de ensaios para identificação das resistências hídrica das interfaces. São igualmente apresentadas as estratégias metodológicas para a estimativa de valores da resistência hídrica das interfaces.

### 2.1 AÇÃO DA UMIDADE EM MATERIAIS POROSOS

A maior parte dos materiais de construção utilizados em edificação são porosos e, desta forma, são naturalmente suscetíveis a sofrer um processo de degradação devido à presença constante da umidade. A água, sendo um dos fatores que respondem pela maior parte das patologias em construções, penetra nas estruturas por meios dos poros. Sozinha, ou em associação com outros elementos ou fenômenos, pode comprometer a vida útil de edificações se não identificada e tratada precocemente.

#### 2.1.1 Mecanismos de degradação e patologias associadas à umidade

A presença de umidade pode provocar diversas manifestações patológicas em edificações e as mais frequentes são as seguintes (STRAUBE, 2002):

- Corrosão do aço em estruturas metálicas, armação em estruturas de alvenaria estrutural concreto armado e concreto protendido;
- Deterioração química e dissolução de materiais como revestimentos de gessos, forros, produtos de madeira e processos químicos como carbonatação e reação álcalis-agregado no concreto estrutural;
- Eflorescência e lixiviação;
- Deterioração por ciclos de congelamento e descongelamento em elementos concreto ou de alvenaria;
- Descoloração e manchas em revestimentos e acabamentos;
- Mudanças de volume (inchaço, empenamento e encolhimento) que podem causar fissuras, destacamentos de placas, falhas estruturais, problemas estéticos, entre outros e
- Crescimento de formas biológicas como mofo, plantas e ácaros.

Além das manifestações patológicas acima listadas, outro fenômeno recorrente em edificações é o desconforto térmico causado pela umidade que, em algumas situações, podem ser agentes causadores de doenças nos usuários, sendo mais frequentes as intercorrências

médicas de origem respiratórias.

Straube (2002) explica que, para um problema relacionado a umidade ocorrer, são necessárias pelo menos quatro condições a serem satisfeitas:

- 1 Disponibilidade de fonte de umidade;
- 2 Existência de uma rota para a movimentação da umidade;
- 3 Existência de uma força que impulsiona a movimentação da umidade e
- 4 A susceptibilidade à deterioração pela umidade dos materiais de construção utilizado.

Dessa forma, para se evitar que manifestações patológicas por umidade se manifestem, é necessário se mitigar ao menos uma das quatro condições necessárias para a degradação, acima listadas. Na teoria esta mitigação pode parecer uma tarefa de simples execução, mas em situações reais é praticamente impossível excluir todas as condições acima.

Na maioria das vezes essas condições ocorrem de maneira natural em variados materiais de construção e dependem da localização da edificação, do clima, entre outros fatores. Um exemplo das dificuldades de se mitigar ou eliminar as condições acima listada é a presença de poros nos tijolos ou no concreto, a presença de álcalis no cimento ou a presença de umidade por causa da chuva.

Não obstante, mesmo sendo quase impossível eliminar as condições listadas, aquela que tem um papel mais relevante é a fonte de água e, desta forma, deve merecer uma maior atenção do engenheiro. Para Straube (2002), existem quatro fontes primárias de umidade nas edificações, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- Água líquida, proveniente de precipitação ou vazamento de tubos de instalações hidrossanitárias;
- Vapor de água, vindo do exterior ou de processos que ocorrem no interior do edifício;
- Água líquida e em vapor vindas do solo abaixo da edificação;
- Umidade presente nos próprios materiais de construção.

Por isso, é imprescindível se dispôs de uma compreensão precisa sobre o comportamento dos frente ao seu contacto com a água. Isto é necessário para se que possa prever e antecipar problemas e, assim, reduzir os riscos e entender as suas consequências na durabilidade dos materiais. De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), a vida útil de projeto

mínima de sistemas de vedação internos e externos é de, respectivamente, 20 e 40 anos. Para que esse requisito seja atendido em paredes de alvenaria, são necessários o entendimento, a predição, e a redução de riscos e manutenções desnecessárias.

### 2.1.2 Caracterização do meio poroso

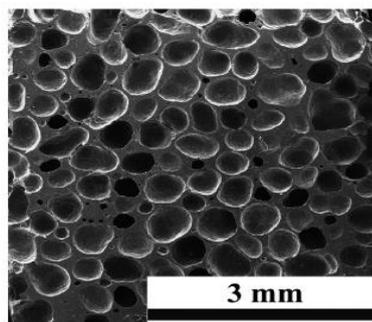
A fixação e o transporte de umidade dependem da matriz porosa dos materiais. A matriz porosa de um material consiste nos espaços vazios dentro dos sólidos cristalinos que podem ter diferentes dimensões, tamanhos, formatos e meios de comunicação entre si. A porosidade de um material pode ser definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total aparente - Eq. (1) - (REGO, 2014).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \quad (1)$$

A estrutura porosa dos tijolos e da argamassa à base de cimento provém dos seus processos de fabricação e, por isso são, até certo ponto, imprevisíveis. Por outro lado, o controle de qualidade desses materiais previne que a qualidade dos materiais e conseqüentemente suas matrizes porosas sejam comprometidas.

Para que a umidade se propague através de um material é necessário que os poros estejam conectados entre si, não obstante possa haver a possibilidade de existir poros isolados, sem qualquer interconexão. Define-se, portanto, os poros com conexões entre si como porosidade aberta e os poros isolados como porosidade fechada (FREITAS; GUIMARÃES, 2014). A Figura 3 representa os dois tipos de porosidade.

Figura 3 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma cerâmica sintetizada contendo poros abertos e fechados



Fonte: (VAKIFAHMETOGLU; SEMERCI; SORARU, 2020)

A porosidade é aberta quando há um volume de poros acessíveis a uma determinada molécula de um fluido e é dita fechada quando não há um volume mínimo para o trânsito de um fluido.

De acordo com o raio dos poros constituintes de um determinado material o mesmo pode ser classificado como microporoso, mesoporoso ou macroporoso. Uma outra distinção dos materiais está associada às comunicações dos seus poros que igualmente podem ser considerados como abertos ou fechados. Esta definição é estabelecida pela instituição internacional intitulada *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*. A IUPAC caracteriza os sólidos cristalinos a partir dos raios internos dos poros, assim como pelo volume de poros comunicáveis a um fluido, conforme pode ser indicado no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 - Tipos e classificação dos poros de materiais cerâmicos (IUPCA)

<b>Tipos/classificações dos materiais porosos</b>	<b>Definição</b>
Microporosos	Possuem diâmetros de poros inferiores a 2 nm. São os menores poros e não têm influência no transporte de umidade porque a água que eles contêm não é livre. Devido ao seu tamanho muito pequeno, as tensões superficiais são tão altas que a água não pode se mover.
Mesoporosos	Possuem diâmetros de poros entre 2 nm e 50 nm. São poros de tamanho intermediário e também são chamados de “poros capilares” ou simplesmente “capilares”. É através deles que a água líquida migra sob a influência das forças capilares. O transporte de vapor também ocorre nesses poros.
Macroporosos	Possuem diâmetros de poros superiores a 50 nm. São os maiores poros e são muito relevantes para o transporte de vapor. Em contraste, o transporte capilar líquido normalmente não é significativo nos macroporos porque as forças capilares são mais fracas.
Com porosidade aberta	Poros que têm um canal contínuo de comunicação com a superfície externa do corpo.
Com porosidade fechada	Poros que são totalmente isolados de seus vizinhos, fechados em si, e sem disponibilidade para um fluido externo.

Fonte: (GONÇALVES, 2007; IUPAC, 1994)

O surgimento de poros ocorre durante o processo de queima na fabricação de tijolos cerâmicos. A etapa inicial é a extração da argila, a qual em seguida é preparada para a moldagem

e posterior secagem a uma temperatura inferior à de queima. Isto é realizado para que a água que está no interior do tijolo cru, saia, sem o surgimento de fissuras por retração. Somente após este processo é que o tijolo é levado diretamente ao forno, a uma temperatura de aproximadamente 900 °C, para que seja realizada a queima definitiva (BAUER, 1994).

A porosidade pode ser maior dada à presença de materiais que desaparecem com a alta temperatura de queima do tijolo, tais como matérias orgânicas como serragem de madeira e turfa. Após a queima, o lugar que era ocupado por esse material orgânico fica vazio, tornando o material mais poroso (PETRUCCI, 1998 apud HENTGES, 2014).

O controle de qualidade da fabricação e entrega dos tijolos cerâmicos são definidos segundo as normas técnicas NBR 7171/92: Bloco cerâmico para alvenaria (ABNT, 1992a), e, a NBR 8042: Bloco cerâmico para alvenaria: formas e dimensões (ABNT, 1992b).

### **2.1.3 Transporte de Umidade em Fase Líquida e de Vapor**

Pesquisas sobre o transporte de líquidos em compósitos multicamadas podem ser encontrados e os valores estudados, em sua grande maioria, são determinados com base nos perfis de umidade medidos durante o experimento de embebição e são dependentes, por exemplo, do tipo de argamassa utilizada, do fator a/c (fator água/cimento), do uso de aditivos, assim como do tipo de tijolo, das condições de cura, e da espessura da junta de argamassa. Estes fatores podem ter impacto potencial na resistência da interface e na modificação das propriedades do material poroso (AZEVEDO, 2019).

Os materiais de construção podem apresentar vários graus de higroscopicidade (FREITAS, 1992). Tomando este fator em consideração, os materiais podem ser classificados como:

- Higroscópicos – quando a quantidade de água fixada por absorção é relativamente importante. O concreto simples e o gesso são exemplos de materiais higroscópicos;
- Não higroscópicos – quando a sua massa é praticamente constante qualquer que seja a umidade relativa do ambiente onde se encontrem. A argila é um exemplo de um material não higroscópico.

A água pode penetrar em um material poroso no estado líquido ou em vapor. No estado líquido, dois mecanismos podem usualmente ocorrer: a capilaridade e/ou a infiltração. Enquanto a capilaridade é resultado da atração da água e da tensão superficial do líquido a

infiltração exige uma pressão hidrostática e depende da permeabilidade do material (CHAROLA, 2000; FREITAS; ABRANTES; CRAUSSET, 1996).

A maior parte dos materiais de construção porosos, como o concreto, a argamassa ou tijolo, também são materiais higroscópicos que são capazes atrair vapor de água do ambiente. No caso de materiais de construção, a higroscopicidade diz respeito à adsorção de água do ar. Em específico para esses materiais, a adsorção é o processo pelo qual as moléculas de água se ligam com as superfícies dos poros e, assim, formam filmes finos compostos por uma ou mais camadas de moléculas. A adsorção surge de forças intermoleculares fracas (forças de Van der Waals) que atuam entre a superfície do material e a água (GONÇALVES, 2007).

É importante compreender como a água se move após sua penetração num material poroso. Se a água se movimentar em estado líquido, ela terá a capacidade de transportar sais. Caso a água se movimente em forma de vapor, ela poderá ser retida por higroscopicidade. No primeiro caso o mecanismo depende da capilaridade e, no segundo, depende da difusão (CHAROLA, 2000).

Em materiais de construção porosos, a água no estado líquido migra principalmente por capilaridade. O mecanismo de capilaridade ocorre quando as forças atrativas entre o líquido e o sólido são mais forte do que as forças de coesão no líquido. As propriedades de transporte capilar dos materiais de construção porosos são avaliadas na escala macro. Parâmetros experimentais apropriados são usados para expressar a tendência do material, sob condições específicas, absorver uma certa quantidade de água ou transportar essa água até uma certa altura. Em materiais higroscópicos porosos, o transporte de líquidos pode ocorrer mesmo quando não há contato com a água líquida externa, pois ocorre um processo de difusão (líquida) pelo qual a água migra de um poro mais espesso para camadas de água adsorvida mais finas presentes em poros menores (GONÇALVES, 2007).

O transporte de vapor de água em materiais de construção porosos pode ser descrito como um processo de difusão, portanto, causado por um gradiente de concentração de vapor de água. Os processos difusivos devem-se essencialmente à existência de gradientes de temperatura (difusão térmica ou efeito Soret) e de pressão de vapor de água (difusão gasosa propriamente dita). A difusão térmica, que também ocorre na fase líquida, representa apenas cerca de 0,05% do valor total de transferência de humidade nos edifícios, podendo por isso ser desprezada (REGO, 2014).

## 2.2 RESISTÊNCIA HÍDRICA DA INTERFACE

As paredes de edifícios geralmente são constituídas de múltiplas camadas de materiais

de construção diferentes. A região existente entre uma camada e outra de uma parede é chamada de interface, e devido à presença dessa interface de contato, o transporte de umidade em elementos de várias camadas diverge daquele encontrado em elementos de uma só camada (VERECKEN; ROELS, 2013).

Apesar de paredes de alvenaria serem compostas por tijolo e argamassa, na maioria das simulações de calor, ar, e umidade, a real composição das paredes de alvenaria é simplificada a uma camada homogênea de tijolos (VERECKEN; ROELS, 2013). Contudo, diversos estudos provam que a natureza da interface influencia o transporte de umidade em paredes de alvenaria.

Considerando que cada material possui diferentes matrizes porosas, quando entram em contato um com o outro, como em paredes de alvenaria, o transporte de umidade através deles não ocorre de forma constante. A existência de uma descontinuidade dos poros entre os materiais pode resultar em um decréscimo da taxa de transferência de umidade e/ou uma diminuição da absorção total de água. Esse atraso que ocorre quando a frente úmida atinge a interface dos materiais foi observado em diversos estudos e tem sido discutido ao longo dos anos.

No estudo da transferência de umidade em elementos de várias camadas, a interface pode ter influência significativa nas manifestações patológicas usualmente associadas a este fenômeno, pois o comportamento da umidade em alvenaria é altamente determinado pela interação das características hídricas dos dois componentes, e também pela natureza do contato. Além disso, as condições de cura da argamassa também determinam as características do transporte (BROCKEN; ADAN; PEL, 1997; DEPRAETERE; CARMELIET; HENS, 2000; DERLUYN; JANSSEN; CARMELIET, 2011).

A mudança de comportamento do transporte de umidade proporcional à mudança da natureza do contato e das propriedades hídricas da interface levou à definição de uma nova propriedade/grandeza – a resistência hídrica da interface.

O conceito ‘resistência da interface’ (ou ‘resistência hídrica’) foi usado primariamente por Freitas (1992), definindo-o como a maior ou menor difusão de água, traduzida em fluxo máximo transmitido nos corpos de prova estudados, expresso em  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . O estudo identificou a resistência hídrica através da observação da falta de continuidade na interface entre materiais porosos.

O trabalho de Freitas (1992) abriu espaço para outras pesquisas acerca da influência da interface no transporte de umidade em paredes de alvenaria, onde são avaliados diferentes materiais, condições de cura, configurações dos materiais, e maneiras de identificar o

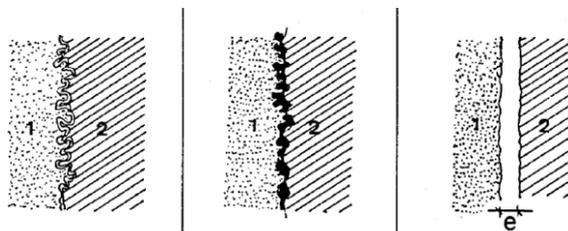
comportamento da umidade, além de outras metodologias de cálculo da resistência da interface.

### 2.2.1 Tipos de Interface Entre Materiais

Segundo Freitas (1992) existem três tipos de interface entre materiais porosos: a continuidade hidráulica, o contato perfeito e espaço de ar. Um esquema das configurações da interface pode ser visto na Figura 4.

- Continuidade hidráulica – ocorre quando há a interpenetração da estrutura porosa dos materiais, vista em situações reais de obra, quando a argamassa fresca é inserida entre camadas de tijolos, havendo a aderência física entre eles;
- Contato perfeito – ocorre quando há contato entre os materiais, mas sem a interpenetração da matriz porosa;
- Espaço de ar – ocorre quando os materiais não entram em contato físico, havendo apenas alguns milímetros de espaço de ar entre eles.

Figura 4 - Tipos de configurações de contato: contato hidráulico (esquerda), contato perfeito (centro) e espaço de ar (direita)



Fonte: (FREITAS, 1992)

A pesquisa de Freitas (1992) considerou exclusivamente a resistência da interface presentes nas configurações de ‘contato perfeito’ e ‘espaço de ar’, não considerando a existência da interpenetração da matriz porosa. Porém, pesquisas posteriores sugerem que comparado a uma amostra monolítica, todos os tipos de contato entre materiais interferem de alguma forma na transferência de umidade.

Em contraste, Depraetre *et al.* (2000) consideram a existência de quatro tipos de interface: o contato hidráulico perfeito, espaço de ar, contato natural e contato hidráulico real.

O contato hidráulico perfeito é caracterizado pela continuidade da pressão capilar e do fluxo de umidade através da interface. Se os dois materiais forem idênticos, o fluxo de umidade

não é influenciado pela interface. Para diferentes materiais porosos, uma influência é encontrada.

O contato natural é considerado quando ambos os materiais estão em perfeito contato físico, enquanto suas estruturas porosas não se encaixam. Contudo, um contato físico perfeito é difícil de atingir. Se comparado com a configuração de Freitas (1992), esse tipo de contato é equivalente ao contato perfeito.

O contato hidráulico real, ou somente contato hidráulico, é uma soma das configurações ‘contato hidráulico’ e ‘contato perfeito’, onde há interpenetração dos poros dos dois materiais e a presença da resistência hídrica. Este tipo de contato é formado quando a argamassa é curada entre as camadas de tijolos.

A pesquisa investigou duas variáveis do contato hidráulico real: o contato hidráulico real perfeito e imperfeito. Em outras palavras, o tijolo seco, garantindo total aderência física pelos poros, e o tijolo saturado, impedindo a aderência física pelos poros, respectivamente referidos na pesquisa como contato hidráulico e contato perfeito.

### **2.2.2 Identificação da Resistência Hídrica da Interface**

O que caracteriza a existência de uma resistência hídrica da interface é o atraso da ascensão da umidade no interior de um material poroso, que, como consequência, resulta em um decréscimo do teor total de água absorvida e/ou diminuição da taxa de ascensão de umidade, quando comparados a um material monolítico. Para identificar e quantificar a resistência hídrica entre as camadas de uma parede de alvenaria, existem algumas abordagens que podem ser utilizadas para caracterizar os materiais e permitir a identificação.

A seguir será exposto apenas um dos métodos mais utilizados para a identificação e quantificação da resistência hídrica da interface – o método gravimétrico. Demais métodos que também podem ser empregados para este fim - ressonância magnética nuclear, análises por raio-X e atenuação por raio gama, estão fora do escopo da presente pesquisa.

#### **2.2.2.1 Método gravimétrico**

O método gravimétrico, também conhecido como teste de embebição, é um método clássico para determinar o teor de umidade transiente (RIJNIERS *et al.*, 2005). Esse método consiste em calcular o teor de umidade a partir da diferença de massa entre corpos de prova secos e úmidos.

De acordo com a norma vigente para o experimento, a ISO 15148: *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption*

*coefficient by partial immersion* (ISO, 2002), o ensaio deve ser realizado utilizando corpos de prova prismáticos do material a ser estudado, sob condições de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica específicas. Além disso, a norma recomenda que o fluxo de água seja unidirecional. Para garantir o transporte vertical da água, as faces laterais das amostras devem ser impermeabilizadas deixando livre apenas a base que fica em contato com a lâmina de água, e, o topo, garantindo a diferença de potencial.

A amostra do material a ser analisada deve estar seca e com massa constante, sendo em seguida imersa em uma lâmina de água com 5 mm a 10 mm de altura, por um determinado período de tempo. A amostra deve ser pesada diversas vezes durante a absorção de água de modo a construir o gráfico do teor de umidade em função do tempo.

Apesar de ser direto e aparentemente preciso, o método gravimétrico tem a desvantagem de ser destrutivo. O corte de uma amostra após o ensaio, processo necessário para observar a frente de umidade, produz calor e conseqüentemente rompimento da distribuição de umidade (AZEVEDO, 2019).

### **2.2.3 Metodologia para calcular a Resistência Hídrica da Interface**

Apesar de existirem diversos estudos sobre a resistência hídrica da interface no transporte de umidade em materiais de construção, poucos são os que quantificam essa resistência em números. Na seção anterior foi citado o método gravimétrico que identifica a existência de uma resistência na interface entre dois materiais porosos, porém mesmo essa metodologia não se presta a estimar o valor da resistência explicitamente. Este cálculo ainda não existe de forma normatizada e variadas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de criar estratégias para estimar este valor, a partir de metodologias existentes.

A existência de uma resistência na interface, bem como o seu valor, podem ser obtidos de diferentes maneiras e dependem fortemente do caso estudado. Em paredes de alvenaria, por exemplo, o tipo da argamassa, de tijolo, das condições de cura úmida ou seca, da espessura da camada de argamassa, da distância da fonte de umidade, entre outros fatores, podem influenciar nas propriedades da interface, e, conseqüentemente em seu desempenho.

#### **2.2.3.1 Resistência da Interface para o método gravimétrico**

Sendo possível então a correlação do fenômeno da resistência da interface na absorção capilar, o cálculo da resistência hídrica é então feito a partir da medição do fluxo de umidade a partir do ponto mudança de inclinação da curva característica do ensaio de fluxo cumulativo (ou absorção capilar) (AZEVEDO, 2019).

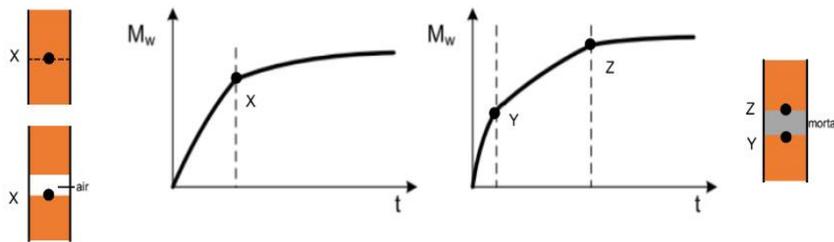
A resistência hídrica (RH) calculada pelo método gravimétrico é realizada a partir da seguinte equação:

$$RH = \frac{\Delta M_w}{\Delta t} \quad (2)$$

Mede-se a variação do tempo e também a absorção capilar, a partir do ponto de mudança de inclinação da curva característica do ensaio de absorção capilar.

Azevedo (2019) sugeriu uma nova forma de cálculo da resistência hídrica utilizando os gráficos gerados pelo método gravimétrico. A nova forma de cálculo consiste em obter a equação da curva gerada após a mudança de direção do gráfico e extrair sua derivada, gerando uma equação que depende do instante em que o gráfico muda de direção. Esta metodologia considera que os gráficos gerados pelo ensaio de absorção se comportam diferente de acordo com o tipo de contato entre o tijolo e a argamassa. O método considera que quando o tipo de contato é perfeito ou espaço de ar, o gráfico muda de direção apenas uma vez, enquanto que o contato hidráulico apresentaria duas mudanças de direção – isto ocorre porque há mais interfaces no contacto hidráulico. A Figura 5 a seguir exibe uma representação gráfica do que se discute.

Figura 5 - Perfil de absorção de umidade e mudança de direção dos gráficos.



Fonte: (AZEVEDO, 2019)

Nota-se que no contato hidráulico há duas mudanças de direção na curva, e por este motivo o trecho considerado para cálculo é aquele após o segundo ponto de inflexão. Além disso, há também a diferença matemática entre os cálculos. Nos contatos perfeito e espaço de ar, após a mudança de direção da curva, a melhor representação dos pontos obtidos foi em uma função linear, onde a derivada não depende do instante em que há a mudança de direção. Em contrapartida, no contato hidráulico a função que melhor representou os pontos do gráfico foi a função logarítmica, cuja derivada depende do instante em que o gráfico muda de direção

Azevedo (2019). As hipóteses formuladas por Azevedo (2019) foram as consideradas na pesquisa para a estimativa do valor da resistência hídrica nos espécimes ensaiados.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Comentado [3]: Índice de absorção inicial nos blocos

O trabalho experimental desenvolvido privilegiou o estudo do comportamento da transferência de umidade em espécimes compostos por tijolo e argamassa cimentícia, com diferentes configurações geométricas e traços de argamassa. O intuito foi entender a influência da área de contato com a água, do tipo da argamassa, e o tipo de contato entre os materiais na resistência hídrica da interface.

Os corpos de prova foram confeccionados com dois tipos de contato entre os tijolos e a argamassa - contato hidráulico e contato perfeito, com uma camada de argamassa fresca entre duas camadas de tijolos. Para garantir a existência do contato hidráulico, utilizou-se tijolos totalmente secos para maior interpenetração da argamassa em seus poros.

Em contrapartida, no contato perfeito optou-se por utilizar tijolos saturados com água destilada, de forma que os poros estivessem totalmente preenchidos e a argamassa fosse impedida de penetrar nos poros dos tijolos.

As argamassas utilizadas no assentamento dos blocos foram definidas a partir de misturas de cimento Portland CP V, cal hidratada, areia lavada e água destilada, nas proporções: 1:0,5:4 (Traço 1); 1:1:6 (Traço 2); e 1:2:9 (Traço 3), em volume. Estes traços foram escolhidos porque são os que são largamente utilizados em construções de alvenaria no estado de Pernambuco, além de serem os mesmos contidos nos trabalhos desenvolvidos por Azevedo (2019), sendo possível comparar os resultados do pesquisador com a presente pesquisa.

Além da diferença de contato e traço, também há a diferença de dimensões da base. Os corpos de prova possuem base quadrada de dimensões 5 cm x 5 cm, 7 cm x 7 cm, e 10 cm x 10 cm, aproximadamente. Essas medidas foram escolhidas para observar o comportamento da umidade quando a área de contato com a água é aumentada.

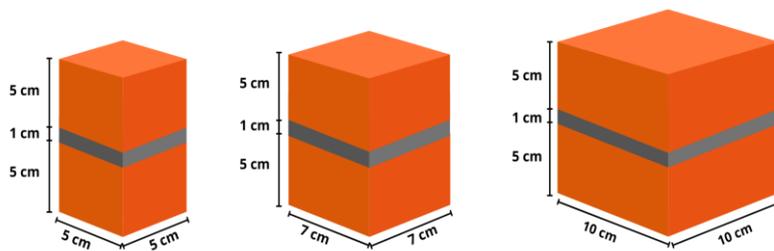
Para cada configuração de contato foram confeccionados 90 (noventa) corpos de prova, sendo 30 (trinta) para cada traço de argamassa, totalizando 180 (cento e oitenta) corpos de prova. A Tabela 2 exibe os dados dos corpos de prova confeccionados e ensaiados.

Tabela 1 - Configuração dos corpos de prova confeccionados e ensaiados

Contato	Traço	Dimensões	Quantidade	Total	
Contato perfeito	1:0.5:4	5cm x 5cm	10	30	90
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
	1:1:6	5cm x 5cm	10	30	
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
	1:2:9	5cm x 5cm	10	30	
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
Contato hidráulico	1:0.5:4	5cm x 5cm	10	30	90
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
	1:1:6	5cm x 5cm	10	30	
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
	1:2:9	5cm x 5cm	10	30	
		7cm x 7cm	10		
		10cm x 10cm	10		
				180	

Todos os espécimes possuíam altura de aproximadamente 11 cm, sendo duas camadas de tijolo cerâmico de 5 cm de altura intercaladas por uma camada de argamassa de 1 cm, conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 - Representação dos corpos de prova



Em todos os processos de preparo e execução do programa experimental foi utilizada água destilada para evitar a contaminação dos materiais por sais minerais presentes em água natural ou filtrada, o que poderia comprometer os resultados da pesquisa.

### 3.1 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Os materiais utilizados no desenvolvimento do programa experimental, tais como cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, foram caracterizados em laboratório.

#### 3.1.1 Cortes dos tijolos

Os tijolos utilizados para realizar os experimentos eram cerâmicos, maciços e tinham dimensões originais de, aproximadamente, 23 cm x 11 cm x 5 cm. Para construir os corpos de prova utilizados nos ensaios, foi necessário promover cortes nos tijolos para deixá-los com tamanhos menores, com seção transversal quadrada, com lados iguais a 5 cm, 7 cm e 10 cm. Foi utilizada uma máquina manual de corte reto com serra circular e uma serra diamantada para realizar os cortes. Para cada corpo de prova foram utilizados dois pedaços de tijolos, totalizando 360 pedaços de tijolos, sendo 120 para cada área de base.

#### 3.1.2 Secagem e saturação dos tijolos

Para garantir o contato perfeito optou-se por saturar os tijolos para não haver interpenetração da argamassa fresca nos poros dos tijolos. Para isso, os tijolos foram imersos em água destilada por 72 horas antes da aplicação da argamassa.

No caso do contato hidráulico, o oposto teve que ser feito. Antes da colocação da argamassa fresca, os tijolos foram colocados em estufa por 24 h, a 100 °C, de modo a retirar toda a água presente nos poros capilares. Dessa forma foi possível propiciar as aderências física e química entre os materiais, garantindo a maior interpenetração possível da argamassa nos poros dos tijolos.

#### 3.1.3 Confeção dos Corpos de Prova

Uma vez que o processo de secagem e saturação dos tijolos foi completado, iniciou-se o processo de confecção dos corpos de prova. O estudo foi realizado com três traços diferentes de argamassa, compostas por areia fina, areia grossa, cal hidratada, cimento Portland CP V e água destilada. A caracterização da argamassa é explicada com mais detalhes no item 3.3.2.

A confecção foi realizada a partir da camada de tijolo da base, adicionando uma camada grossa de argamassa fresca na face superior do tijolo e apoiando a segunda camada de tijolo

sobre a mesma. Para garantir o assentamento da argamassa em toda a face dos tijolos foram realizados golpes leves na face superior da amostra até se atingir 1 cm de espessura. As amostras prontas após a cura de sete dias podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7 - Corpos de prova confeccionados



#### 3.1.4 Impermeabilização dos corpos de prova

Para garantir a ocorrência do fluxo de umidade em apenas uma direção, as faces laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas após o período de 28 dias de cura da argamassa.

O material utilizado para a impermeabilização foi a fita do tipo Silver Tape, a qual foram aplicadas transversalmente nos corpos de prova. Primeiramente na parte central, onde ocorre o contato entre os tijolos e a argamassa, e posteriormente no restante do espécime, tomando cuidado para evitar espaços de ar entre os materiais e a fita. A Figura 8 exibe os corpos de prova impermeabilizados.

Figura 8 - Corpos de prova impermeabilizados



Depois de impermeabilizados, os corpos de prova foram mantidos em local com temperatura ambiente até o momento do ensaio de absorção. Devido à higroscopicidade dos tijolos cerâmicos, os corpos de prova foram colocados em estufa por 48 horas a 50 °C e logo após foram acondicionados em local com temperatura ambiente para resfriamento por 72 h, antes da realização de cada ensaio.

### 3.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR

Para a realização deste ensaio foram utilizados parâmetros da norma europeia ISO 15148 (2002) que direciona os termos para a determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial de materiais de construção em geral. Esta norma estabelece que os corpos de prova possuam área mínima de 50 cm<sup>2</sup>, mas recomenda que sejam de 100 cm<sup>2</sup> para melhor precisão dos resultados. Além disso, ela também exige a impermeabilização das faces laterais e utilização de no mínimo seis corpos de prova quando as áreas forem menores que 100 cm<sup>2</sup>.

Contudo, a maioria dos corpos de prova deste estudo possuem área menor que 50 cm<sup>2</sup> e por esse motivo, adaptou-se também o procedimento da Rilem TC 127-MS: *Tests for masonry materials and structures* (1998), que indica a utilização de espécimes com base quadrada de dimensões 5 cm x 5 cm e faces laterais impermeabilizadas.

As duas normas possuem procedimentos praticamente idênticos, tendo como objetivo a determinação do coeficiente de absorção capilar. Dito isto, o presente trabalho realizou uma adaptação/junção dos dois procedimentos, buscando maior número de medições para análise.

A ISO 15148:2002 prevê no mínimo sete pesagens durante todo o ensaio, sendo cinco delas nas primeiras 24 h, uma a 24 h e uma a escolha do pesquisador. Neste trabalho foram realizadas 40 pesagens, sendo 28 delas nas primeiras 24 h, em todos os corpos de prova, como está exposto a seguir:

- Até 15 minutos após o início do ensaio:
  - 1º registro: 1 min;
  - 2º registro: 3 min;
  - 3º registro: 6 min;
  - 4º registro: 9 min;
  - 5º registro: 12 min; e
  - 6º registro: 15 min.
- De 15 minutos a 1 hora a partir do início do ensaio:

- 7º registro: 20 min;
  - 8º registro: 25 min;
  - 9º registro: 30 min;
  - 10º registro: 35 min;
  - 11º registro: 40 min; e
  - 12º registro: 45 min.
- De 1 hora a 4 horas após o início do experimento:
  - 13º registro: 1 h;
  - 14º registro: 1 h e 15 min;
  - 15º registro: 1 h e 30 min;
  - 16º registro: 1 h e 45 min;
  - 17º registro: 3 h;
  - 18º registro: 3 h e 30 min; e
  - 19º registro: 4 h.
- A partir de 4 h são realizadas medições a cada hora até 10 h passadas do início do ensaio:
  - 20º registro: 5 h;
  - 21º registro: 6 h;
  - 22º registro: 7 h;
  - 23º registro: 8 h;
  - 24º registro: 9 h; e
  - 25º registro: 10 h.
- No dia seguinte são realizadas mais cinco medições num período do dia, uma a cada hora e consecutivas;
  - 26º registro: 22 h;
  - 27º registro: 23 h;
  - 28º registro: 24 h;
  - 29º registro: 25 h; e
  - 30º registro: 26 h.
- No segundo dia após confecção, são realizadas mais cinco medições, também em um período específico do dia, sendo uma medição por hora e consecutivas:
  - 31º registro: 46 h;
  - 32º registro: 47 h;
  - 33º registro: 48 h;

- 34° registro: 49 h; e
- 35° registro: 50 h.
- No terceiro dia após a confecção (72 h) são feitas as últimas cinco medições, a cada hora e consecutivas:
  - 36° registro: 70 h;
  - 37° registro: 71 h;
  - 38° registro: 72 h;
  - 39° registro: 73 h; e
  - 40° registro: 74 h.

Por motivos diversos como falta de energia, atrasos ou quebra de algum corpo de prova, não foi possível realizar algumas medições, o que não comprometeu as medições subsequentes e/ou o experimento.

Os recipientes utilizados para a realização do experimento eram feitos de plástico transparente com fundo de superfície plana, de modo a facilitar a manutenção do nível d'água. No fundo do recipiente foi fixado com cola para plástico e borracha, um emborrachado de cerca de 5 mm de espessura perfurados com pregos e/ou parafusos inoxidáveis.

As pontas dos pregos e/ou parafusos, voltadas para cima, tinham o objetivo de apoiar e manter a superfície inferior dos corpos de prova sempre em contato com a água, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Recipiente para ensaio



Na face lateral do recipiente foi feita uma marcação para identificar e controlar a altura da lâmina d'água em que os corpos de prova foram parcialmente imersos, com alturas de 5 mm a 10 mm acima da base dos espécimes.

### **3.2.1 Impermeabilização dos Corpos de Prova**

A sequência utilizada para a realização dos ensaios foi a seguinte:

1. Identificação dos corpos de prova;
2. Acondicionamento dos corpos de prova em estufa por 48 h;
3. Esfriamento dos corpos de prova por 72 h em temperatura ambiente;
4. Impressão das tabelas de anotação das medições;
5. Preparo e posicionamento dos recipientes devidamente limpos e secos;
6. Calibragem da balança a ser utilizada;
7. Preparo do temporizador para todas as medições do dia;
8. Colocação de água destilada nos recipientes até a marcação da altura estabelecida;
9. Pesagem, medição das dimensões dos corpos de prova e registro dos valores.

O processo de execução dos ensaios propriamente dito seguiu as seguintes etapas:

1. Acondicionamento dos corpos de prova imersos na água - cinco por recipiente,

- no horário estabelecido para início;
2. Pesagem dos espécimes nos tempos previstos;
    - a. Retirada do corpo de prova da água;
    - b. Retirada do excesso de água com pano úmido;
    - c. Realização da pesagem e registro dos valores;
    - d. Recolocação do corpo de prova no recipiente;
  3. Verificação do nível d'água do reservatório e nivelamento, quando necessário;
  4. Repetição do processo nos tempos previstos.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E HIGROSCÓPICAS DOS MATERIAIS

Para a devida realização deste estudo é necessária a caracterização dos materiais, de maneira que se possa obter os parâmetros de referência e com eles efetuar as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios, e, com isso, chegar a uma interpretação correta do fenômeno.

#### 3.3.1 Tijolo Cerâmico

Os ensaios realizados para caracterizar os tijolos utilizados foram de densidade, índice de absorção de água e coeficiente de absorção capilar.

##### 3.3.1.1. Densidade

Para calcular a densidade foi realizada a secagem dos tijolos em estufa a 100 °C até atingir uma massa constante, conforme NBR 15270-3 - Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio (ABNT, 2005b). Depois do resfriamento dos tijolos, fez-se a pesagem, em seguida a medição das três dimensões e o registro dos valores, em cinco amostras diferentes.

##### 3.3.1.2. Índice de Absorção de Água

Para calcular o índice de absorção de água, foi utilizada a norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005b), que indica que os tijolos devem ser submersos por um período de ao menos 24 h em água à temperatura ambiente até a estabilização da massa. Os ensaios foram realizados em três amostras de tijolos.

##### 3.3.1.3. Coeficiente de Absorção Capilar

O coeficiente de absorção capilar foi calculado de acordo com a norma ISO 15148 (ISO,

2002), utilizando cinco amostras de tijolos imersas parcialmente em água destilada, seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente. As medições foram realizadas nos seguintes tempos de ensaio: 5 min, 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 10 h e 24 h.

O coeficiente de absorção capilar ( $A_w$ ) é calculado pela fórmula:

$$A_w = \frac{M_w}{A\sqrt{t}} = \frac{m_t - m_0}{A\sqrt{t}} \quad (3)$$

Onde  $A_w$  é o coeficiente de absorção capilar ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ),  $m_t$  é a massa medida após o tempo (kg),  $m_0$  é a massa inicial da amostra,  $A$  é a área da base e  $t$  é o tempo (s).

### 3.3.2 Argamassa

A argamassa é um material de construção comum usado para a construção de paredes, e a sua dosagem é um dos fatores mais importantes para a trabalhabilidade desse material (GUIMARÃES *et al.*, 2018). As dosagens utilizadas neste trabalho estão de acordo com a norma brasileira NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento (ABNT, 1998).

A argamassa de assentamento é o principal material utilizado para união dos tijolos em paredes de alvenaria. Ela contribui na distribuição uniforme das cargas de uma edificação e absorção das deformações resultantes dos esforços atuantes.

Para que a argamassa desempenhe as suas funções corretamente, é necessário garantir, por meio das proporções dos materiais utilizados na sua confecção, que ela tenha as características necessárias compatíveis à função que se destina. Uma das principais características das argamassas, referente à execução, é a trabalhabilidade, que pode ser definida como a maior ou menor facilidade de seu manuseio em estado fresco.

As argamassas utilizadas neste estudo foram compostas por cimento Portland CP V, cal hidratada, areia lavada e água destilada. A título de comparação, foram utilizadas três proporções diferentes de materiais, visando manter a relação água/materiais secos, assegurando assim uma boa trabalhabilidade. As proporções em volume, as relações água/cimento (a/c) e a relação água/materiais secos (a/m) são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Proporções dos traços das argamassas utilizadas

Traço	Cimento	Cal	Areia fina	Areia grossa	a/c	a/m
1	1	0.5	2	2	1.15	0.17
2	1	1	3	3	1.68	0.17

3	1	2	4.5	4.5	2.51	0.17
---	---	---	-----	-----	------	------

As argamassas foram preparadas conforme a NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência (ABNT, 2016), que também prescreve o cálculo do índice de consistência no estado fresco. Ainda nesta etapa, foram calculados o teor de ar incorporado e a densidade no estado fresco, ambos conforme a NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado (ABNT, 2005a).

Os ensaios realizados para caracterizar as argamassas no estado endurecido foram os seguintes: densidade, índice de absorção de água, e coeficiente de absorção capilar. Para todos os ensaios de caracterização das argamassas foram utilizados corpos de prova prismáticos com dimensões iguais a 4 cm x 4 cm de base, e 16 cm de altura.

#### 3.3.2.1. Densidade

As densidades das argamassas foram calculadas conforme indica a NBR 13278 (ABNT, 2005a), e de forma similar aos procedimentos realizados com os tijolos. Cinco amostras de cada traço de argamassa foram ensaiadas.

#### 3.3.2.2. Índice de Absorção de Água

Para calcular o índice de absorção de água, optou-se por utilizar o mesmo método realizado nos tijolos, que indica que as amostras devem ser submersas por ao menos 24 h em água a temperatura ambiente, até a estabilização da massa. Os ensaios foram realizados em três amostras de cada traço de argamassa.

#### 3.3.2.3. Coeficiente de Absorção Capilar

Assim como para os tijolos, os coeficientes de absorção capilar foram calculados pela eq.(3) e seguindo os procedimentos determinados pela norma ISO 15148.

### 3.4 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA HÍDRICA

O cálculo da resistência hídrica foi desenvolvido a partir dos modelos descritos por Azevedo (2019). A primeira metodologia (metodologia anterior - MA) de cálculo se baseia na taxa de absorção capilar de umidade do corpo de prova cerâmico em função do tempo,

independente do tipo de contato que haja entre as amostras. A segunda (nova metodologia - NM) no novo método proposto por Azevedo em 2019.

Para o desenvolvimento da MA deve-se partir do ponto de mudança da inclinação da curva de absorção capilar em função do tempo. Contudo, como a curva se trata de uma função polinomial alguns processos precisaram ser adaptados para que fosse efetuada a análise.

Partindo das informações dos ensaios, foi estipulado o tempo inicial de 25.200 segundos (7 h) por se tratar de um ponto comum entre as nove configurações e ficar na região próxima ao que mais se assemelha a uma mudança brusca de inclinação das curvas. Como ponto final ficou estipulado o tempo igual a 259.200 segundos, que correspondem a 72 h. A exceção foi para o corpo de prova pequeno do traço 3 que por não ter o registro para esse período, foi utilizado o tempo final de 255.600 segundos (71 h).

Fazendo uso da Eq.(2) e tendo  $M_w$  para os respectivos valores de fluxo cumulativo de absorção capilar de umidade registrados para os tempos de  $t_0$  e  $t$  de 25.200 segundos e 259.200 segundos, respectivamente. Foram calculados os valores de resistência hídrica das nove configurações de amostras, a partir da razão entre as variações de absorção capilar em função do tempo.

Para o cálculo da NM foram necessárias algumas adaptações para que o cálculo pudesse ser efetuado. Diferente do que foi proposto por Azevedo (2019), o contato perfeito neste estudo apresenta dois pontos de inflexão nas curvas geradas pelo ensaio de absorção, assim como o contato hidráulico. Dessa forma, as duas configurações obtiveram funções logarítmicas em seus cálculos de Resistência Hídrica. O tempo  $t$  utilizado para todas as configurações do contato perfeito foi 86.400 segundos (24 h). Nas configurações do contato hidráulico houve variação no tempo em que o gráfico muda de direção, sendo estipulado 79.200 s (22h) para os corpos de prova de 5 cm com traços 1 e 2, e os de 7 cm com traços 1 e 3. As outras configurações seguiram com tempo igual a 86.400 s.

Os cálculos da resistência hídrica foram realizados para os dois tipos de contato e as duas metodologias estudados neste trabalho, e os respectivos resultados observados serão expostos na seção 4.5.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão analisados os diferentes resultados obtidos nos ensaios propostos no programa experimental para que fosse possível alcançar os objetivos deste trabalho. Para a devida análise dos valores observados e entendimento dos parâmetros influenciadores dos desempenhos registrados, é fundamental a caracterização das amostras de maneira prévia. Sendo assim, a primeira parte desta seção servirá para a exposição dos resultados dos ensaios laboratoriais complementares de caracterização de absorção e saturação das amostras nos devidos casos.

Na segunda parte serão expostos os resultados obtidos para o contato do tipo hidráulico considerando as nove configurações de confecção das amostras e analisadas sob os aspectos de fluxo cumulativo e também o teor de umidade, ao término do período de análise de 74 h. Essa análise é vista primeiramente em função do tempo tanto para o fluxo cumulativo quanto para o teor de umidade, e, em seguida, são expostos gráficos específicos para melhor visualização dos valores a serem comparados, tanto em função dos três tipos de traço proposto quanto em relação às áreas das bases.

Para os corpos de prova sob o contato hidráulico, devido a questões logísticas, nem todos os corpos de prova foram ensaiados durante o mesmo tempo. Para a análise dos resultados foi estabelecido que a mesma fosse de 74h, pois contemplava a maioria dos corpos de prova e ultrapassava o tempo de mínimo de 72 h (3 dias).

Quatro corpos de prova das famílias de amostras T1M (Traço 1 e tamanho médio) e T2P (Traço 2 e área da base pequena) não tiveram medições a 74 h, por esse motivo foi realizada uma regressão logarítmica para prever os resultados que faltariam para a análise.

Durante a cura da argamassa entre os tijolos que foram saturados previamente, a aderência física foi comprometida devido ao preenchimento dos poros por água, como já era esperado para o contato perfeito. Este fenômeno foi evidenciado quando, após sete dias de cura, foi possível observar que a camada de argamassa se despreendeu dos tijolos em alguns corpos de prova, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Tijolos desprendidos da camada de argamassa



#### 4.1 RESULTADOS DOS MATERIAIS

Os resultados obtidos trazem informações que ajudam a compreender de forma mais detalhada como a transferência de umidade por ascensão capilar ocorre em materiais de múltiplas camadas, como numa parede de alvenaria.

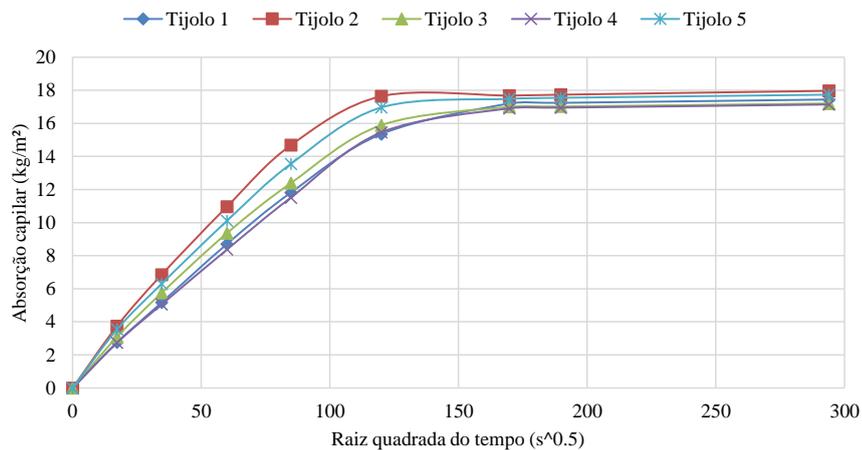
##### 4.1.1 Tijolo Cerâmico

Para calcular o índice de absorção de água, foi utilizada a norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005b), a qual indica submersão dos tijolos por 24 h em água à temperatura ambiente, até estabilização da massa. Para obter melhor resultado estatístico, o ensaio foi realizado em triplicata das amostras de tijolos.

##### 4.1.1.1. Índice de Absorção de Água, saturação e densidade dos tijolos cerâmicos

O Gráfico 1 mostra a variação das medições das massas em função da raiz quadrada do tempo. O coeficiente de absorção capilar obtido foi de  $0,13 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ . Esse valor está de acordo com outros valores deste experimento e encontrados na literatura, que variam entre 0,05 e 0,29  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ .

Gráfico 1 - Curva de absorção capilar das amostras de tijolo em função da raiz quadrada do tempo



A saturação dos tijolos foi medida por 96 h, e registrada a cada 24 h. As informações coletadas dos três corpos de prova moldados para esse ensaio estão na tabela 3.

Tabela 3 – Saturação média dos tijolos

Tempo	Massa (mg)	Teor de umidade
Inicial (peso seco)	2222,8	0%
24 h	2666,4	20%
48 h	2670,5	20%
72 h	2671,9	20%
96 h	2672,0	20%

O valor da densidade obtido pelos tijolos cerâmicos foi de 1615,10 kg/m<sup>3</sup>. Já o resultado para o índice de absorção de água foi de 20%. Os resultados dos ensaios realizados para caracterizar os tijolos estão apresentados de forma resumida na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas dos tijolos

Propriedade	Tijolo cerâmico
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1.615,1
Índice de Absorção de Água (%)	20
Coefficiente de Absorção Capilar (kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )	0,13

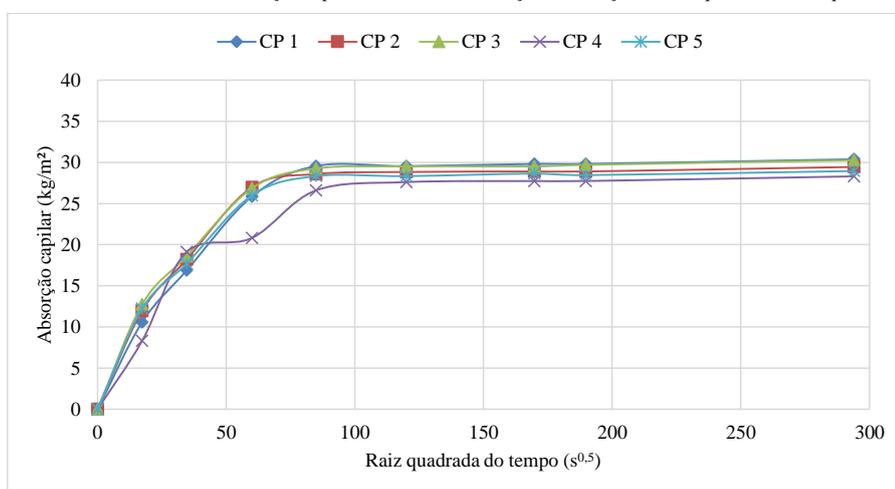
#### 4.1.2 Argamassa

As argamassas foram compostas por cimento Portland CP V, cal hidratada, areia lavada e água destilada, e foram utilizadas três proporções diferentes de materiais, visando manter a relação água/materiais secos.

#### 4.1.2.1. Índice de Absorção de Água, saturação e densidade das argamassas

O Gráfico 2 mostra os resultados do ensaio de absorção capilar do Traço 1 para os cinco corpos de prova moldados conforme explicado na Seção 3.3.2.2 do programa experimental.

Gráfico 2 - Curva de absorção capilar das amostras do traço 1 em função da raiz quadrada do tempo



A Tabela 5 traz os resultados para o ensaio de saturação das amostras de argamassa do Traço 1, assim como o teor de umidade observado.

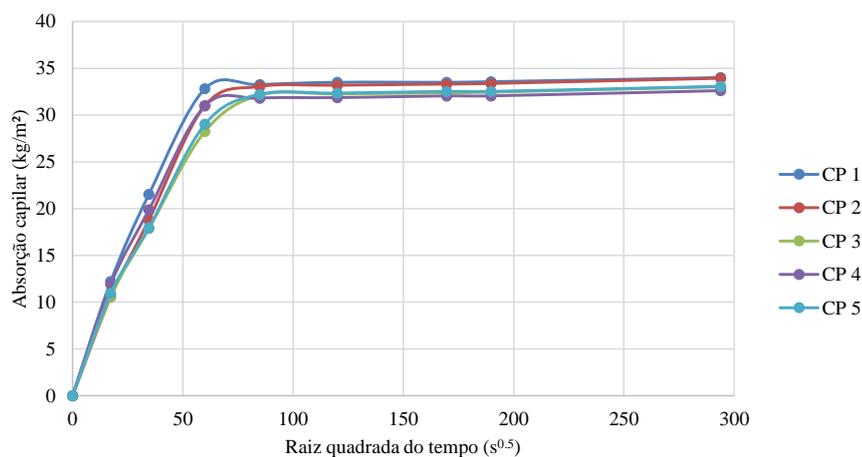
Tabela 5 – Saturação média das amostras do Traço 1

Tempo	Massa (mg)	Teor de umidade
Inicial (peso seco)	484,9	0%
24 h	532,4	10%
48 h	533,3	10%
72 h	533,8	10%
96 h	534,0	10%

O Gráfico 3 mostra resultados diferentes daqueles observados para o Traço 1. Os valores

para absorção capilar média das amostras, observados para o traço 2, são superiores do que os registrados no Traço 1.

Gráfico 3 - Curva de absorção capilar das amostras do traço 2 em função da raiz quadrada do tempo



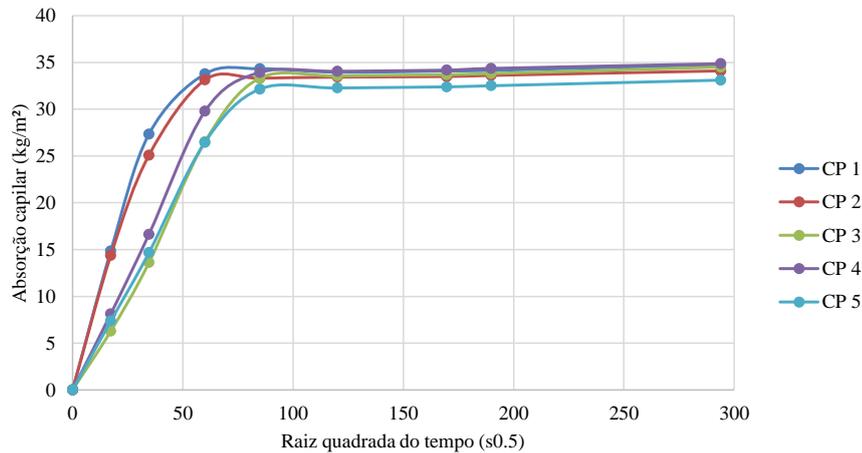
A Tabela 6 tem os resultados do ensaio complementar de saturação realizado nos corpos de prova de argamassa moldados com o traço 2.

Tabela 6 – Saturação média das amostras do Traço 2

<b>Tempo</b>	<b>Massa</b>	<b>Teor de umidade</b>
Inicial (peso seco)	484,0	0%
24 h	535,6	11%
48 h	536,6	11%
72 h	536,8	11%
96 h	537,1	11%

O Gráfico 4 permite verificar que os valores obtidos pelo Traço 3 são superiores aos registrados pelo Traço 1. Contudo, também há um intervalo maior dos resultados dentre as amostras analisadas para essa proporção da mistura em relação aos moldes com o Traço 2.

Gráfico 4 - Curva de absorção capilar das amostras do Traço 3 em função da raiz quadrada do tempo



A Tabela 7 informa os valores de saturação média das amostras confeccionadas com o Traço 3 e ensaiadas por 4 dias. Também são informados os percentuais dos teores de umidade observados.

Tabela 7 – Saturação média das amostras do Traço 3

Tempo	Massa	Teor de umidade
Inicial (peso seco)	483,5	0%
24 h	537,5	11%
48 h	538,5	11%
72 h	538,7	11%
96 h	539,1	12%

Em resumo, as argamassas exibiram valores de absorção capilar para os Traços 1, 2 e 3 foram de  $0,10 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ ,  $0,11 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$  e  $0,12 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$ , respectivamente. As densidades registradas foram de  $1888,6 \text{ kg/m}^3$ ,  $1892,3 \text{ kg/m}^3$  e  $1870,3 \text{ kg/m}^3$ , para os traços 1, 2, e 3, respectivamente. Os valores dos índices de absorção de água foram de 9,8%, 10,7%, e 11,2% para os Traços 1, 2, e 3, respectivamente. Os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos três tipos de traços estão apresentados na Tabela 8.

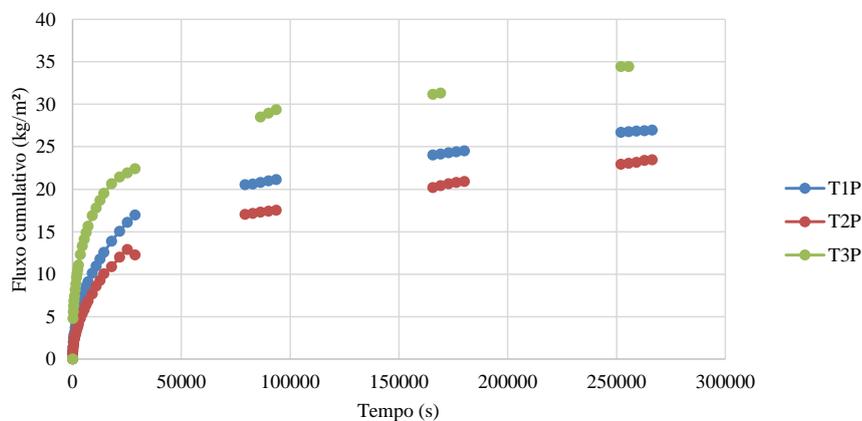
Tabela 8 - Propriedades das argamassas ensaiadas

Propriedade	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Consistência (mm)	126.68	128.93	127.62
Densidade fresco (kg/m <sup>3</sup> )	2056	2080	2096
Densidade endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1.888,6	1892.3	1.870,3
Índice de Absorção de água (%)	9.8	10.7	11.2
Coefficiente de capilaridade (kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )	0.10	0.11	0.12

#### 4.2 CONTATO HIDRÁULICO

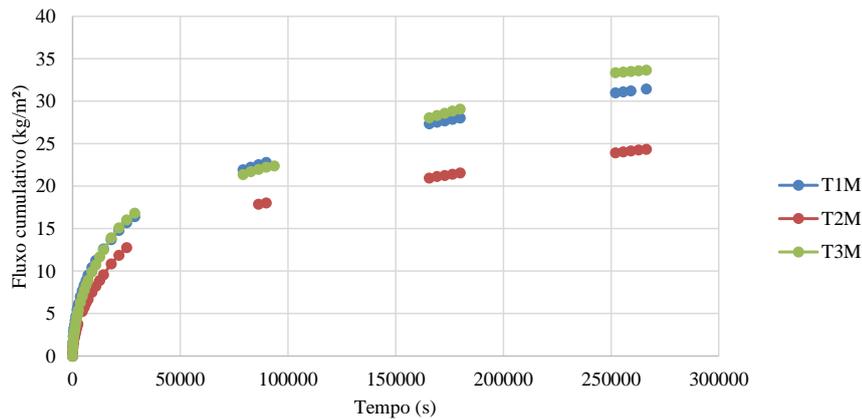
Na comparação dos resultados obtidos entre os três tipos de traços, para as amostras com bases de 5 cm x 5 cm, é possível verificar que o Traço 3 possui valores de fluxo de umidade maiores que os demais. O Traço 2 possui os resultados mais baixos, sendo o Traço 1 intermediário entre as outras duas curvas, conforme visto no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 5 cm x 5 cm base



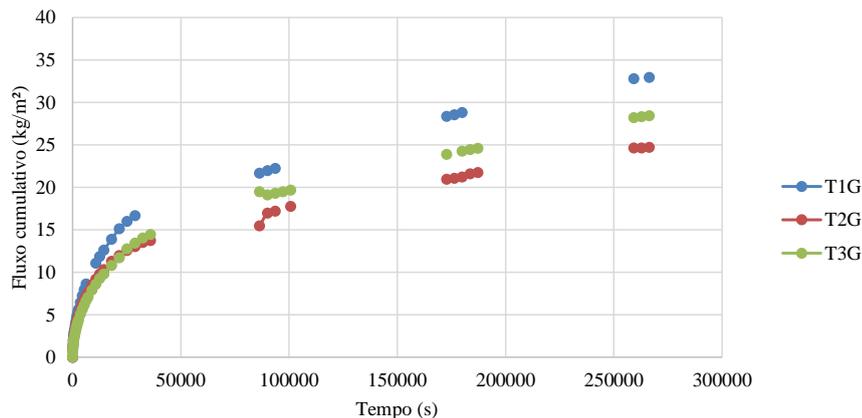
Ao serem analisados os resultados para os três tipos de traços, e comparando os valores de fluxo cumulativo de umidade em função do tempo, para os corpos de prova com base de 7 cm x 7 cm, são observados comportamentos semelhantes. Contudo, com o acréscimo da área da base, a diferença entre os resultados para os três traços se reduz chegando a certo momento a se sobreporem, obtendo os mesmos valores ou próximos, conforme pode ser visualizado no Gráfico 6. A sobreposição dos valores ocorre entre as curvas que representam os Traços 1 e 3.

Gráfico 6 - Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 7 cm x 7 cm base



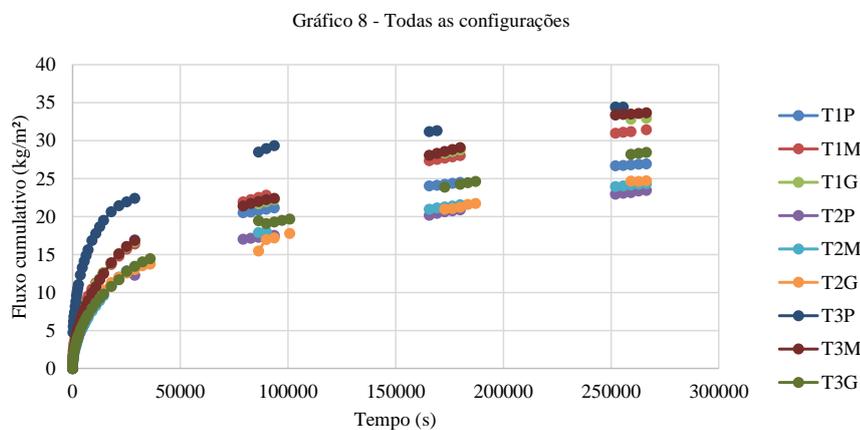
Dentre os corpos de prova com dimensões de base maiores, de 10 cm x 10 cm, os resultados observados para o fluxo cumulativo de umidade para o contato do tipo hidráulico demonstraram uma tendência mais parecida com as amostras menores, de 5 cm x 5 cm. Com isso, os corpos de prova com o Traço 2 foram os que apresentaram os menores resultados para o acúmulo de umidade em função do tempo de exposição característico. Isso fica mais óbvio de visualizar através do Gráfico 7.

Gráfico 7 - Fluxo cumulativo de umidade para os três diferentes traços usando corpos de prova com dimensões de 10 cm x 10 cm base



Comparando todas as configurações de traços e dimensões das bases presentes nas diferentes amostras para o contato do tipo hidráulico, é possível observar que o Traço 3 possui os maiores resultados do fluxo cumulativo de umidade em função do tempo, para o corpo de prova pequeno.

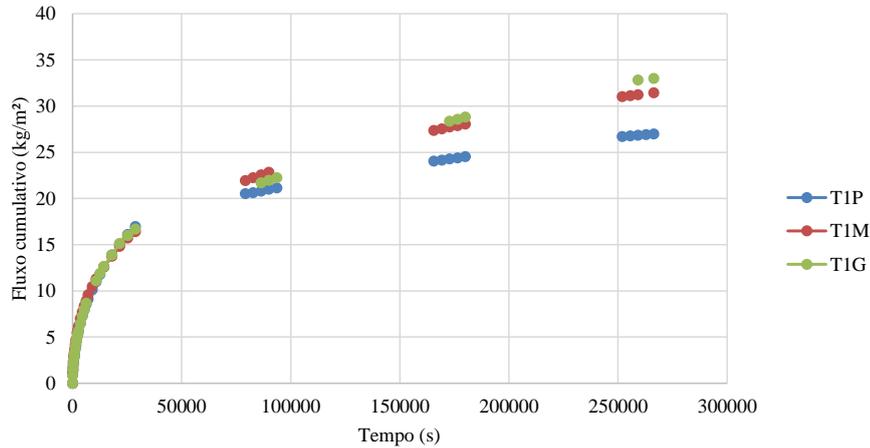
Por outro lado, os corpos de prova moldados a partir do Traço 2, nas três dimensões estudadas, são os que apresentam menor fluxo cumulativo de umidade aos três dias. O Traço 1, com menor proporção de agregados miúdos em relação ao cimento, possui resultados mais baixos para exemplares menores, conforme pode ser visto no Gráfico 8.



Realizando a análise comparativa entre as três diferentes áreas para um mesmo tipo de traço no contato hidráulico, é possível observar por outra perspectiva a variação do fluxo cumulativo de umidade em função do tempo e a partir disso conjecturar sobre os parâmetros influenciadores.

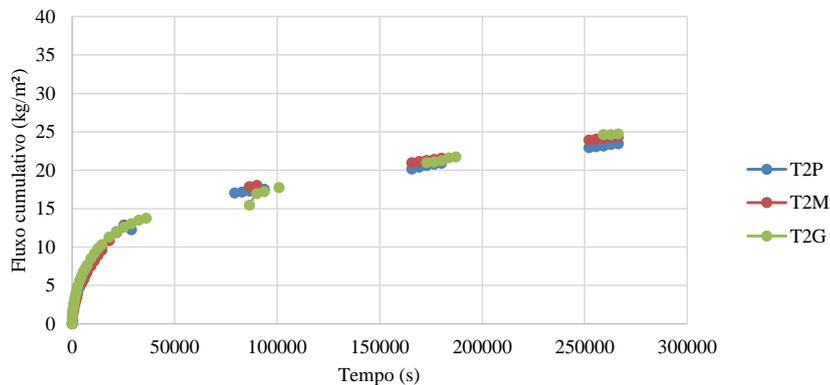
Para o Traço 1 pode-se observar que apesar dos resultados próximos das amostras médias e grandes, os corpos de prova menores apresentaram valores mais baixos do que os demais indicando menor acúmulo de umidade, conforme pode ser visto no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Comparação entre as áreas do traço 1



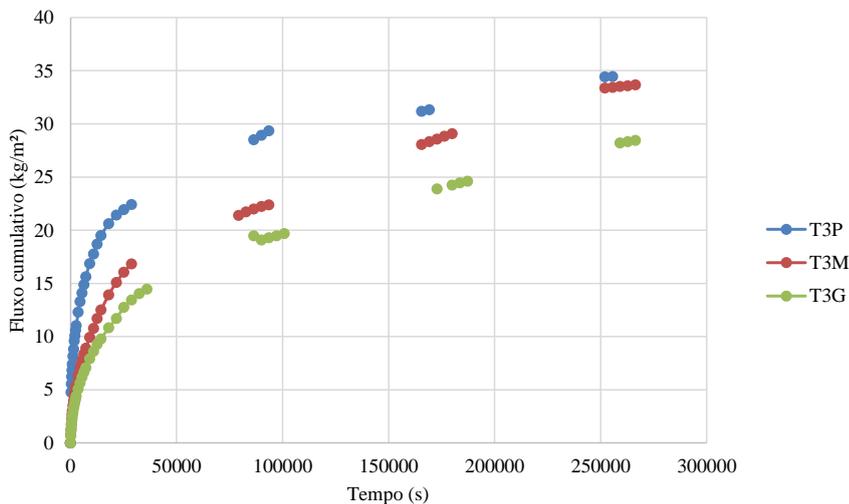
Os resultados obtidos para o Traço 2 são interessantes ao serem comparados com os demais, pois para essa proporção da mistura da argamassa podem ser visualizados valores muito próximos do fluxo cumulativo de umidade em função do tempo. Isso ocorre para as três diferentes dimensões das bases, indicando que pode haver um valor ideal para as proporções das misturas na composição da argamassa, e que independeriam da área exposta à umidade. Essa tendência pode ser vista no gráfico 10, e é importante notar que os valores em por si alcançam  $25 \text{ kg/m}^2$  aos três dias (72 h) aproximadamente, e que pode ser considerado baixo em relação aos observados nos demais traços.

Gráfico 10 - Comparação entre as áreas do Traço 2



Diferente de um resultado linear intuitivamente aguardado, quando comparado aos demais traços as proporções da mistura aqui chamada de Traço 3 possuem maior semelhança dos resultados em relação ao Traço 1 do que o Traço 2. Os valores obtidos são superiores a  $25 \text{ kg/m}^2$ , chegando a serem próximos dos  $35 \text{ kg/m}^2$  observados nas amostras de menores dimensões de base, principalmente de  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ . Por sua vez, as amostras de dimensões de bases maiores, de  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ , apresentaram menor fluxo cumulativo de umidade sendo menores que  $30 \text{ kg/m}^2$  observados ao passar de três dias. As curvas expostas no Gráfico 11 fornecem uma melhor visualização deste comportamento físico do material cerâmico analisado.

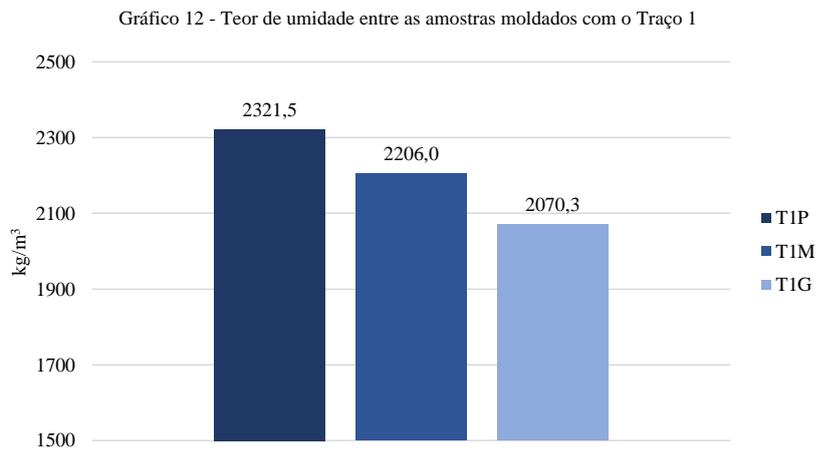
Gráfico 11 - Comparação entre as áreas do Traço 3



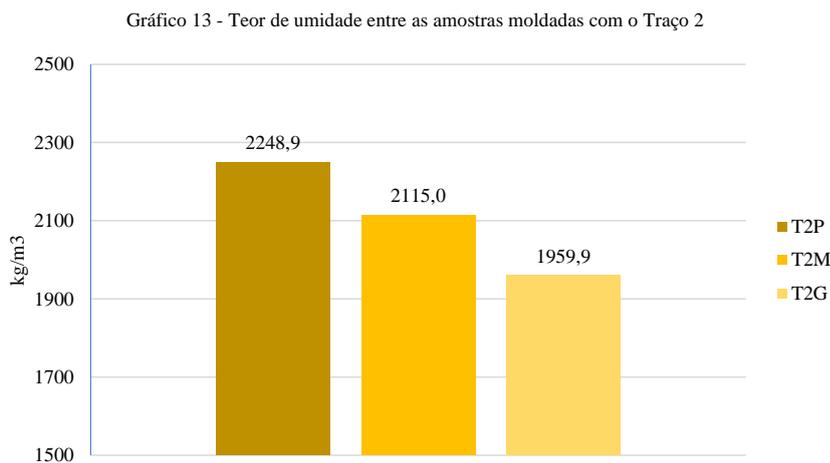
É importante a análise dos teores de umidade entre os diferentes traços para que se possa obter uma correlação melhor sobre quais os parâmetros determinantes que contribuem para o transporte da umidade, e assim poder estabelecer os critérios ligados à resistência da interface.

O Gráfico 12 apresenta os resultados dos teores de umidade para o Traço 1 considerando os corpos de prova nas três dimensões de base estudadas. As amostras de menor volume apresentaram o maior valor de teor de umidade em comparação com os corpos de prova intermediários, que por sua vez foram maiores do que os espécimes de base mais larga. Isso pode levar ao entendimento que há uma relação direta entre a área da base exposta à umidade e o teor de umidade que a amostra apresentará, sob condições específicas. O teor de umidade mínimo foi de  $2070,30 \text{ kg/m}^3$  para os corpos de prova grandes, e o máximo foi de  $2321,54$

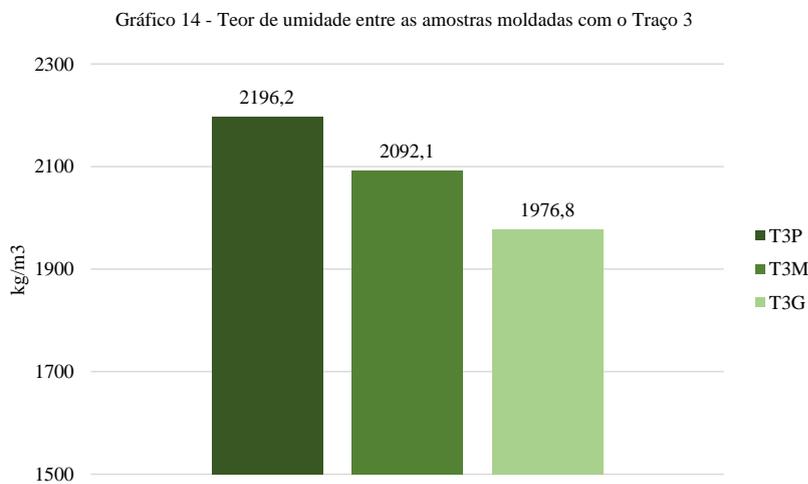
kg/m<sup>3</sup> para os de menor área de base.



O teor de umidade observado para os corpos de prova confeccionados com o Traço 2 teve relações semelhantes entre as diferentes áreas das bases, apresentando resultados maiores para as amostras pequenas em relação às intermediárias, que por sua vez também mostraram valores superiores aos observados nos espécimes grandes. Os corpos de prova maiores mostraram valores de teor de umidade em média de 1959,9 kg/m<sup>3</sup>, e esses resultados são mais baixos que os apresentados pelos corpos de prova de mesmas dimensões, porém moldados com a argamassa do Traço 1. O Gráfico 13 mostra os dados de teor de umidade para o Traço 2.



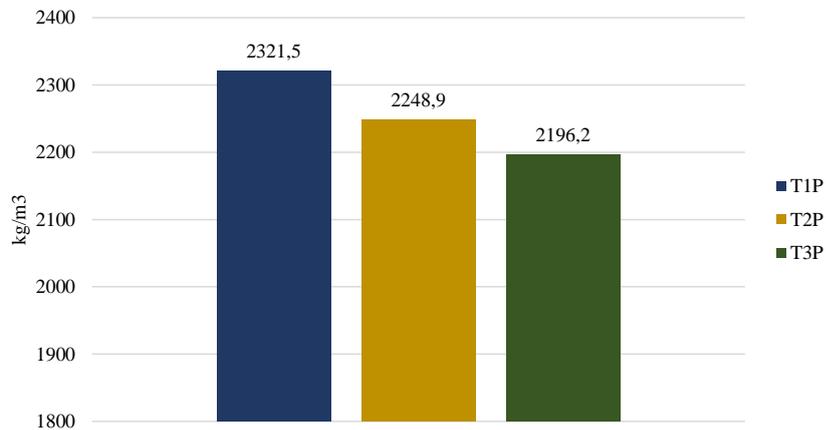
Para o Traço 3 os resultados podem ser considerados melhores do que os obtidos pelos Traços 1 e 2, quando observados os corpos de prova pequenos e médios. Entretanto, as amostras grandes do Traço 3 mostraram resultados mais elevados de teor de umidade em comparação com os corpos de prova confeccionados com a argamassa do Traço 2. As amostras grandes mostraram valor médio de teor de umidade igual a  $1976,8 \text{ kg/m}^3$  que é superior aos mesmos moldes do Traço 2. Os resultados médios obtidos pelas amostras do Traço 3 no contato do tipo hidráulico para os teores de umidade estão apresentados no Gráfico 14.



Facilita a visualização dos teores de umidade a partir de uma análise dos diferentes traços em comparação utilizando-se a mesma área da base para os corpos de prova. Esse tipo de análise permite que sejam vistos os resultados para um mesmo traço nos diferentes corpos de prova, observando as variações dos dados. Também é possível comparar os dados dentre os três gráficos que abordarão esses resultados.

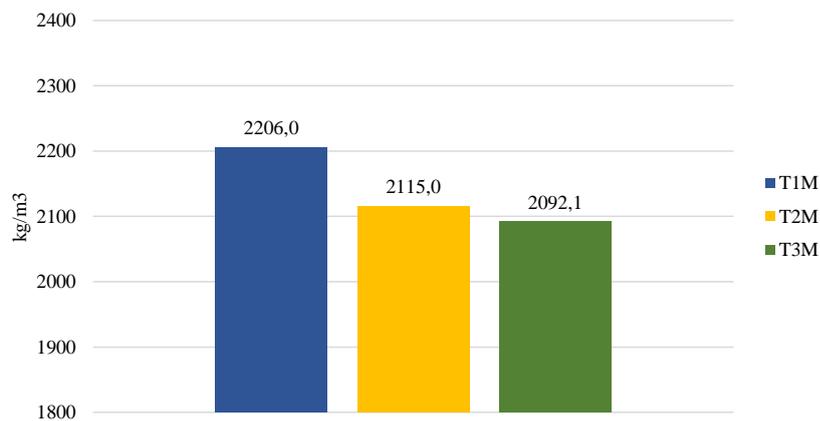
O Gráfico 15 apresenta os valores médios obtidos com os corpos de prova de área da base igual  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  moldados com os três tipos de traço. É possível visualizar que o Traço 1 foi o que obteve o maior valor médio de teor de umidade dentre as amostras analisadas, tendo sido igual a  $2321,5 \text{ kg/m}^3$ . Os corpos de prova pequenos moldados com o Traço 2 obtiveram valor médio de teor de umidade igual a  $2248,9 \text{ kg/m}^3$ . Por sua vez, as amostras confeccionadas com o Traço 3, para essas dimensões propostas, foram as que mostraram menor valor médio, sendo igual a  $2196,2 \text{ kg/m}^3$ .

Gráfico 15 - Teor de umidade entre CP's de 5 cm x 5 cm



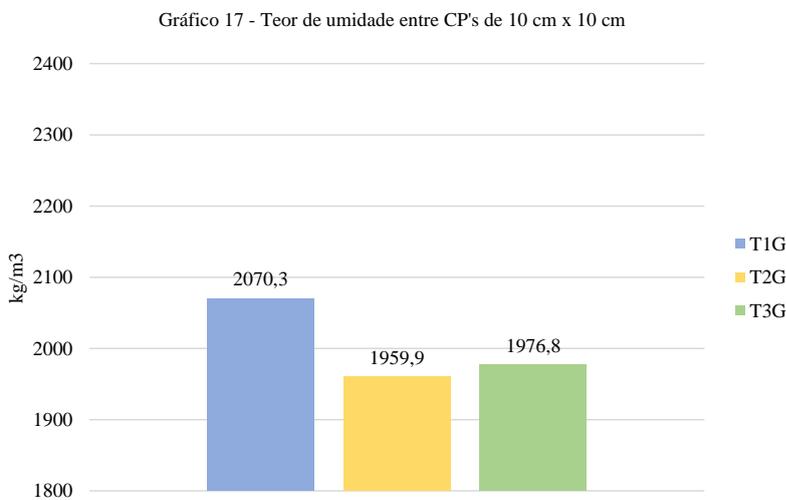
Os corpos de prova com dimensões médias, de 7 cm x 7 cm, mostraram valores menores do que os outros de áreas menores, principalmente se comparados proporcionalmente entre os três traços para os resultados obtidos entre si. As amostras médias moldadas com os Traços 2 e 3 mostraram resultados mais baixos de teor de umidade do que os valores dos corpos de prova pequenos. Os resultados das amostras médias para os Traços 1, 2, e 3, estão apresentados no Gráfico 16 e são iguais a 2206 kg/m<sup>3</sup>, 2115 kg/m<sup>3</sup>, e 2092,1 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Gráfico 16 - Teor de umidade entre CP's de 7 cm x 7 cm



Os dados obtidos pelos corpos de prova grandes em relação ao teor de umidade médio foram os mais baixos dentre as três dimensões de áreas analisadas, e podem ser vistos no

Gráfico 17. O teor de umidade de 2070,3 kg/m<sup>3</sup> observado para essas amostras quando confeccionada com o Traço 1 foi inferior ao menor resultado apresentado pelos corpos de prova pequenos e moldados com o Traço 3. Por outro lado, nessa análise é possível visualizar que o Traço 2 apresenta menor valor de teor de umidade quando em comparação com o Traço 3. Esse comportamento diverge das outras duas análises observadas nas amostras pequenas e médias.



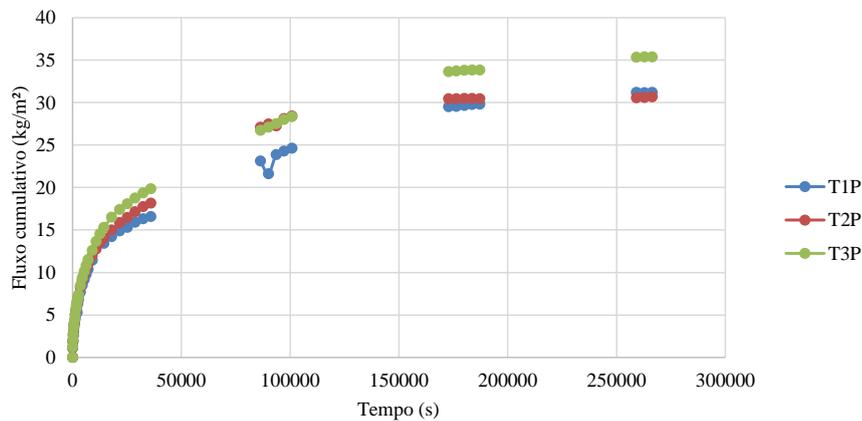
Os resultados para o contato hidráulico demonstraram que os corpos de prova moldados com o Traço 2 possuem menor fluxo cumulativo de umidade, e também mostraram menores teores de umidade ao passar dos três dias.

#### 4.3 CONTATO PERFEITO

Além da interface de contato com saturação prévia chamada aqui de contato hidráulico, também foram analisadas as amostras cuja faces estavam secas, propiciando o fluxo da água de hidratação da argamassa junto com os finos, percolando pelos poros abertos do material cerâmico.

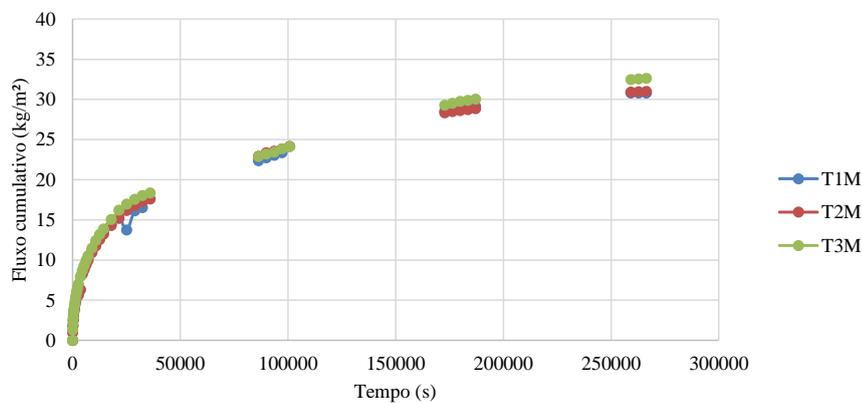
O Gráfico 18 mostra os resultados de fluxo cumulativo de umidade em função do tempo para os corpos de prova de dimensões de base iguais a 5 cm x 5 cm para o contato do tipo perfeito. Ao término do período de três dias (74 h) o Traço 3 foi o que apresentou as mais elevadas leituras, de aproximadamente 35 kg/m<sup>2</sup>. Os traços 1 e 2 mostraram desempenhos semelhantes, tendo obtido resultados de aproximadamente 30 kg/m<sup>2</sup>.

Gráfico 18 - Comparação entre os traços nas dimensões 5 cm x 5 cm



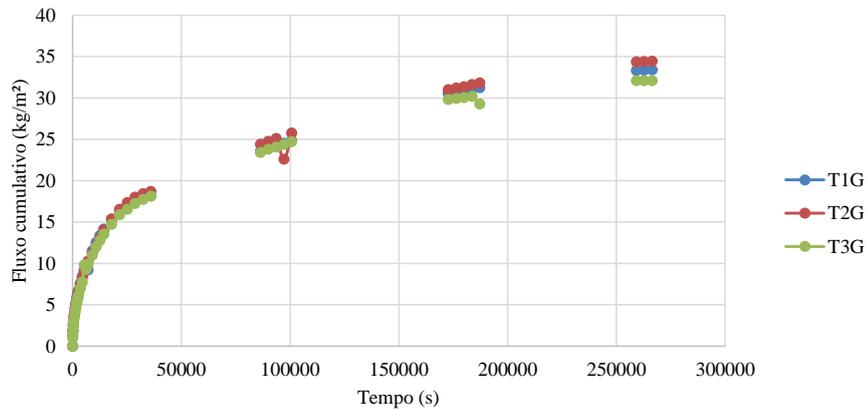
O desempenho dos corpos de prova médios, de dimensões de base iguais a 7 cm por 7 cm, mostrou resultados muito próximos para os três diferentes tipos de traço estudado, sendo inclusive sobrepostos os valores das curvas demonstradas no Gráfico 19. Os resultados foram levemente superiores aos 30 kg/m<sup>2</sup>.

Gráfico 19- Comparação entre os traços nas dimensões 7 cm x 7 cm



Os corpos de prova grandes, de dimensões de base iguais a 10 cm x 10 cm, mostraram um desempenho muito semelhante às demais amostras, e apresentaram valores entre 30 kg/m<sup>2</sup> e 35 kg/m<sup>2</sup>, como pode ser visto no Gráfico 20.

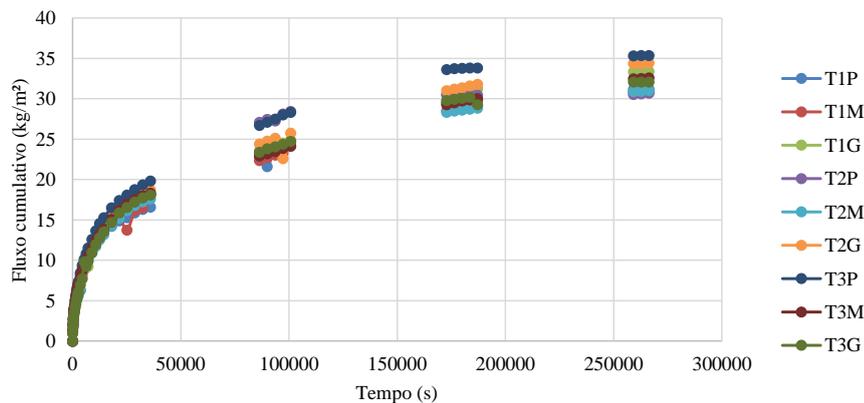
Gráfico 20- Comparação entre os traços nas dimensões 10 cm x 10 cm



Ao serem comparadas todas as configurações de amostras moldadas, sendo elas confeccionadas através do agrupamento dos três tipos de traço e das três diferentes dimensões de base dos corpos de prova, é possível visualizar de maneira melhor os desempenhos. É possível então verificar que as amostras do tipo T3P, ou seja, moldadas com o Traço 3 e com menores dimensões de base, são as que apresentaram os valores mais elevados de fluxo cumulativo de umidade em função do tempo. Também é possível observar que as amostras confeccionadas com o Traço 1 foram as que obtiveram os valores mais baixos desse transporte da umidade acumulada.

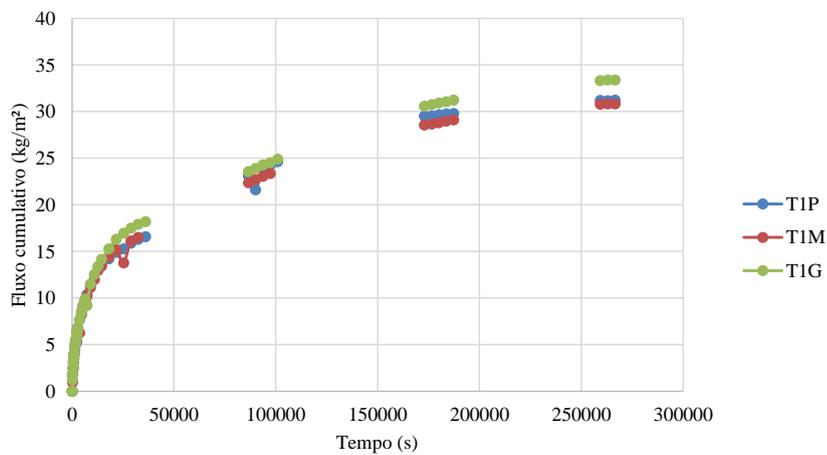
O Gráfico 21 mostra as nove configurações de moldagem dos corpos de prova e seus respectivos valores de fluxo cumulativo de umidade em função do tempo.

Gráfico 21 - Todas as configurações



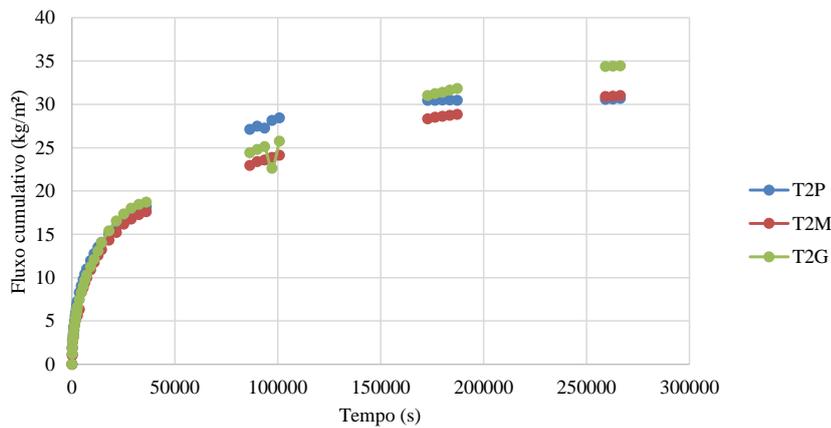
Nessa seção também foram realizadas para o contato perfeito, assim como foi feita para o contato hidráulico, uma análise dos três tipos de traços em comparação das diferentes áreas das bases. Para o Traço 1 é possível visualizar no Gráfico 22, que os corpos de prova de menores dimensões obtiveram valores mais baixos de fluxo cumulativo em função do tempo do que as amostras de base grande.

Gráfico 22 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas moldados com o traço 1



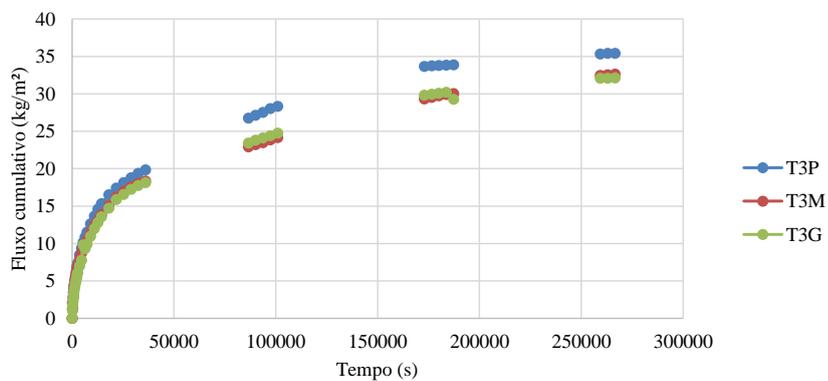
Para o Traço 2, o Gráfico 23 mostra que os desempenhos dos corpos de prova menores foram melhores ao término do período de estudo de 72 h, contudo as amostras de menor base demonstraram comportamento atípico quando comparadas aos demais gráficos. Apesar de ao término dos três dias os resultados obtidos entre as amostras médias e pequenas terem sido próximos, nas primeiras 24 horas o fluxo cumulativo de umidade das amostras foi bem mais elevado do que o apresentado pelos espécimes médios.

Gráfico 23 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas moldados com o Traço 2



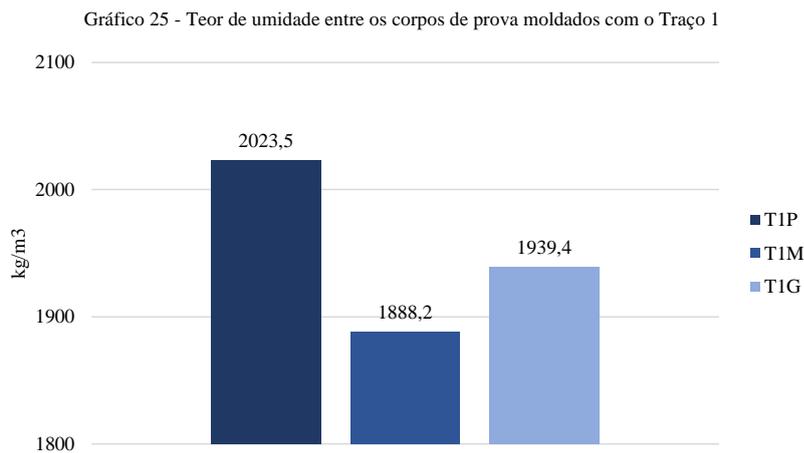
Para o Traço 3 é possível visualizar no Gráfico 24 que os corpos de prova maiores foram os que mostraram valores mais baixos de fluxo cumulativo de umidade em função do tempo. Esses resultados mais baixos do que os obtidos pelo corpo de prova menor, de aproximadamente 35 kg/m<sup>2</sup> ao final do período de análise.

Gráfico 24 - Comparação entre os resultados dos corpos de prova de diferentes áreas moldados com o traço 3

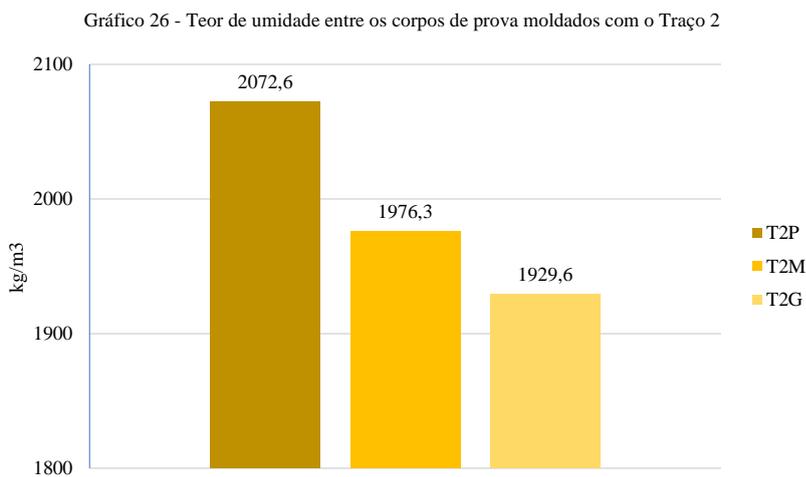


Para melhor visualização do desempenho das amostras também foram realizadas análises dos teores de umidade médios para cada tipo de traço em função das dimensões das bases das amostras. No Gráfico 25 é possível visualizar os resultados obtidos pelos corpos de prova do Traço 1 nas três configurações das bases. É possível observar que os corpos de prova médios tiveram resultados mais baixos de teor de umidade do que os outros dois, sendo a

amostra de base pequena a que apresentou o valor mais alto dentre as três analisadas, igual a 2023,5 kg/m<sup>3</sup>.

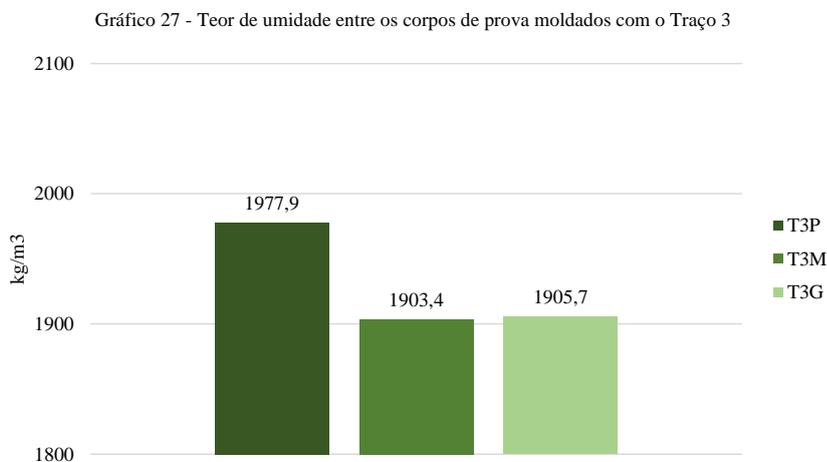


Os resultados observados para o Traço 2 mostraram que os corpos de prova de maior dimensão de base foram os que tiveram o menor teor de umidade dentre as três diferentes áreas analisadas, sendo igual a 1929,6 kg/m<sup>3</sup>. O Gráfico 26 também permite verificar que os corpos de prova de menor área da base foram os que obtiveram o maior valor do teor de umidade ao término do período de análise, sendo igual a 2072,6 kg/m<sup>3</sup>.



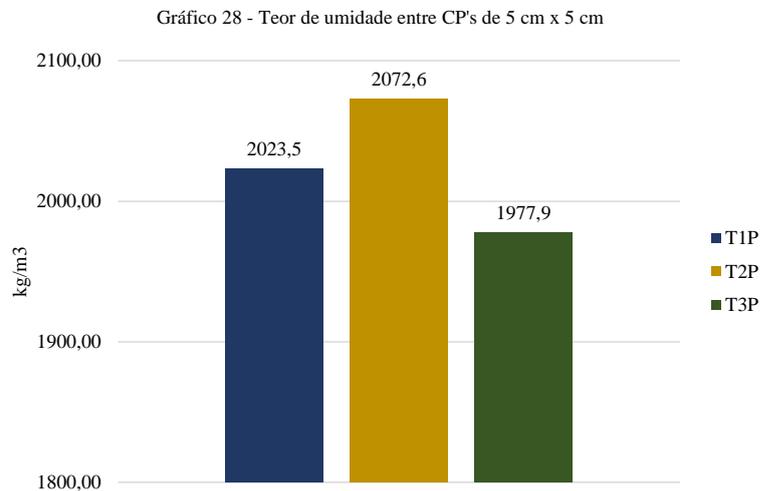
O Gráfico 27 explicita os resultados obtidos para os corpos de prova moldados com o

contato do tipo perfeito nas três dimensões de base estudadas, e fazendo uso da mistura do Traço 3. É possível verificar que para esse traço os resultados obtidos pelos corpos de prova médio e grande, tiveram valores muito próximos iguais a  $1903,4 \text{ kg/m}^3$  e  $1905,7 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. Já a amostra de área de base pequena obteve resultados de teor de umidade para o Traço 3 igual a  $1977,9 \text{ kg/m}^3$ .

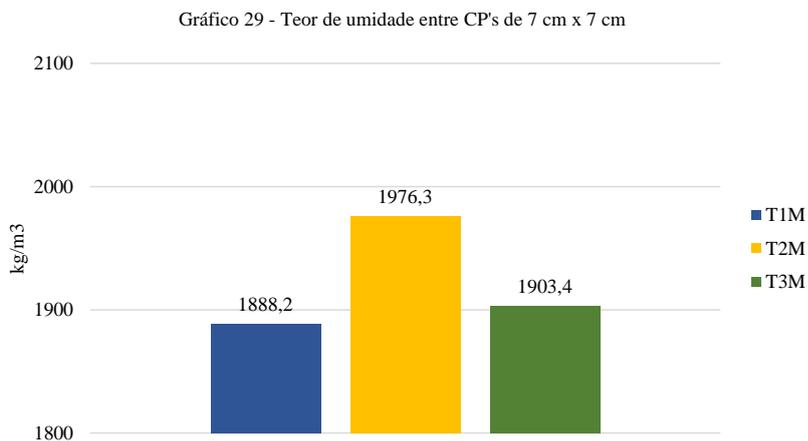


Outro ponto de vista pode ser adotado através da comparação dos três tipos de traço em relação a uma única área da base, para que assim se possa ter uma visualização do teor de umidade das amostras em função de suas dimensões para uma mesma mistura.

O Gráfico 28 traz uma análise para os corpos de prova com dimensões de base iguais a  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , moldados com os três traços estudados, e sob o tipo de contato perfeito. É possível verificar que o Traço 3 obteve o menor resultado para o teor de umidade ao término das 72 h, igual a  $1977,9 \text{ kg/m}^3$ . O Traço 2 teve resultado igual a  $2072,6 \text{ kg/m}^3$ , sendo este o maior valor dentre os três traços analisados para a mesma dimensão de base.



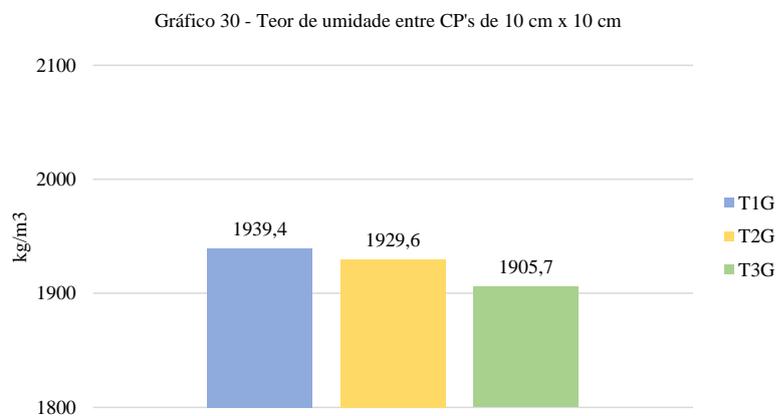
Um comportamento diferente foi observado na análise dos corpos de prova médios, de dimensões de base iguais a 7 cm x 7 cm. O Traço 1 mostrou menor valor de teor de umidade no período, igual a 1888,2 kg/m<sup>3</sup>, sendo esse resultado inferior aos 1903,4 kg/m<sup>3</sup> registrado para o traço 3. O maior valor observado para os corpos de prova médios sob essa análise foi das amostras moldadas com o Traço 2, sendo igual a 1976,3 kg/m<sup>3</sup>, conforme pode ser visto no Gráfico 29.



O teor de umidade observado para os corpos de prova grandes, de dimensões de base igual a 10 cm x 10 cm, está exposto no Gráfico 30, e permite a visualização dos resultados para

essas amostras de área da base maior em relação aos três tipos de traços e sob o contato perfeito. Verifica-se então que o Traço 3 obteve o menor resultado de teor de umidade igual a 1905,7 kg/m<sup>3</sup>, por outro lado, o maior valor observado foi do Traço 1 igual a 1939,4 kg/m<sup>3</sup>.

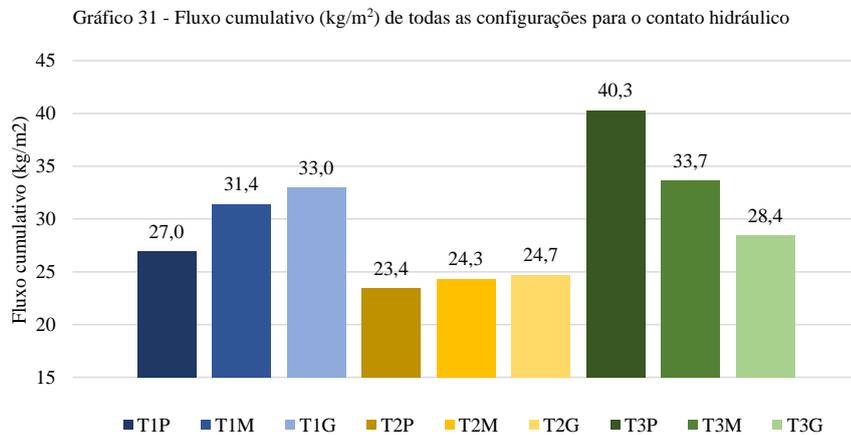
Diferente das últimas duas análises demonstradas para os corpos de prova médios e pequenos, no caso das amostras grandes verificou-se que o Traço 2 não obteve maior teor de umidade, tendo registrado 1926,6 kg/m<sup>3</sup>.



#### 4.4 COMPARATIVO ENTRE CONTATO HIDRÁULICO E CONTATO PERFEITO

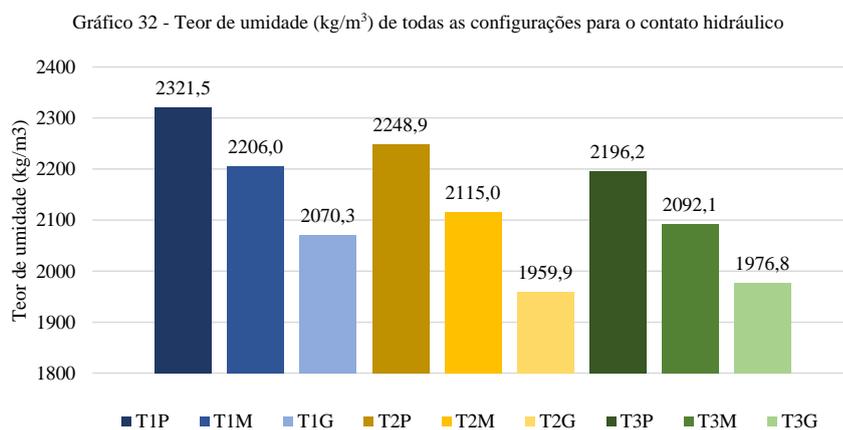
Um resumo dos resultados obtidos nas análises do fluxo cumulativo de umidade dos corpos de prova moldados com o contato hidráulico, para os três diferentes traços e dimensões das áreas das bases, está exposto no Gráfico 31. É possível verificar que o maior valor de umidade por fluxo cumulativo foi de 40,3 kg/m<sup>2</sup> e foi observado para as amostras do Traço 3 e com área pequena, de dimensões 5 cm x 5 cm.

Fica demonstrado que o valor mais baixo foi obtido pelas amostras do Traço 2 e também com a menor área da base, sendo igual a 23,4 kg/m<sup>2</sup>, o que corresponde a pouco mais da metade do que foi verificado pelo espécime pequeno e do traço 3. O Traço 1 mostrou resultados mais baixos do fluxo cumulativo de umidade que em comparação aos valores observados no Traço 3.



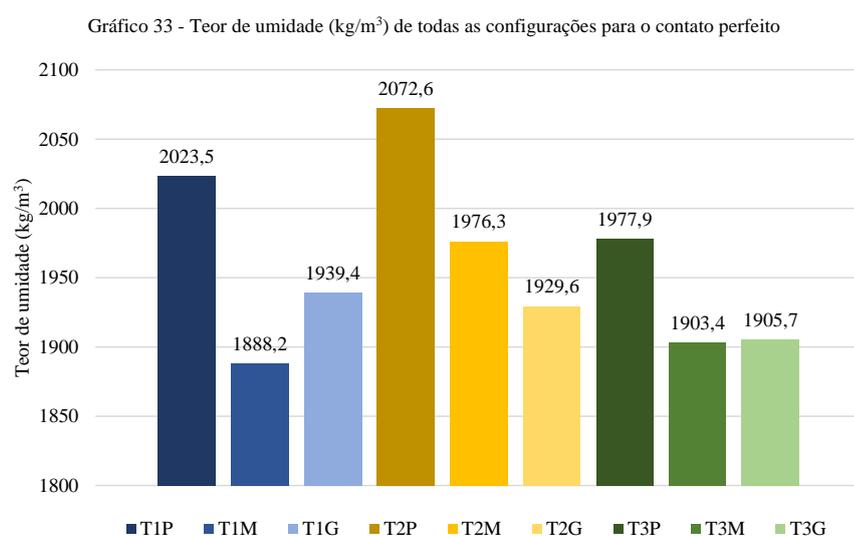
Ao analisar o teor de umidade médio para cada dimensão de base dos corpos de prova e os três tipos de traços, é possível observar que o maior valor obtido foi das amostras moldadas com o Traço 1 e com área da base pequena. Para essa amostra o teor de umidade médio foi de  $2321,5 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Já o menor valor observado foi do Traço 2 moldado com a maior área da base, de  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ , sendo aproximadamente igual a  $1960 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Os resultados obtidos pelo Traço 3 também apresentaram significativos dados relativamente baixos, principalmente para as amostras de maior dimensão da base, conforme pode ser visto no Gráfico 32.



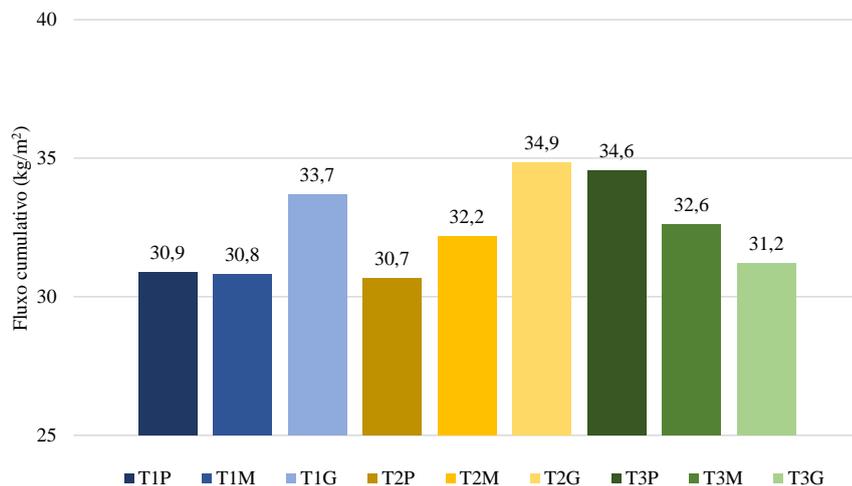
Ao analisar todas as nove configurações de amostras sob o aspecto do contato perfeito, é possível visualizar quais obtiveram o maior e menor valores como resultados. O Gráfico 33

permite verificar que a amostra pequena moldada com o Traço 2 foi a que obteve o maior resultado de teor de umidade dentro o estudo, igual a 2072,6 kg/m<sup>3</sup>. E, que o menor resultado foi verificado para o corpo de prova médio confeccionado com o Traço 1 sendo igual a 1888,2 kg/m<sup>3</sup>.



O fluxo cumulativo de umidade no período estudado de 72 h para as nove configurações de amostras pode ser visualizado no Gráfico 34 e permite observar desempenhos próximos para alguns casos de um mesmo traço, e também contrários ou inversos entre outros dois. É possível verificar que os corpos de prova moldados com o Traço 1 obtiveram valores para baixos e bastante aproximados para as amostras pequena e média, sendo iguais a 30,9 kg/m<sup>3</sup> e 30,8 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

No Traço 2 pode-se verificar que o menor resultado de teor de umidade foi observado no corpo de prova área menor, igual a 30,7 kg/m<sup>3</sup>, sendo este também o menor valor dentre as nove configurações de amostras analisadas sob o contato perfeito. O Traço 3, ao contrário do anterior citado, mostrou resultados mais baixos para os modelos grandes, porém, ainda superiores aos vistos nos outros dois traços.

Gráfico 34 - Fluxo cumulativo (kg/m<sup>2</sup>) de todas as configurações para o contato perfeito

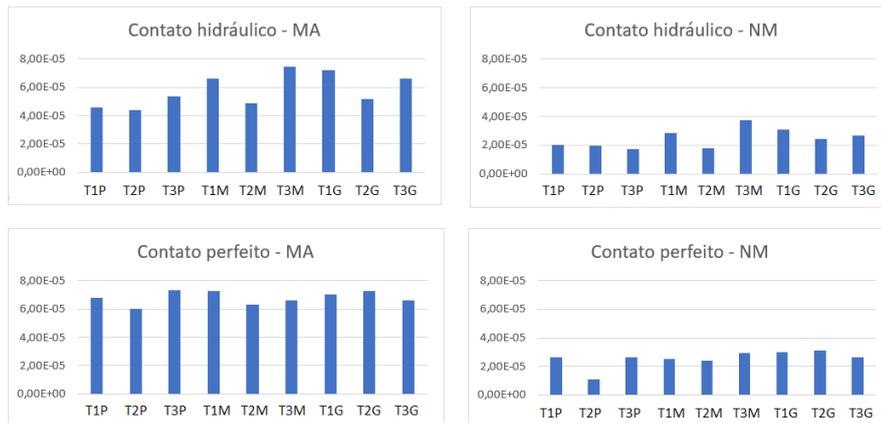
#### 4.5 VALORES DE RESISTÊNCIA

Utilizando as metodologias descritas na Seção 3.4, foram calculados os valores de resistência hídrica para todas as configurações de moldagem dos corpos de prova, utilizando as duas metodologias. A Tabela 9 e a Figura 11 trazem os resultados do desenvolvimento dos cálculos, tanto para o contato hidráulico quanto para o contato perfeito.

Tabela 9 – Resistência hídrica para as nove configurações dos corpos de prova em relação às dimensões das bases e dos traços, e também do tipo de contato da interface

<b>Contato</b>	<b>Dimensões</b>	<b>Traço</b>	<b>Resistência Hídrica - MA</b>	<b>Resistência Hídrica - NM</b>
Contato hidráulico	5cm x 5cm	1	$4,60 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-5}$
		2	$4,39 \times 10^{-5}$	$1,98 \times 10^{-5}$
		3	$5,35 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-5}$
	7cm x 7cm	1	$6,63 \times 10^{-5}$	$2,85 \times 10^{-5}$
		2	$4,86 \times 10^{-5}$	$1,77 \times 10^{-5}$
		3	$7,46 \times 10^{-5}$	$3,74 \times 10^{-5}$
	10cm x 10cm	1	$7,19 \times 10^{-5}$	$3,11 \times 10^{-5}$
		2	$5,16 \times 10^{-5}$	$2,41 \times 10^{-5}$
		3	$6,61 \times 10^{-5}$	$2,66 \times 10^{-5}$
Contato perfeito	5cm x 5cm	1	$6,79 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-5}$
		2	$6,02 \times 10^{-5}$	$1,10 \times 10^{-5}$
		3	$7,36 \times 10^{-5}$	$2,66 \times 10^{-5}$
	7cm x 7cm	1	$7,28 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$
		2	$6,30 \times 10^{-5}$	$2,39 \times 10^{-5}$
		3	$6,63 \times 10^{-5}$	$2,92 \times 10^{-5}$
	10cm x 10cm	1	$7,00 \times 10^{-5}$	$3,00 \times 10^{-5}$
		2	$7,28 \times 10^{-5}$	$3,11 \times 10^{-5}$
		3	$6,64 \times 10^{-5}$	$2,62 \times 10^{-5}$

Figura 11 – Comparativo entre os valores das resistências hídricas.



Dentre os valores calculados para as resistências hídricas das nove configurações de moldagem dos corpos de prova, e para ambos os tipos de contato da interface, podem ser destacados os menores e maiores resultados. A amostra T3M, ou seja, moldada com o Traço 3 e possuindo dimensões médias de 7 cm x 7 cm, sob tipo de contato hidráulico, foi a que obteve o resultado mais alto de resistência hídrica nas duas metodologias de cálculo, sendo igual a  $7,46 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$  com a metodologia anterior e  $3,74 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$  com a nova metodologia. Já o menor valor observado foi da amostra T2P, ou seja, moldada com o Traço 2 e possuindo dimensões pequenas de área da base iguais a 5 cm x 5 cm. Contudo, quando utilizada a metodologia anterior de cálculo, o menor valor foi registrado sob o tipo de contato hidráulico, e quando utilizada a nova metodologia, o contato perfeito obteve o menor resultado. Esse corpo de prova registrou uma resistência hídrica igual a  $4,39 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$  (MA) e  $1,10 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$  (NM).

Além disso, é possível perceber que utilizando a nova metodologia os valores de resistência são 2 a 3 vezes menores que os valores calculados com a metodologia anterior. Porém, se tratando de valores muito pequenos, eles mantêm a mesma ordem de grandeza, e portanto são valores matematicamente próximos.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo proporcionou a visualização do efeito da resistência da interface em corpos de prova de alvenaria de tijolo cerâmico e argamassa, para o transporte de umidade capilar. A partir das análises dos resultados obtidos com o programa experimental é possível concluir que para ambos os casos analisados, ou seja, tanto para o contato perfeito quanto para o contato hidráulico a resistência hídrica possui valores muito próximos, que variam entre  $4,0 \times 10^{-5}$  e  $8,0 \times 10^{-5}$  na primeira metodologia de cálculo e entre  $1,0 \times 10^{-5}$  e  $4,0 \times 10^{-5}$  na segunda metodologia de cálculo, havendo variação importante entre as metodologias, ainda que estejam na mesma ordem de grandeza.

Quando comparados os traços em relação às áreas das bases, ocorre a diminuição do teor de umidade e do fluxo do Traço 1 para o Traço 2, sugerindo que os corpos de prova moldados com o Traço 1 absorvem mais água que aqueles moldados com o Traço 2. Contudo, quando comparados os Traços 2 e 3, há um aumento no teor de umidade e no fluxo cumulativo nos corpos de prova indicando que o Traço 3 absorve mais água que o Traço 2. Era esperado que quanto maior fossem as proporções para o traço da argamassa, maior seria o transporte de umidade e a quantidade de água absorvida.

Sob a análise apenas do contato hidráulico, ou seja, naquele que há interpenetração dos poros, os espécimes de áreas da base menores, de 5 cm x 5 cm, assim como os de área igual a 7 cm x 7 cm, tendo os corpos de prova sido moldados com o traço 3 foram os que mais absorveram água. Desempenho diferente do observado para os corpos de prova de base igual a 10 cm x 10 cm. Nos corpos de prova com maior área da base o traço fraco (Traço 3) absorve menos água que o traço forte (traço 1), porém transporta mais água que o traço médio (Traço 2).

Quando comparados entre as diferentes áreas das bases dos corpos de prova para cada traço, em todos os casos a absorção (teor de umidade) de água aumenta quando a área é aumentada. Em todos os casos, o traço médio (Traço 2) é o que possui menor absorção e menores fluxos.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7171: Bloco cerâmico para alvenaria**. Rio de Janeiro: 1992a.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro: 1998.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8042: Bloco cerâmico para alvenaria - Formas e dimensões**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 1992b.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, RJ: 2016.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, RJ: 2005a.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos. Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: 2005b. Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br).
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro: 2013.
- ALVES, Carlos Eduardo Teobaldo; TRINDADE, Danielle Cecília de Andrade Coutinho. **Custos da qualidade: Análise da estrutura e componentes dos custos da qualidade**. [S. l.: s. n.], 2012.
- AZEVEDO, Antonio Augusto Costa. **Interface influence on moisture transport in building components**. 2019. Porto, 2019. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>.
- BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. v. 2
- BROCKEN, H. J. P.; ADAN, O. C. G.; PEL, L. Moisture transport properties of mortar and mortar joint: a NMR study. **Heron**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 55–69, 1997.
- CHAROLA, A. Elena. Salts in the deterioration of porous materials: An overview. **Journal of the American Institute for Conservation**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 327–343, 2000.
- DEPRAETERE, W; CARMELIET, J; HENS, H. **Moisture transfer at interfaces of porous materials: measurements and simulations**. [S. l.: s. n.], 2000.
- DERLUYN, Hannelore; JANSSEN, Hans; CARMELIET, Jan. Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 9, p. 3685–3693, 2011.

FREITAS, Vasco Manuel Araújo Peixoto. **Transferência de humidade em paredes de edifícios - análise do fenómeno de interface**. 1992. Porto, 1992.

FREITAS, V P; ABRANTES, V; CRAUSSET, P. Moisture migration in building walls - Analysis of the interface phenomena. **Building and Environment**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 99–108, 1996.

FREITAS, Vasco Peixoto; GUIMARÃES, Ana Sofia. Tratamento da humidade ascensional no património histórico. **Revista ALCONPAT**, [s. l.], v. 4, p. 1–12, 2014.

GONÇALVES, Teresa Cláudio Diaz. **Salt crystallization in plastered or rendered walls**. 2007. Lisboa, 2007.

GUIMARÃES, A. S. *et al.* Interface influence on moisture transport in buildings. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 480–488, 2018.

HENTGES, Gustavo. **Influência da porosidade dos tijolos cerâmicos no surgimento de patologias devido a umidade ascendente**. 2014. Alegrete/RS, 2014.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 15148: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion**. Performance hydrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment-Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai) ISO 15148:2002 <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5ab182e2-a7ad-428c-87e1-40fe97b42300/iso-15148-2002>. Geneva: 2002. Disponível em: [www.iso.org](http://www.iso.org).

IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry. **Recommendations for the characterization of porous solids**. [S. l.: s. n.], 1994.

JANSSEN, H.; DERLUYN, H.; CARMELIET, J. Moisture transfer through mortar joints: A sharp-front analysis. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 1105–1112, 2012.

REGO, Tiago de Sousa Magalhães Resende. **Efeito de soluções aquosas salinas nos processos de embebição de paredes com múltiplas camadas**. 2014. Porto, 2014. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>.

RJUNIERS, L. A. *et al.* Experimental evidence of crystallization pressure inside porous media. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 94, n. 7, 2005.

RILEM, Rilem Technical Committees. TC 127-MS: Tests for masonry materials and structures. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 31, p. 2–19, 1998.

STRAUBE, John F. Moisture in buildings. **ASHRAE Journal**, [s. l.], 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271706272>.

TURNER, Fred. Moisture and Mold. **ASHRAE Journal**, [s. l.], 2002.

VAKIFAHMETOGLU, Cekdar; SEMERCI, Tugce; SORARU, Gian Domenico. Closed porosity ceramics and glasses. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 103, n.

5, p. 2941–2969, 2020.

VERECKEN, Evy; ROELS, Staf. Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 41, p. 697–707, 2013.