



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RÔMULO DE LIMA SOUSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A UMIDADE
ASCENSIONAL**

RUSSAS
2020

RÔMULO DE LIMA SOUSA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A UMIDADE
ASCENSIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes
Teixeira Mesquita

RUSSAS

2020

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

S698s Sousa, Rômulo De Lima.
 Simulação numérica dos fatores que influenciam a umidade ascensional / Rômulo De Lima Sousa. – 2020.
 58 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
 Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2020.
 Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

 1. Umidade ascensional. 2. WUFI-2D. 3. Simulação numérica . I. Título.

CDD 620

RÔMULO DE LIMA SOUSA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A UMIDADE
ASCENSIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Mylene de Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio e amparo durante o curso.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita por aceitar conduzir o meu trabalho.

A todos os meus professores do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas pela excelência da qualidade técnica de cada um.

A todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

“O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso sem que se perca o entusiasmo. ”

Winston Churchill

RESUMO

A umidade é uma das principais causas do surgimento de danos nas edificações, principalmente a umidade proveniente do solo que, por capilaridade, adentra os elementos da construção, a qual denomina-se umidade ascensional. Entender como ocorre esse fenômeno é de grande importância para a construção civil, principalmente quando se trata de edificações históricas onde não foram empregadas técnicas de corte hídrico durante a construção. Vários são os fatores que influenciam no fenômeno da umidade ascensional dentre eles podemos citar a espessura da parede, as propriedades dos materiais, as condições climáticas e a utilização de revestimentos. A fim de verificar a maneira como esses fatores influenciam a altura de frente úmida, utilizou-se o programa de cálculo WUFI-2D v. 4.2 para realizar simulações numéricas da umidade ascensional. Os resultados das simulações mostraram que o aumento da espessura da parede, da porosidade dos materiais e da umidade relativa do ambiente geram uma elevação da altura de frente úmida, assim como a adoção de revestimentos mais impermeáveis provocam uma frente úmida mais elevada se comparada com a utilização de revestimentos mais porosos.

Palavras-chave: Umidade ascensional. WUFI-2D. Simulação numérica.

ABSTRACT

Moisture is one of the main causes of damage to buildings, especially moisture from the soil which, through capillarity, enters the building elements, which is called ascension moisture. Understanding how this phenomenon occurs is of great importance for civil construction, especially when it comes to historic buildings where water cutting techniques were not used during construction. There are several factors that influence the phenomenon of rising humidity, among which we can mention the properties of the materials, depending on the climatic conditions and the use of coverings. In order to check how these factors influence the height of the wet front, use the calculation program WUFI-2D v. 4.2 to perform numerical simulations of rising humidity. The results of the increased simulations that the increase in the wall thickness, the porosity of the materials and the relative humidity of the environment generate an increase in the height of the wet front, as well as the adoption of more impermeable coatings cause a higher wet front if compared with the use of more porous coatings.

Keywords: Ascending humidity. WUFI-2D. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento higroscópico em função da umidade relativa	17
Figura 2 – Fenômeno da capilaridade.....	18
Figura 3 – Curva de pressão capilar.....	18
Figura 4 – Umidificação por águas freáticas e superficiais.....	19
Figura 5 – Umidade Ascensional em paredes externas e internas.....	20
Figura 6 – Influência das condições climáticas na progressão da umidade.....	21
Figura 7 – Influência da insolação na progressão da umidade em alvenarias.....	21
Figura 8 – Porosidade aberta.....	23
Figura 9 – Porosidade fechada.....	23
Figura 10 – Umidade Ascensional em paredes com diferentes espessuras.....	23
Figura 11 – Influência da impermeabilização externa na umidade ascensional.....	24
Figura 12 – Introdução de camadas impermeabilizantes em alvenaria.....	25
Figura 13 – Aplicação de barreira química através da difusão.....	25
Figura 14 – Influência da redução da seção absorvente na umidade ascensional.....	26
Figura 15 – Princípio de funcionamento de um sistema de ventilação da base das paredes	27
Figura 16 – Tela inicial.....	29
Figura 17 – Aba de geometria.....	30
Figura 18 – Janela para definição da malha numérica.....	31
Figura 19 – Aba para definição dos materiais.....	32
Figura 20 – Base de dados dos materiais.....	33
Figura 21 – Janela para entrada das condições de contorno.....	34
Figura 22 – Janela para configuração de clima nas superfícies.....	35
Figura 23 – Janela para configuração de clima nas superfícies.....	36
Figura 24 – Janela de processo de cálculo.....	37

Figura 25 – Resultados apresentados em animação 2D.....	38
Figura 26 – Resultados apresentados por meio de gráficos.....	39
Figura 27 – Configuração geométrica.....	41
Figura 28 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação.....	44
Figura 29 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação.....	46
Figura 30 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação.....	48
Figura 31 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação.....	51
Figura 32 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Altura da frente úmida pela espessura da parede	45
Gráfico 2 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais	47
Gráfico 3 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais	50
Gráfico 4 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais	52
Gráfico 5 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais	54

–

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de clima utilizada	40
Tabela 2 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado	41
Tabela 3 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado	42
Tabela 4 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado	42
Tabela 5 – Configuração de clima utilizada	43
Tabela 6 – Configuração de clima utilizada	43
Tabela 7 – Altura da frente úmida	45
Tabela 8 – Altura da frente úmida	47
Tabela 9 – Altura da frente úmida	49
Tabela 10 – Porosidade dos materiais utilizados como revestimento	49
Tabela 11 – Altura da frente úmida	51
Tabela 12 – Altura da frente úmida	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Mecanismos de fixação da umidade	16
2.1.1	<i>Higroscopicidade</i>	17
2.1.2	<i>Capilaridade</i>	17
2.1.3	<i>Condensação</i>	18
2.2	Umidade Ascensional	19
2.3	Fatores que influenciam na umidade ascensional	20
2.3.1	<i>Condições climáticas do ambiente</i>	20
2.3.2	<i>Insolação</i>	21
2.3.3	<i>Presença de sais</i>	21
2.3.4	<i>Porosidade e porometria</i>	22
2.3.5	<i>Espessura da parede e natureza dos materiais de revestimento</i>	23
2.4	Técnicas de tratamento	24
2.4.1	<i>Execução de corte hídrico</i>	24
2.4.2	<i>Redução da seção absorvente</i>	26
2.4.3	<i>Introdução de tubos de arejamento</i>	26
2.4.4	<i>Ventilação da base das paredes</i>	26
2.5	Apresentação do programa de cálculo WUFI-2D	27
2.5.1	<i>Dados</i>	28
2.5.2	<i>Propriedades dos materiais</i>	28
2.5.3	<i>Condições climáticas</i>	28
2.5.4	<i>Condições iniciais</i>	29
2.5.5	<i>Utilização do software WUFI-2D</i>	29
2.5.5.1	<i>Tela principal</i>	29
2.5.5.2	<i>Geometria dos elementos</i>	30
2.5.5.3	<i>Definição da malha numérica</i>	31
2.5.5.4	<i>Escolha dos materiais</i>	31
2.5.5.5	<i>Condições iniciais</i>	33
2.5.5.6	<i>Condições de contorno</i>	33

2.5.5.7	<i>Parâmetros computacionais</i>	35
2.5.5.8	<i>Processo de cálculo</i>	36
2.5.5.9	<i>Resultados</i>	37
2.5.6	<i>Limitações do programa</i>	39
3	METODOLOGIA	40
3.1	Simulação numérica utilizando o software WUFI-2D	40
3.1.1	<i>Influência da espessura da parede na umidade ascensional</i>	40
3.1.2	<i>Influência do material utilizado</i>	41
3.1.3	<i>Influência dos revestimentos na altura da frente úmida</i>	42
3.1.4	<i>Influência das condições climáticas</i>	43
4	RESULTADOS	44
4.1	Influência da espessura da parede na umidade ascensional	44
4.2	Influência do material utilizado	46
4.3	Influência dos revestimentos na altura da frente úmida	48
4.4	Influência das condições climáticas	50
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Tida como uma das principais causas do surgimento de danos nas construções, a umidade apresenta-se de várias formas como condensações superficiais e internas, fuga nas instalações, umidade na construção e capilaridade (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Ao longo da vida útil de uma edificação a umidade pode ser observada em diversas fases. De fato, a água está presente desde o início da construção e faz parte do processo de fabricação de argamassas e do concreto (SALOMÃO, 2012). A água continua interagindo com a edificação durante o período de utilização, essa interação pode ocorrer por meio da umidade do ar, das precipitações e da umidade presente no solo que pode ser transportada para as fundações e alvenarias.

A umidade proveniente do solo que, por capilaridade, migra para os elementos de construção, denomina-se umidade ascensional. Sua ação pode ocasionar deterioração dos materiais de construção com consequências graves para a utilização do edifício (SILVA, 2013).

Diversos são os fatores que influenciam na umidade ascensional e dentre eles estão as condições climáticas, as propriedades dos materiais, a insolação, a espessura da parede, a presença de sais e os materiais utilizados para o revestimento.

O tratamento quanto a este problema ocorre de maneira diferente em construções novas, nas quais é possível realizar um corte hídrico e técnicas mais modernas de impermeabilização durante a construção; que em construções antigas e edifícios históricos, nos quais não é possível impor barreiras no contato solo/construção (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Embora a complexidade de se obter explicações científicas sobre os fenômenos da umidade ascensional, é de grande interesse o seu entendimento, visto a necessidade do desenvolvimento de regras qualitativas e quantitativas para a correção e tratamentos das construções frente a umidade. Quando se trata de edifícios históricos esses estudos se tornam ainda mais relevantes, visto a necessidade de técnicas menos invasivas para preservar os elementos patrimoniais (SILVA, 2013).

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral simular os fatores que condicionam a umidade ascensional por meio do programa de simulação WUFI-2D versão 4.2. Os objetivos específicos são apresentados abaixo:

- Verificar a influência da espessura da parede na umidade ascensional;
- Verificar a influência das propriedades dos materiais na altura de frente úmida;
- Verificar a influência dos materiais adotados para o revestimento na altura de frente úmida;
- Verificar o efeito da variação das condições climáticas na umidade ascensional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na construção civil, inúmeras são as técnicas desenvolvidas ao longo dos anos a fim de se obter um melhor desempenho das estruturas com o mínimo de recursos necessários. A concepção de uma estrutura durável implica a adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à construção um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção.

Diante desse cenário, observa-se que parte dos danos que emergem na edificação têm origem ou podem ser agravados pela presença de umidade nos elementos da construção. Assim sendo, é de grande importância o estudo acerca de como as estruturas se comportam com a presença da água em seus elementos, além das formas de evitar que essas manifestações patológicas surjam, seja através de estudos em edificados já afetados pela umidade, seja através de ensaios laboratoriais ou com o recurso a ferramentas numéricas computacional.

Dentre os elementos de uma edificação, as alvenarias são os elementos mais suscetíveis e prejudicados com o surgimento de manifestações patológicas, pois possuem maior área exposta às intempéries, além de serem constituídas de diversas camadas heterogêneas, proporcionando assim uma maior probabilidade de surgimento de uma anomalia devido aos inúmeros materiais utilizados.

A análise experimental e a modelagem completa do movimento da água no interior das alvenarias apresentam enormes dificuldades, principalmente devido a fatores como a complexidade da composição das paredes modernas devido à utilização de várias camadas com diversos materiais com diferentes características, a solicitação climática no interior e exterior dos edificados variável ao longo do tempo e dependente de um elevado número de parâmetros, além da difícil teorização do fenômeno físico (FREITAS, 1992).

2.1 Mecanismos de fixação da umidade

Segundo Teixeira (2007), do ponto de vista físico, consideram-se que existem três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: higroscopicidade, condensação e capilaridade.

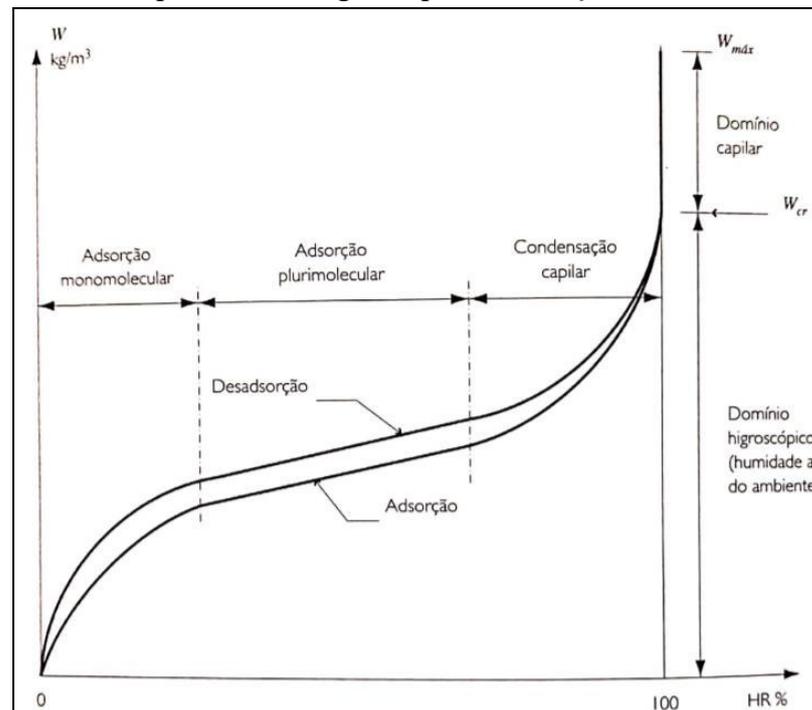
2.1.1 Higroscopicidade

O termo higroscopicidade trata da capacidade de um material absorver água em seu interior. São divididos em dois grandes grupos:

- **Materiais Higroscópicos:** aqueles em que a quantidade de água absorvida é relativamente importante, ou seja, seu teor de umidade varia facilmente de acordo com a variação da umidade externa.
- **Materiais não higroscópicos:** aqueles em que a quantidade de água absorvida é mínima, ou seja, sua umidade se mantém praticamente constante, independentemente da variação da umidade do ambiente exterior.

Segundo Freitas (1992), os materiais comumente utilizados na construção civil são higroscópicos, fazendo com estes já tenham uma predisposição ao acúmulo de água em seus interiores. O fenômeno é graficamente representado na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento higroscópico em função da umidade relativa



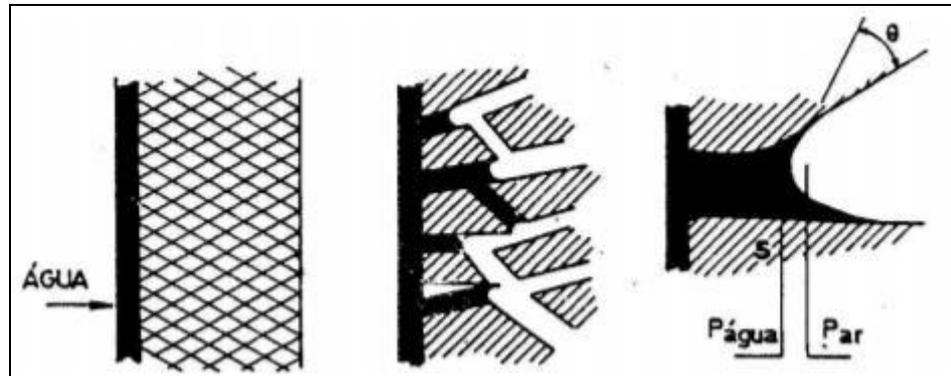
Fonte: Freitas (1992), p. 16.

2.1.2 Capilaridade

A capilaridade ocorre devido a porosidade do material, que quando em contato com a água estabelece um gradiente de pressões na interface líquido-gás, designado por

pressão capilar.

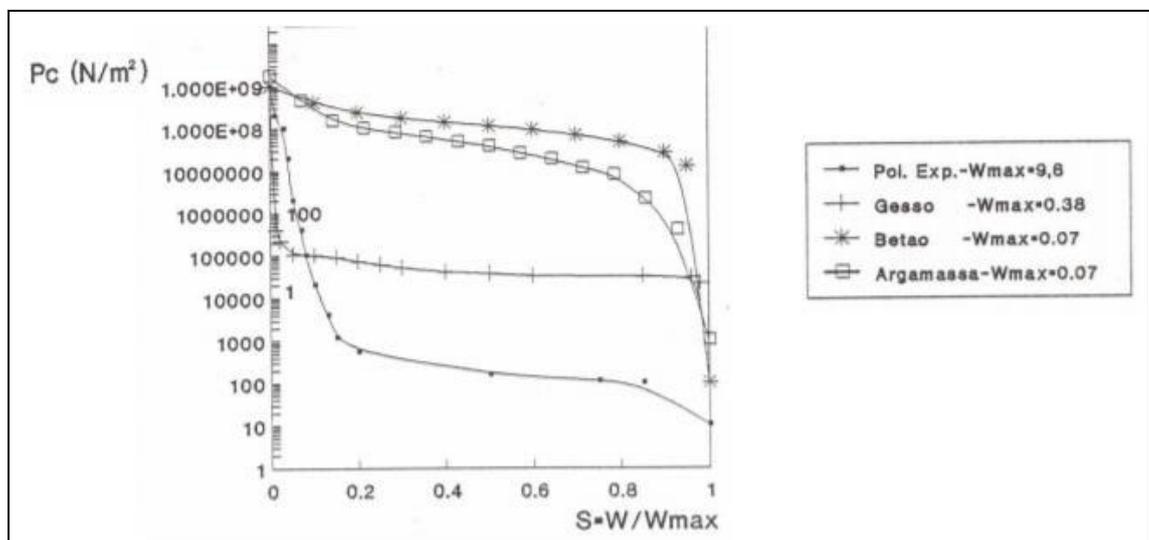
Figura 2– Fenômeno da capilaridade



Fonte: Teixeira (2007), p.9.

O desenvolvimento da curva de pressão capilar depende da lei de distribuição, do raio dos poros e da sua variação. Segundo Freitas (1992), a sucção diminui conforme o teor de umidade aumenta, chegando a ser nulo para um teor de umidade igual ao teor de umidade máximo.

Figura 3 – Curva de pressão capilar



Fonte: Teixeira (2007), p. 10.

2.1.3 Condensação

Segundo Salomão (2012), a condensação é o acúmulo de massa líquida formada pelo vapor de água presente no ar nos poros do material quando a pressão de vapor é maior do

que a pressão de vapor de equilíbrio correspondente à temperatura que se encontra o elemento.

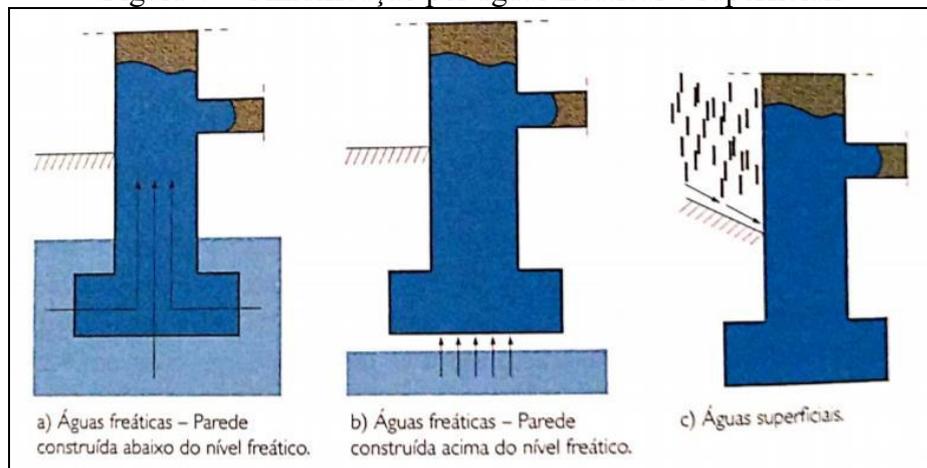
Os três mecanismos elencados podem agir em conjunto, acelerando o processo de aumento da umidade dos materiais, o que torna ainda mais complexa a modelização do movimento da água no interior de paredes (FREITAS, 1992).

2.2 Umidade Ascensional

Segundo Alfano *et al.* (2006 *apud* SOCOLOSKI, 2015), umidade ascensional é definida como um fluxo de água no sentido vertical direcionado para cima em uma parede permeável. Geralmente essa água é proveniente do solo que, devido à elevada porosidade dos materiais de construção, sobe através da capilaridade, na ausência de qualquer barreira que iniba este deslocamento (FREITAS, 1992).

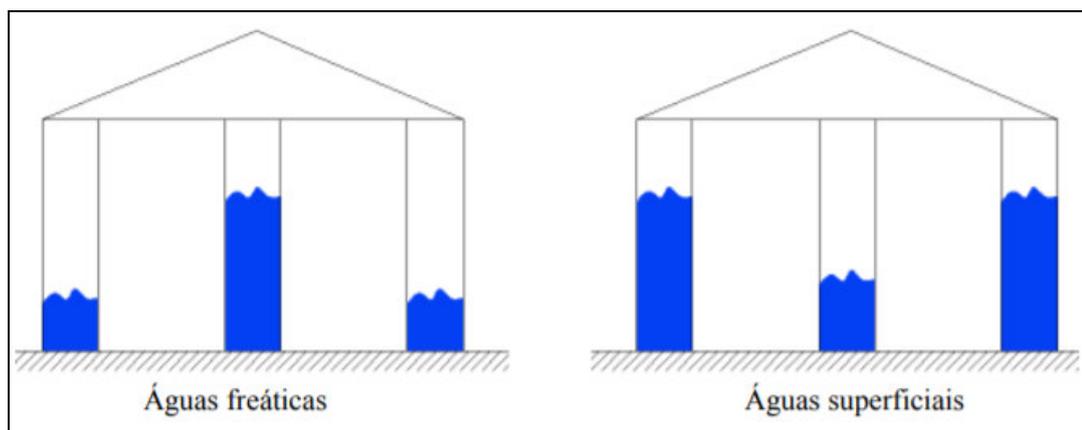
Segundo Freitas (1992), a umidade ascensional possui duas fontes primordiais: águas freáticas e águas superficiais. No primeiro caso, as manifestações patológicas provenientes da umidade apresentam-se mais estáveis ao longo do ano devido ao fato da fonte de água estar ativo constantemente. Neste caso, a altura das manchas de umidade é maior nas paredes internas do que nas paredes externas pelo fato da evaporação ser maior do lado de fora. Já no segundo caso, por se tratar geralmente de situações excepcionais, as manchas podem apresentar alturas diferentes ao longo do ano, sendo comumente mais elevadas no lado externo das paredes por estarem em contato direto com a água superficial.

Figura 4 – Umidificação por águas freáticas e superficiais



Fonte: Freitas (1992), p. 24.

Figura 5– Umidade Ascensional em paredes externas e internas



Fonte: Santos (2012) p. 54.

2.3 Fatores que influenciam na umidade ascensional

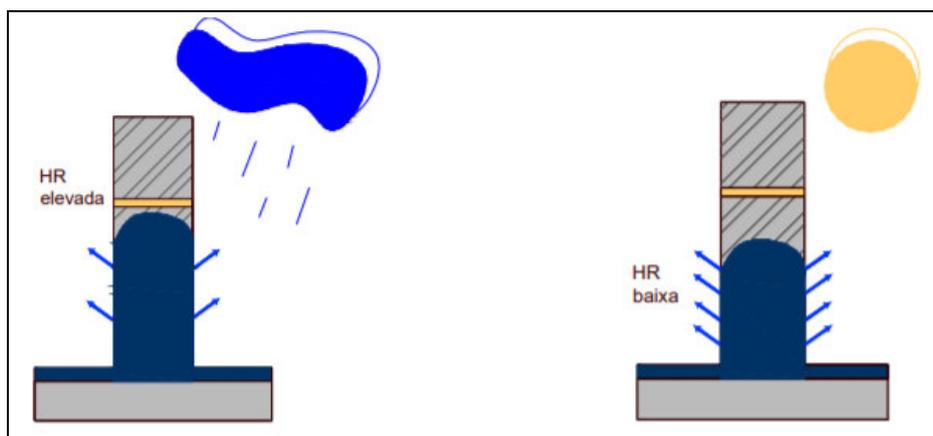
Segundo Freitas, Torres e Guimarães (2008), a umidade ascensional depende dos seguintes fatores:

- Condições climáticas do ambiente;
- Insolação;
- Presença de sais;
- Porosidade e porometria dos materiais;
- Espessura da parede;
- Natureza dos materiais de revestimento

2.3.1 Condições climáticas do ambiente

As condições climáticas do ambiente ao qual está inserido o edificado têm uma importante influência no nível atingido pela umidade ascensional pois condicionam o processo de secagem da alvenaria. Em locais com umidade relativa alta, a evaporação da água presente nas alvenarias acontecerá de forma menos intensa resultando em uma maior progressão da frente úmida. Já em locais com umidade relativa mais baixa, a evaporação será máxima e a altura da progressão da umidade será menor (TEIXEIRA, 2007).

Figura 6 – Influência das condições climáticas na progressão da umidade

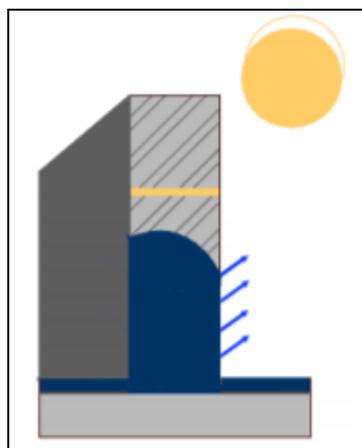


Fonte: Teixeira (2007), p. 19.

2.3.2 Insolação

A insolação provoca uma alteração na temperatura da face externa das paredes que, por consequência, alteram o processo de secagem. Dessa forma, observa-se diferentes alturas de progressão da umidade ascensional de acordo com a orientação geográfica da alvenaria.

Figura 7 – Influência da insolação na progressão da umidade em alvenarias



Fonte: Teixeira (2007), p. 20.

2.3.3 Presença de sais

Durante o processo de subida da água presente no solo através da capilaridade, é natural que os sais presentes no terreno sejam transportados juntos. Porém, ao chegar na superfície das paredes, a água evapora enquanto os sais cristalizam-se ficando depositados na alvenaria. A temperatura pode ter alguma influência no processo, pois a solubilidade de sais

na água varia de acordo com a temperatura (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

De acordo com Teixeira (2007), os sinais de degradação dos materiais causados pela cristalização de sais são variados: alterações superficiais (eflorescências ou manchas de umidade), fissuras, formação de crostas e até formação de vazios (alveolização) são algumas das anomalias causadas pela presença de sais.

Segundo Freitas, Torres e Guimarães (2008), os sais envolvidos mais característicos nesse processo são:

- Os carbonatos que sob a ação de CO_2 transformam-se em bicarbonatos;
- Os cloretos que absorvem elevadas quantidades de água;
- Os nitratos, de origem orgânica, sendo o mais recorrente o nitrato de cálcio que cristaliza a 25° C e 50% de umidade relativa;
- Os sulfatos, higroscópicos e solúveis, que cristalizam com um aumento do seu volume. Os mais comuns são o sulfato de cálcio, de sódio e de magnésio.

2.3.4 Porosidade e porometria

A porosidade de um material está relacionada a quantidade de vazios que existem em seu interior. Trata-se da razão entre o volume de vazios e o volume aparente total do corpo. Os materiais podem ser divididos em dois tipos quanto ao seu tipo de porosidade: aberta e fechada.

No primeiro caso, os poros são interligados por dutos, facilitando a passagem da água, principalmente pelo fenômeno da capilaridade. No segundo caso, embora os poros existam, eles não estão interligados por ductos, constituindo-se assim um material impermeável.

Figura 8 – Porosidade aberta

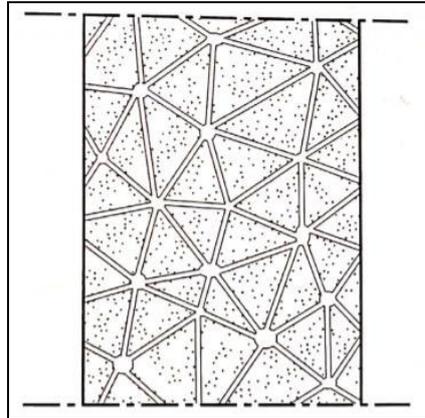
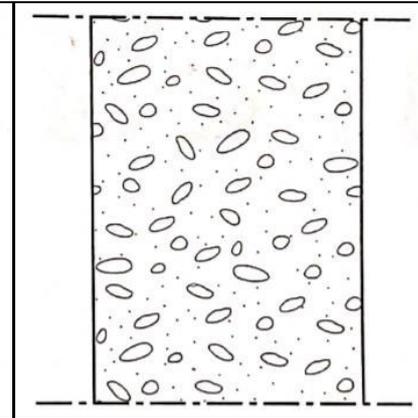


Figura 9 – Porosidade fechada



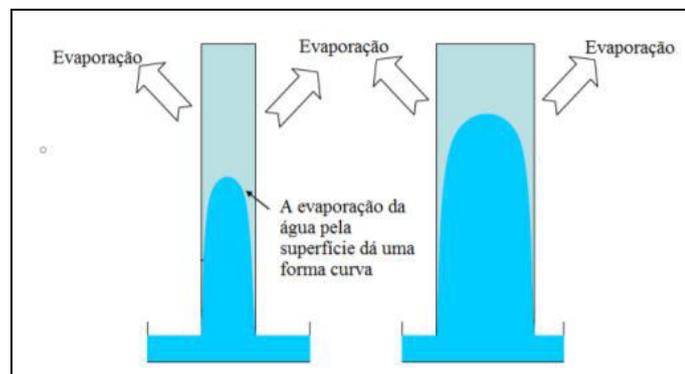
Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 27.

Praticamente todos os materiais de construção apresentam porosidade aberta, tornando-se assim bons condutores de água. Materiais com porosidade fechada são interessantes para evitar a umidade ascensional pois criam uma barreira hídrica impedindo a transferência de umidade.

2.3.5 Espessura da parede e natureza dos materiais de revestimento

A umidade ascensional se estabiliza quando o fluxo que entra na alvenaria se iguala à quantidade que sai através da evaporação. Paredes espessas tendem a acumular mais água pois possuem mais material. Porém, a evaporação está relacionada não com a espessura da parede, e sim com a sua superfície total exposta ao ambiente. Dessa forma, aumentando-se a espessura da parede, a evaporação se mantém constante, resultando em uma altura de progressão da umidade maior.

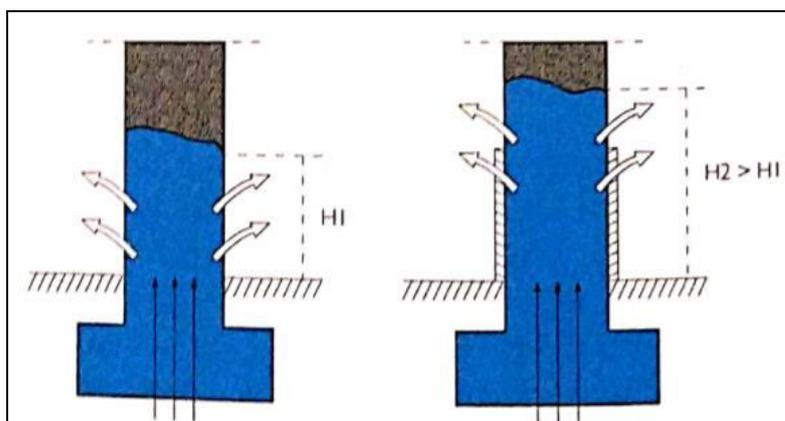
Figura 10 – Umidade Ascensional em paredes com diferentes espessuras.



Fonte: Rirsch e Zhang (2010 *apud* SOCOLOSKI, 2015), p. 31.

Além da espessura da parede, a presença de elementos impermeabilizantes como cerâmicas ou até várias camadas de tinta nas faces externas da alvenaria pode aumentar a altura atingida pela umidade ascensional. Tal fenômeno ocorre devido ao fato de os materiais impermeabilizantes diminuir o fluxo de água que sai pela evaporação. Dessa forma, para voltar ao equilíbrio, a água alcança alturas maiores até que atinja um novo equilíbrio entre a água absorvida e expelida pela evaporação (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Figura 11 – Influência da impermeabilização externa na umidade ascensional.



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 28.

2.4 Técnicas de tratamento

Segundo Silva (2013), os tratamentos com finalidade de impedir a umidade ascensional têm diversas abordagens, dentre elas:

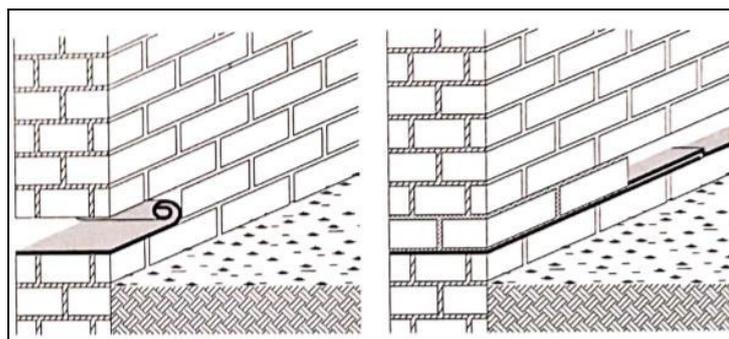
- Métodos cujo objetivo é impedir a ascensão da água através do rebaixamento do nível freático
- Métodos com a finalidade de retirar a água em excesso das paredes
- Métodos que impedem a ascensão da água através da criação de barreiras físicas ou químicas
- Métodos cuja finalidade é ocultar as anomalias, onde se inclui a utilização de rebocos especiais com porosidade controlada.

2.4.1 Execução de corte hídrico

Este método consiste em estabelecer uma barreira contínua para impedir a passagem da água. Essa barreira pode ser física ou química.

As barreiras físicas consistem na aplicação de um material estanque com a finalidade de conter a passagem da água. Geralmente efetuam-se rasgos na alvenaria a fim de substituir o material retirado por membranas betuminosas, placas de chumbo, folhas de polietileno ou argamassas de ligantes sintéticos (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

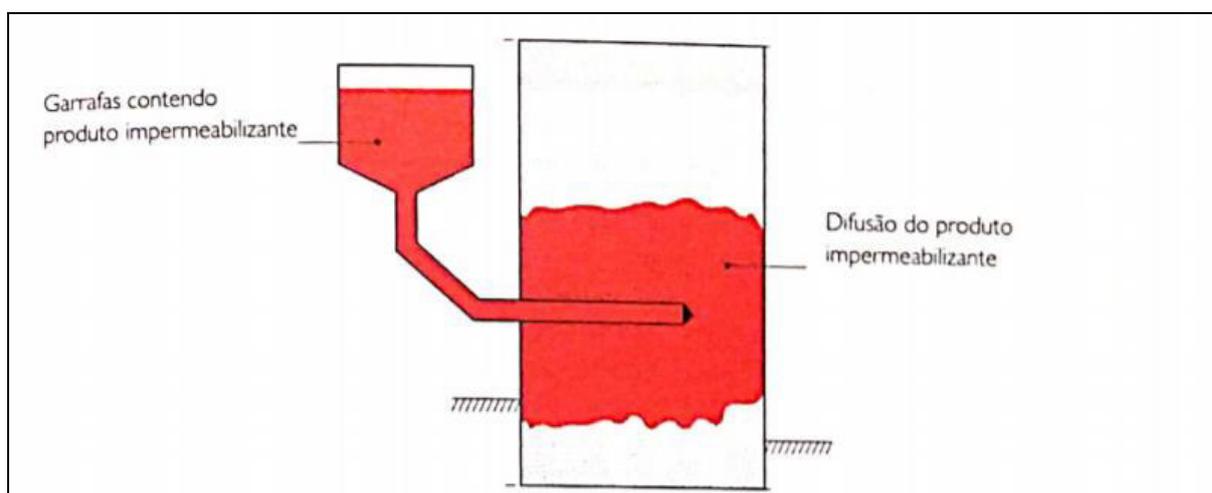
Figura 12 – Introdução de camadas impermeabilizantes em alvenaria



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 56.

Por outro lado, a implantação de barreiras químicas consiste na aplicação de produtos químicos através de métodos como difusão (com auxílio da gravidade) ou injeção (com auxílio de equipamentos para introduzir pressão). Esses produtos impedem a passagem da água, evitando a umidade ascensional. Os produtos mais comumente utilizados são acrilamidas, resinas epóxicas, silicatos, siliconatos e silicones (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Figura 13 – Aplicação de barreira química através da difusão

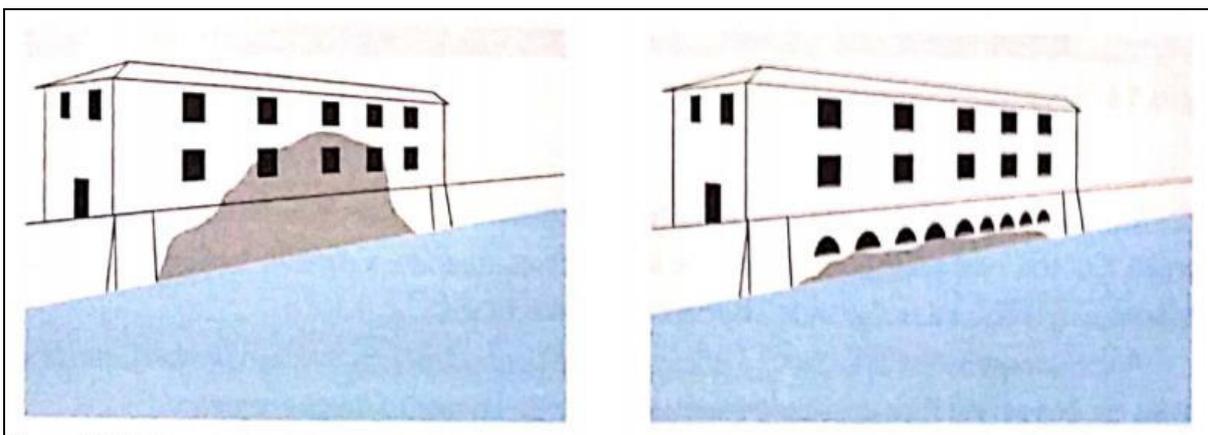


Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 59.

2.4.2 Redução da seção absorvente

Este método consiste na retirada de partes da alvenaria a fim de reduzir as zonas passíveis de migração da água por ascensão capilar. Trata-se de uma técnica eficiente, porém pouco utilizada devido às alterações arquitetônicas e estruturais provenientes de sua utilização. (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008)

Figura 14 – Influência da redução da seção absorvente na umidade ascensional.



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 61.

2.4.3 Introdução de tubos de arejamento

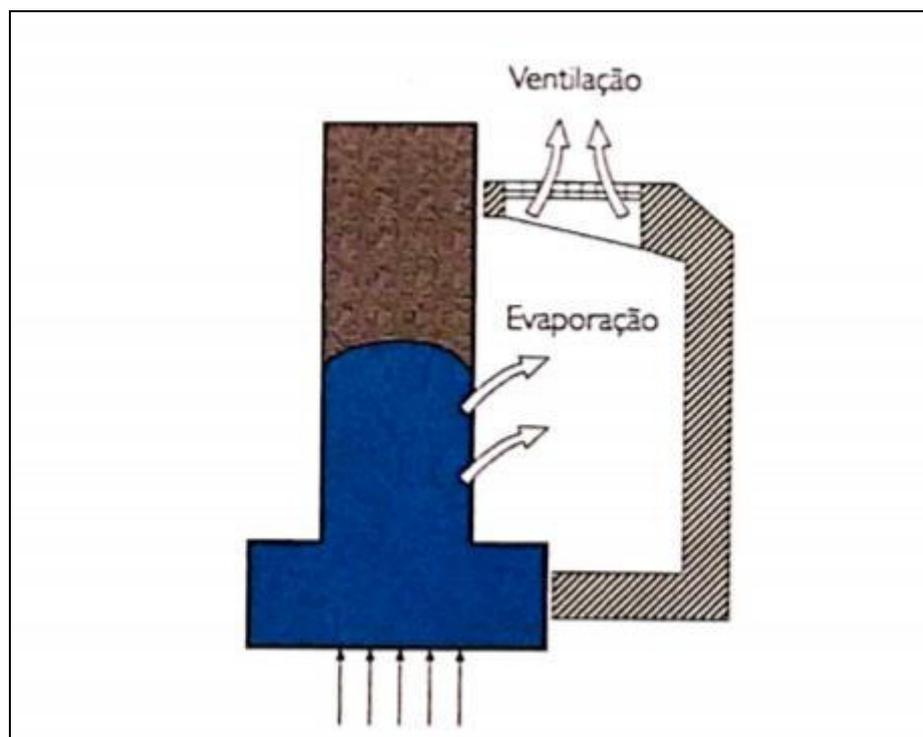
Consiste na introdução de drenos oblíquos nas paredes com a finalidade de facilitar a saída do ar úmido proveniente do interior das alvenarias para o exterior, sendo prontamente substituído por ar seco proveniente do exterior.

Embora seja uma solução econômica, não apresenta resultados satisfatórios quando a parede tem uma espessura elevada ou quando há um grande afastamento entre os tubos (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

2.4.4 Ventilação da base das paredes

Essa técnica de tratamento da umidade ascensional consiste em ventilar as bases das paredes, aumentando assim a evaporação no nível do subsolo, impedindo que a umidade chegue em alturas maiores e visíveis. Para isso, deve-se construir canais que permitam a troca de ar próximo às bases com o ar externo, através da instalação de tubos perfurados com elevada permeabilidade (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Figura 15 – Princípio de funcionamento de um sistema de ventilação da base das paredes



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008), p. 66.

2.5 Apresentação do programa de cálculo WUFI-2D

Desenvolvido por *Fraunhofer-Instituts für Bauphysik* na Alemanha, o programa de cálculo WUFI-2D permite simular numericamente o transporte de calor e umidade nos materiais em uma análise bidimensional. O programa é baseado no método dos volumes finitos, que possibilita modelar elementos de construção complexos (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

O programa possui uma interface gráfica de fácil utilização, que permite de maneira simples a entrada da geometria e a escolha dos materiais na base de dados ou a inserção de novas propriedades.

É possível obter a variação ao longo do tempo do teor de umidade total e teor de umidade de cada material. Pode ser observado também a variação ao longo do tempo da temperatura, umidade relativa e teor de umidade em qualquer ponto no interior da geometria.

2.5.1 Dados

Para realizar as simulações no WUFI-2D é necessária a entrada dos seguintes dados (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008):

- Geometria dos elementos e a dimensão dos elementos da grelha.
- Propriedades hidrotérmicas dos materiais, que podem ser retiradas do banco de dados do programa ou adicionado novas propriedades
- Condições climáticas exteriores e interiores. Para o estudo da umidade ascensional considera-se a superfície inferior em contato com a água.
- Condições iniciais de temperatura e umidade relativa.

2.5.2 Propriedades dos materiais

As propriedades hidrotérmicas necessárias para realizar as simulações estão dispostas a seguir:

- Peso específico (Kg/m^3);
- Porosidade (m^3/m^3);
- Calor Específico ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$);
- Condutibilidade térmica ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$);
- Fator de resistência à difusão de vapor (-);
- Curva higroscópica;
- Coeficiente de transporte líquido.

2.5.3 Condições climáticas

Conhecendo os valores de temperatura média, umidade relativa média, a amplitude e o dia de máxima e mínima das mesmas é possível gerar curvas climáticas e realizar as simulações, porém para simulações mais detalhadas pode-se realizar a entrada dos dados a seguir:

- Chuva incidente na superfície vertical exterior ($\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$);
- Radiação solar incidente na superfície vertical (W/m^2);
- Temperatura do ar exterior ($^{\circ}\text{C}$);
- Humidade relativa do ar exterior (0-1);

- Temperatura do ar interior (°C);
- Humidade relativa do ar interior (0-1);
- Pressão atmosférica (Pa).

2.5.4 Condições iniciais

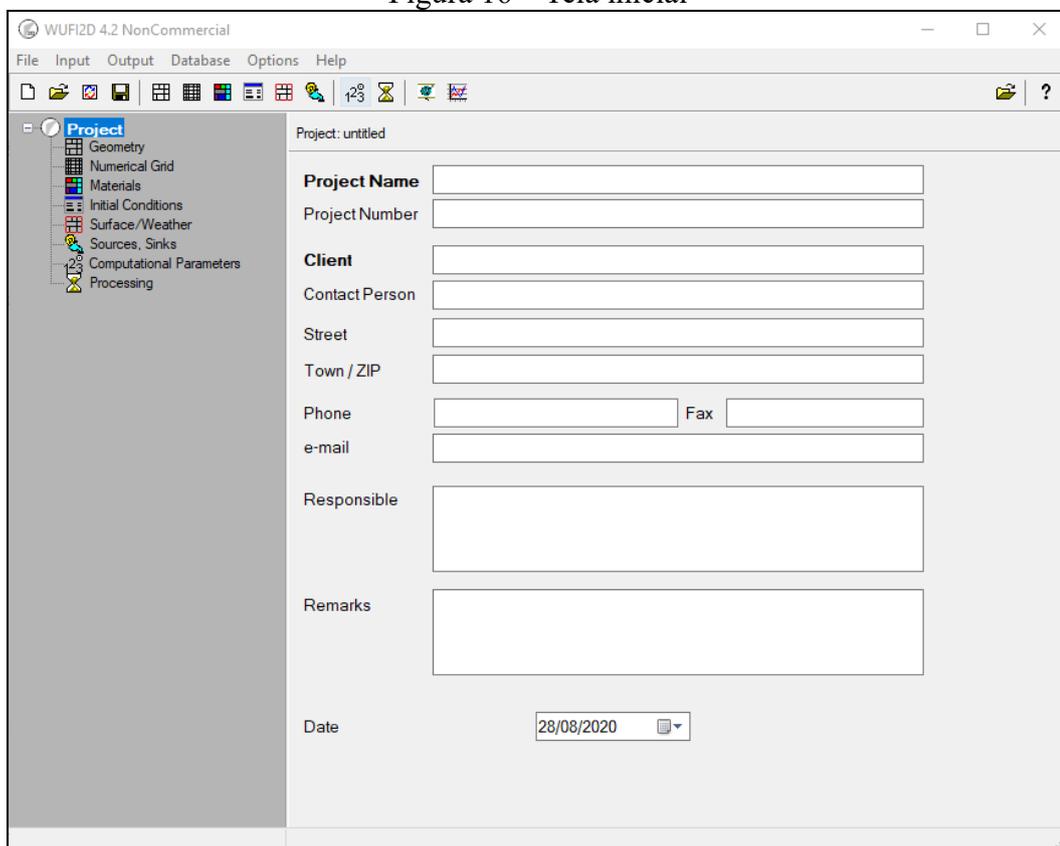
É necessário indicar a temperatura e umidade relativa dos materiais no início da simulação. Neste trabalho considerou-se que os materiais não possuíam nenhuma umidade no início da simulação.

2.5.5 Utilização do software WUFI-2D

2.5.5.1 Tela principal

Ao iniciar o programa apresenta uma tela inicial na qual é possível adicionar algumas informações referentes a identificação do projeto.

Figura 16 – Tela inicial



The screenshot displays the WUFI2D 4.2 NonCommercial software interface. The window title is "WUFI2D 4.2 NonCommercial". The menu bar includes "File", "Input", "Output", "Database", "Options", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations and simulation control. On the left, a tree view shows the project structure under "Project", including "Geometry", "Numerical Grid", "Materials", "Initial Conditions", "Surface/Weather", "Sources, Sinks", "Computational Parameters", and "Processing". The main area is titled "Project: untitled" and contains several input fields for project information:

- Project Name
- Project Number
- Client
- Contact Person
- Street
- Town / ZIP
- Phone and Fax (separate fields)
- e-mail
- Responsible
- Remarks
- Date (set to 28/08/2020)

Fonte: WUFI-2D.

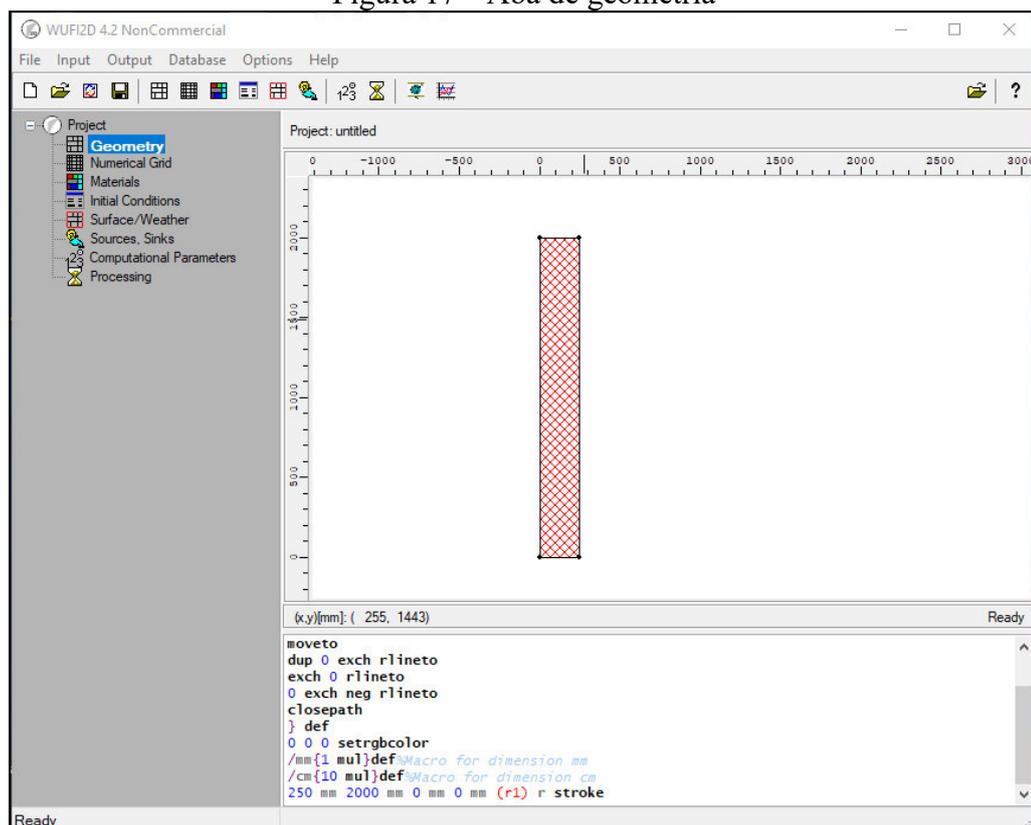
Na Figura 16 pode-se observar que esta página se destina a inserção de informação de identificação do projeto como o nome, número e dados do cliente.

Na lateral esquerda está localizada o explorador de projeto, na qual se pode navegar por todas as etapas de entrada de dados. Na parte superior localiza-se o menu principal e a barra de ferramentas, onde além de navegar no projeto é possível acessar os resultados ao fim das simulações.

2.5.5.2 Geometria dos elementos

Na aba de geometria é possível inserir as dimensões dos elementos de construção que se deseja simular.

Figura 17 – Aba de geometria



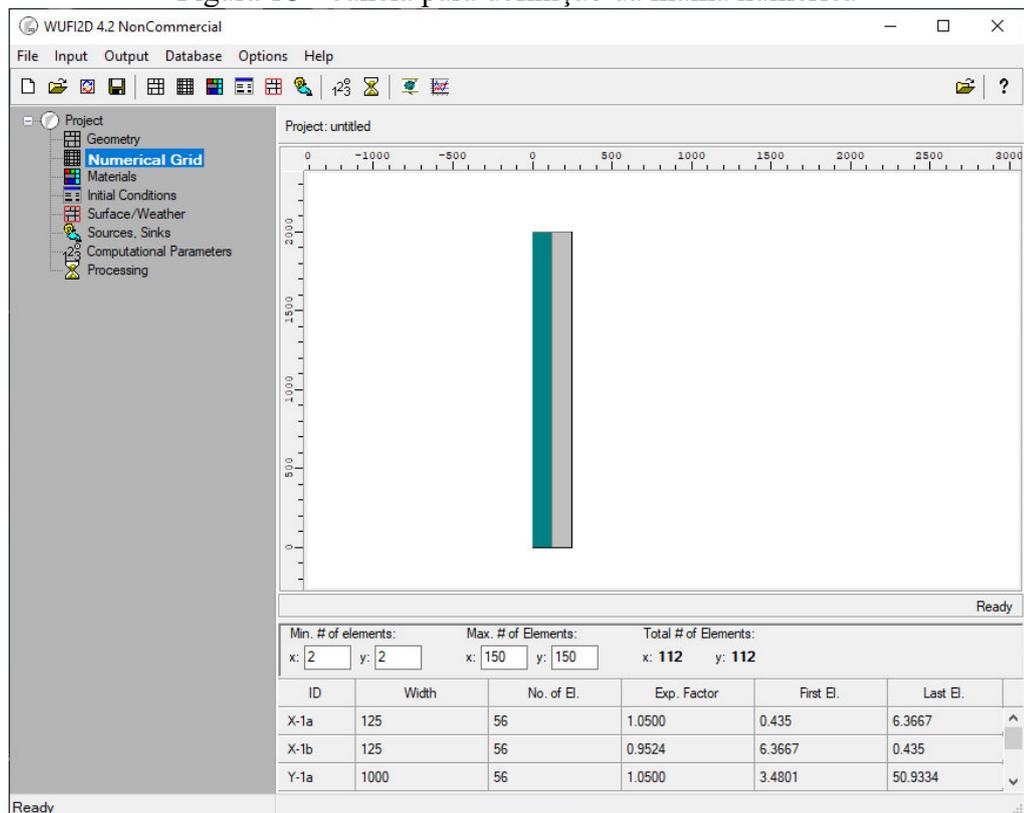
Fonte: WUFI-2D.

A Figura 17 mostra a janela onde se pode dar entrada na geometria dos elementos, definindo as dimensões em milímetros e o ponto de origem de cada elemento da construção.

2.5.5.3 Definição da malha numérica

A malha numérica pode ser definida inserindo o número de elementos que compõem a malha no eixo X e Y ou pode-se adotar uma das configurações de sensibilidade pré-definidas do programa que são grosso, médio e fino. A Figura 18 apresenta a aba para definição da malha numérica.

Figura 18 – Janela para definição da malha numérica

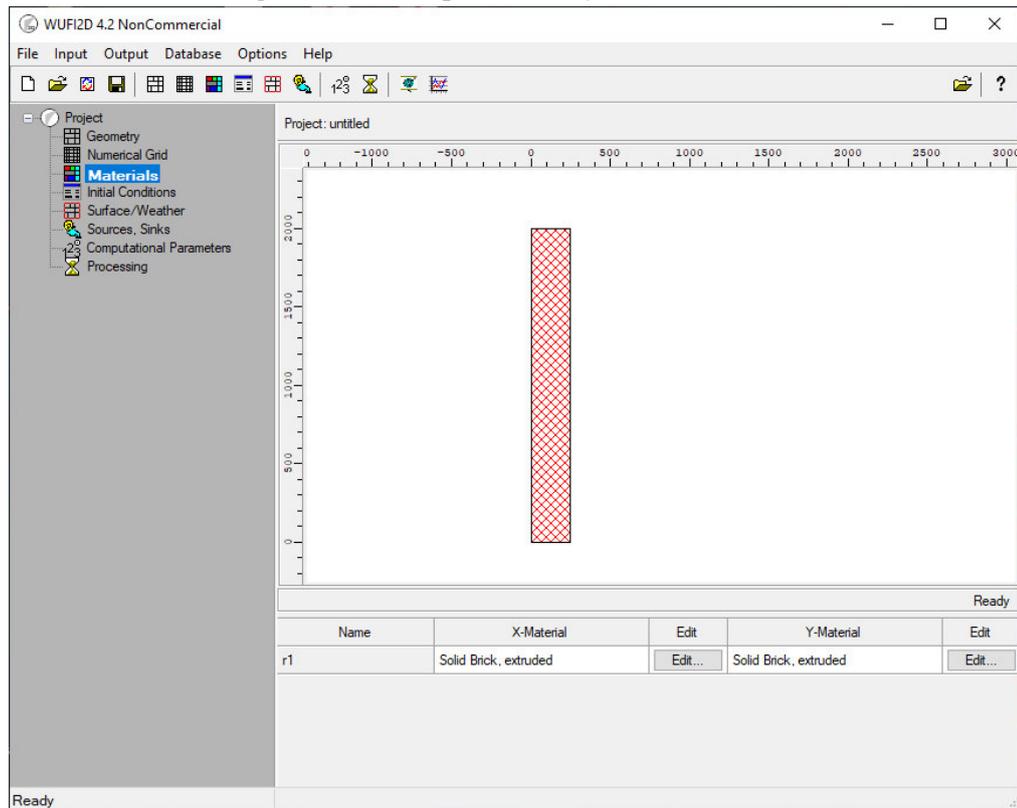


Fonte: WUFI-2D.

2.5.5.4 Escolha dos materiais

A Figura 19 exibe a janela para definição dos materiais do WUFI-2D.

Figura 19 – Aba para definição dos materiais



Fonte: WUFI-2D.

Nesta janela, ao clicar sobre a geometria do elemento é possível acessar o banco de dados de materiais e selecionar o que se deseja usar. Pode-se também realizar a inserção de um novo material ou a modificação das propriedades dos materiais selecionados sem a alteração no banco de dados do software.

O banco de dados do WUFI-2D é amplo e apresenta variados materiais da construção civil, desde materiais naturais como rochas a elementos industrializados como impermeabilizantes. Ao clicar sobre o material desejado observa-se na lateral direita e na parte inferior da janela as principais propriedades do material selecionado, como mostra a Figura 20 (ZIRKELBACH, 2007).

Figura 20 – Base de dados dos materiais

The screenshot shows the WUFI materials database interface. On the left, there is a tree view of material sources, with 'Masonry Bricks' selected under 'Fraunhofer-IBP'. The main window displays a table of material properties:

Material Name	Bulk density [kg/m ³]	Porosity [m ³ /m ³]	Heat Cap. [J/kgK]	Therm. Co... [W/mK]	Vap.Res. [-]
Naturziegel / Hanfziegel / Hanf-Kalk-Ziegel	280	0.83	1400	0.0812	4.09
POROTON-WDF Ziegelscherben	1394.6	0.4737	1019	0.22	14
POROTON-WDF-80 Ziegelscherben perforiert	1070	0.36	1019	0.11	11
Solid Brick Masonry	1900	0.24	850	0.6	10
Solid Brick, extruded	1650	0.41	850	0.6	9.5
Solid Brick, hand-formed	1725	0.38	850	0.6	17
Solid Brick, historical	1800	0.31	850	0.6	15

Below the table, there is a 'Moisture Storage Function' section with a table of data points and a graph of Water Content [kg/m³] vs. Relative Humidity [-].

No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.5	4.4
3	0.65	5.7
4	0.8	9.2
5	0.93	18.5
6	0.99	74
7	0.997	240
8	0.999	280
9	1	370

The graph shows a sharp increase in water content as relative humidity approaches 1.0. The interface also includes 'Import', 'Export', 'Thickness [m]: 0.24', 'Close', and 'Help' buttons.

Fonte: WUFI-2D.

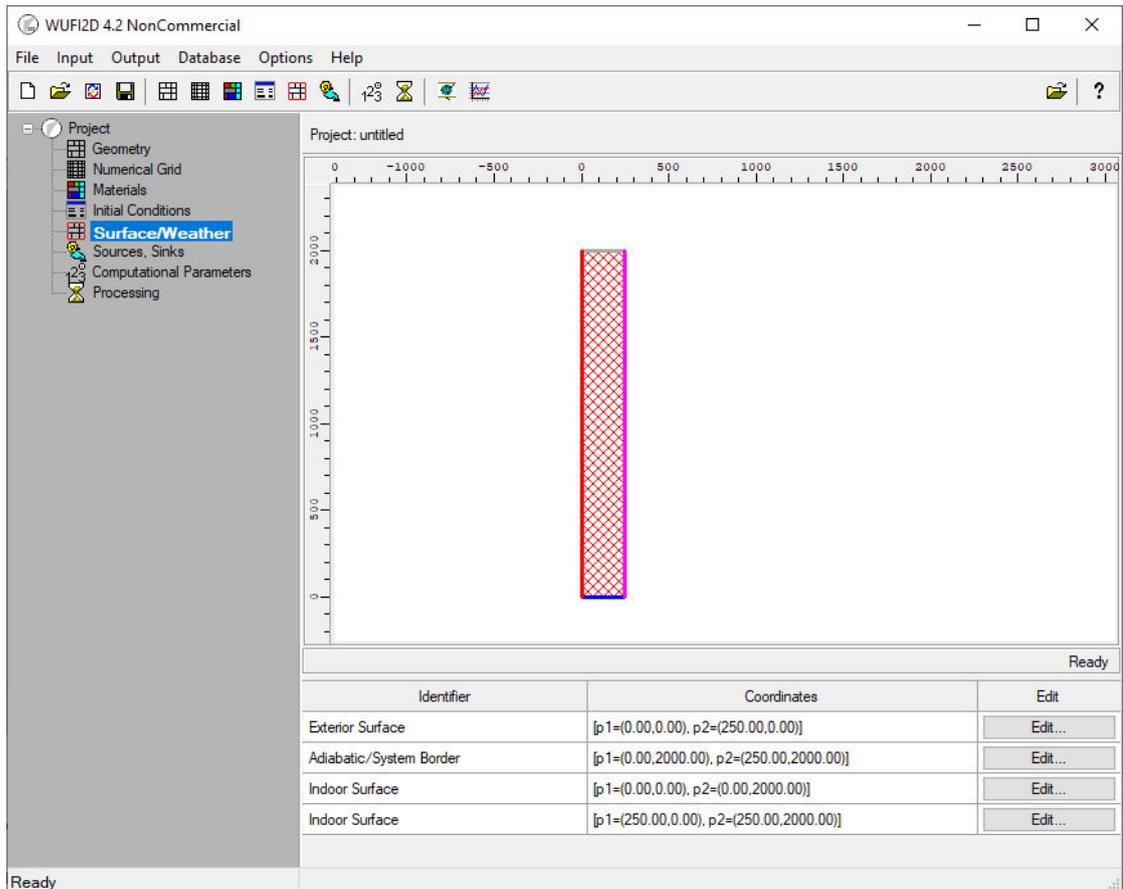
2.5.5.5 Condições iniciais

O programa traz pré-definido como condições iniciais dos materiais a temperatura de 20°C e uma umidade relativa de 80%, porém é possível alterar esses valores para se adequar a simulação desejada.

2.5.5.6 Condições de contorno

As condições de contorno para as simulações são as condições climáticas incidentes em cada face da geometria. A Figura 21 representa a janela para entrada do clima nas superfícies.

Figura 21 – Janela para entrada das condições de contorno



Fonte: WUFI-2D.

Ao clicar em alguma extremidade do elemento geométrico, é possível ser redirecionado para outra aba na qual pode-se realizar as configurações de clima para cada face.

Figura 22 – Janela para configuração de clima nas superfícies



Fonte: WUFI-2D

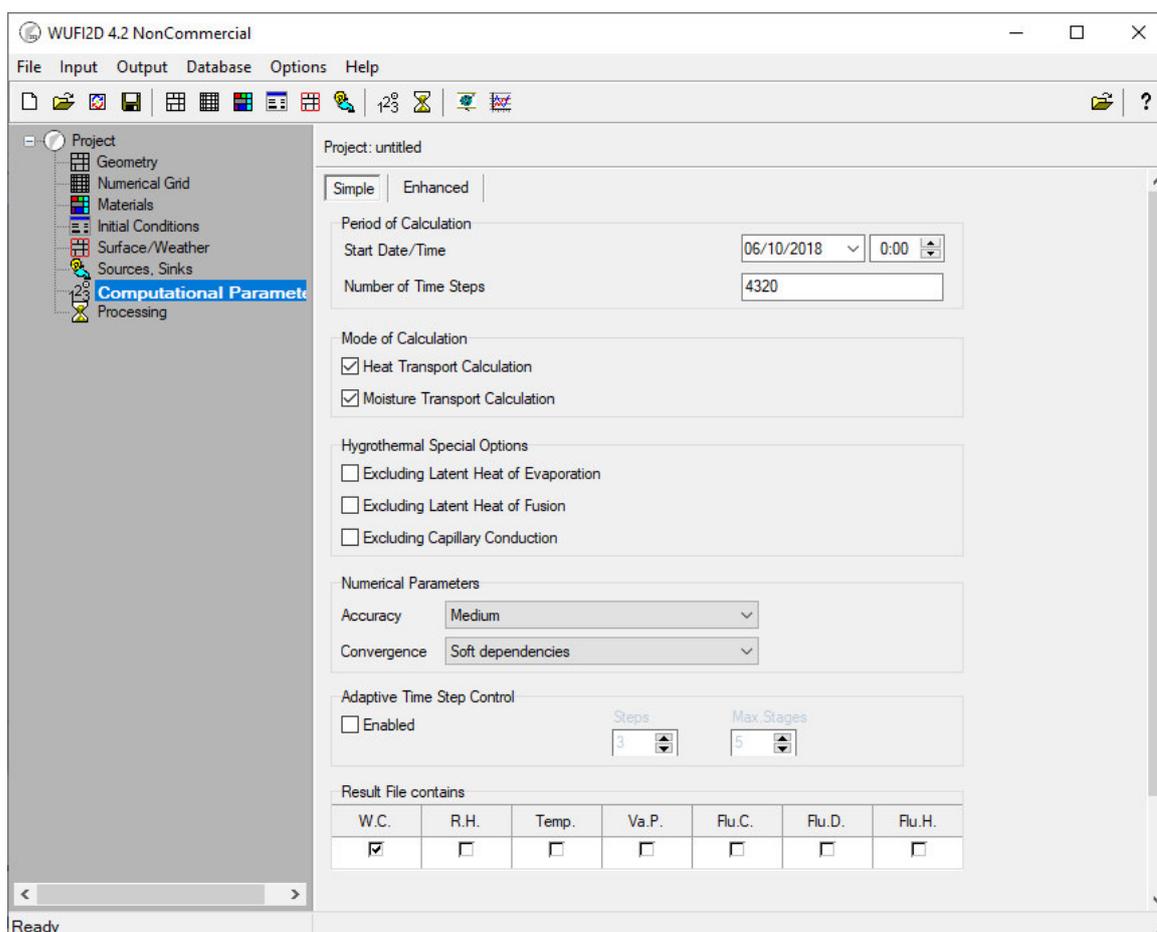
Pode-se adicionar três tipos diferentes de configuração de clima nas faces que são a superfície interior, superfície exterior e superfície adiabática. Os climas da superfície interior e exterior diferenciam-se pelos coeficientes de absorção definidos e a superfície adiabática refere-se a uma continuidade do elemento (ZIRKELBACH, 2007).

Para os estudos de umidade ascensional é necessária uma configuração de clima na superfície inferior que contenha uma umidade relativa de 100%, simulando o contato do material com a água.

2.5.5.7 Parâmetros computacionais

Nesta etapa são definidos os parâmetros para o cálculo como a data de início e o período de duração da simulação em horas. A Figura 23 exhibe a janela de parâmetros computacionais.

Figura 23 – Janela para configuração de clima nas superfícies



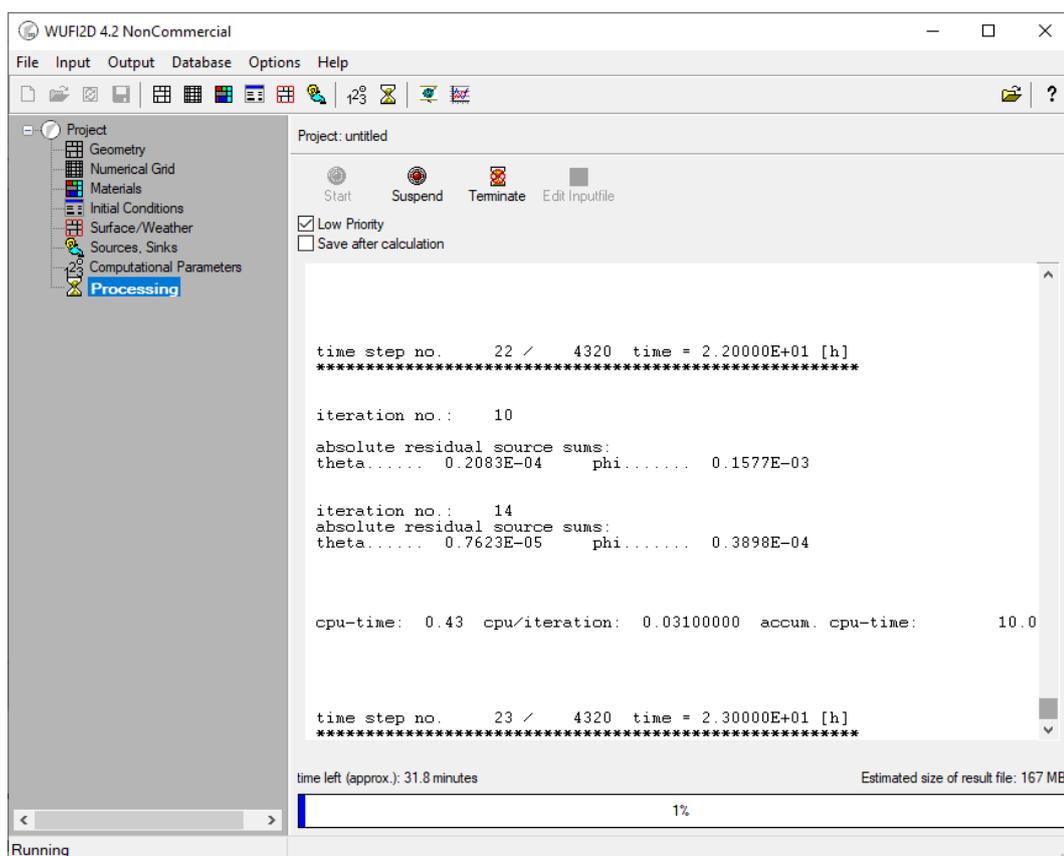
Fonte: WUFI-2D

É possível também excluir a influência de alguns processos higrótérmicos, definir a precisão do cálculo e as pastas de resultados que são exibidas ao fim da simulação.

2.5.5.8 Processo de cálculo

Após a definição de todos os parâmetros necessários, ao acessar a aba de processo de cálculo e clicar para iniciar o cálculo, dar-se-á o início das interações como mostra a Figura 24. Nesta tela é exibido a porcentagem executada e o tempo aproximado necessário para o cálculo.

Figura 24 – Janela de processo de cálculo



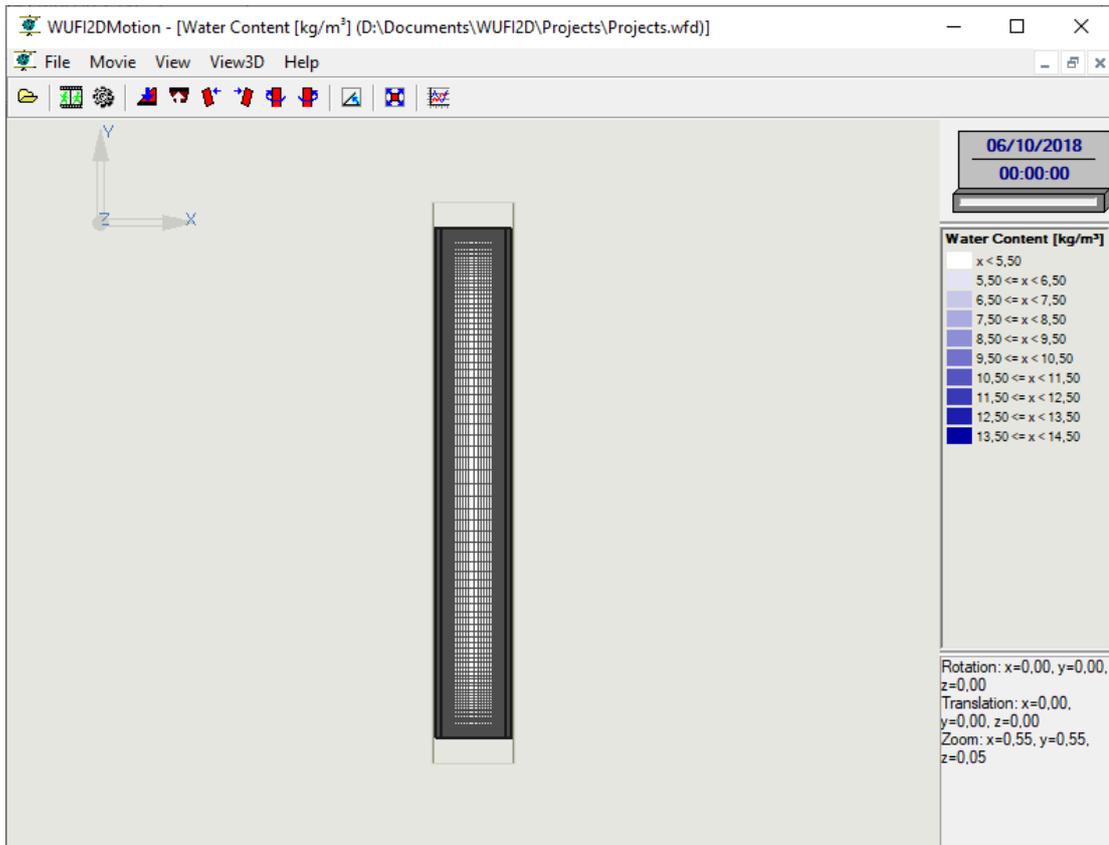
Fonte: WUFI-2D

2.5.5.9 Resultados

Os resultados das simulações podem ser apresentados em dois formatos diferente. A primeira opção é a exibição de uma animação 2D e a segunda opção é por meio de gráficos.

A animação 2D permite uma visualização mais clara dos resultados obtidos, além da possibilidade do acompanhamento da variação de temperatura e umidade ao longo do tempo. A aba dos resultados apresentados por meio da animação 2D, como mostra a Figura 25, contém diversas ferramentas que permitem modificar a posição da animação e a forma como é exibida, além de permitir a alteração da legenda para uma melhor visualização dos resultados.

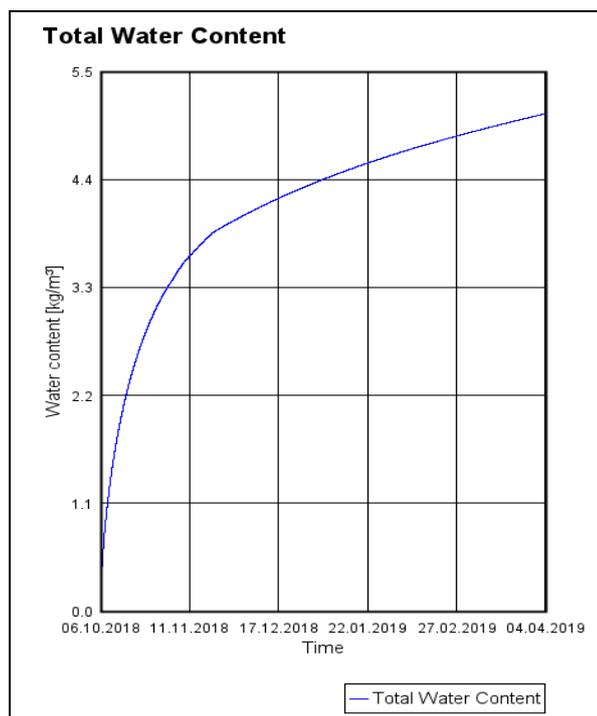
Figura 25 – Resultados apresentados em animação 2D



Fonte: WUFI-2D

A apresentação dos resultados por meio de gráficos é representada por curvas que mostram a evolução temporal das quantidades calculadas. A Figura 26 traz um exemplo de resultados apresentados por meio de gráficos.

Figura 26 – Resultados apresentados por meio de gráficos



Fonte: WUFI-2D

2.5.6 Limitações do programa

O software WUFI-2D oferece uma simulação 2D que é insuficiente para traduzir uma parede que tem sua geometria 3D, porém para estudos de sensibilidade este programa se mostra eficaz (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

Segundo Künzel *et al.* (2010 *apud* SILVA, 2013) existem situações em que se pode dificultar ou inutilizar a execução dos cálculos, tornando os resultados imprecisos. Alguns deles são:

- Erros de programa;
- Erros de entrada;
- Conhecimento insuficiente dos dados necessários;
- Limitações do modelo matemático;
- Problemas numéricos.

3 METODOLOGIA

3.1 Simulação numérica utilizando o software WUFI 2D

Para realização das simulações algumas condições tiveram que ser estabelecidas, como a geometria dos elementos que foram definidas antes das simulações e as dimensões dos elementos da grelha que foram definidas como média tanto no eixo X como no eixo Y em todas as simulações.

Todas as propriedades dos materiais utilizados nas simulações foram retiradas do banco de dados do WUFI-2D e o tempo utilizado no cálculo foi de 4320 horas, tempo este julgado suficiente para visualização da umidade ascensional.

Quanto as configurações de clima, utilizou-se sempre a umidade relativa em 100% na face inferior para a ocorrência da umidade ascensional e determinou-se que os materiais não possuíam nenhuma umidade no início da simulação.

3.1.1 Influência da espessura da parede na umidade ascensional

Para verificar a influência da espessura da parede na altura da frente úmida alcançada pela umidade ascensional, optou-se por manter constantes os valores de temperatura e umidade relativa nas faces leste e oeste das paredes.

Tabela 1 – Configuração de clima utilizada

Clima		
	Oeste e Leste	Sul
Temperatura	30 °C	21° C
Umidade relativa	60%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O material adotado na simulação também foi igual em todos os testes, sendo escolhido o *Solid Brick, extruded* presente no banco de dados do WUFI 2D. As propriedades do material estão presentes na Tabela 2.

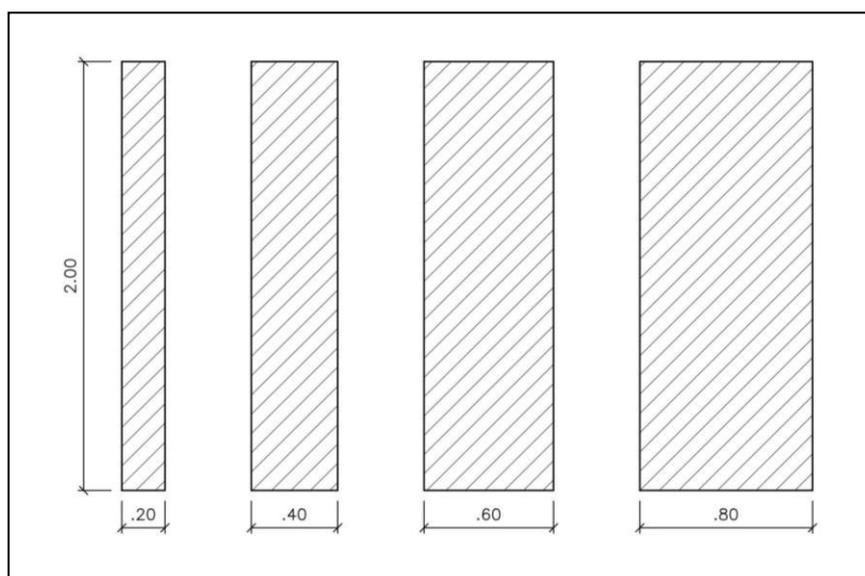
Tabela 2 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado

Solid Brick, extruded	
Densidade (Kg/m ³)	1650
Porosidade (m ³ /m ³)	0,41
Calor Específico (J/(kg.K))	850
Condutibilidade térmica (W/(m.k))	0,6
Fator de resistência à difusão de vapor (-)	9,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto a geometria, foi determinada a utilização de quatro espessuras de paredes, sendo elas de 20, 40, 60 e 80 centímetros de espessura e uma altura de dois metros em todas as configurações.

Figura 27 – Configuração geométrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Influência do material utilizado

Pretendendo estudar a influência das propriedades dos materiais na altura de frente húmida atingida, realizou-se simulações em paredes monolíticas, utilizando o programa WUFI-2D, variando o material aplicado em cada simulação.

A configuração de parede utilizada foi com a espessura de 25 centímetros e uma altura de 2 metros e as configurações de clima se mantiveram constantes como na simulação anterior.

Os materiais adotados foram escolhidos na base de dados do programa de modo que apresentassem diferentes propriedades, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado

	Concret, C12/15	Cottaer Sandstone	Solid Brick, extruded	Aerated Concret
Densidade (Kg/m ³)	2200	2050	1650	600
Porosidade (m ³ /m ³)	0,18	0,22	0,41	0,72
Calor Específico (J/(kg.K))	850	850	850	850
Condutibilidade térmica (W/(m.k))	1,6	1,8	0,6	0,14
Fator de resistência à difusão de vapor (-)	92	15	9,5	8,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Influência dos revestimentos na altura da frente úmida

A simulação da influência dos revestimentos na umidade ascensional se deu com quatro configurações diferentes de paredes. Na primeira não foi aplicado nenhum revestimento, nas demais aplicou-se na face lateral direita dois centímetros de revestimento, sendo respectivamente aplicado os materiais de revestimento *Cement Plaster*, *Interior Plaster* e *Mortar (historical): Gypsun*.

Tabela 4 – Propriedades hidrotérmicas do material utilizado

	Solid Brick extruded	Mortar (historical): Gypsun	Interior Plaster	Cement Plaster
Densidade (Kg/m ³)	1650	915	1310	2000
Porosidade (m ³ /m ³)	0,41	0,64	0,36	0,3
Calor Específico (J/(kg.K))	850	850	850	850
Condutibilidade térmica (W/(m.k))	0,6	0,52	0,87	1,2
Fator de resistência à difusão de vapor (-)	9,5	7,8	8	25

Fonte: Elaborado pelo autor.

A geometria da parede foi fixada em 25 centímetros de largura por 2 metros de altura e o material utilizado foi o *Solid Brick extruded*. O clima nas faces leste e oeste foram mantidos com a temperatura constante de 30°C e a umidade relativa de 60%, na face sul o clima utilizado foi de uma temperatura de 21°C e uma umidade relativa de 100%.

3.1.4 Influência das condições climáticas

A fim de verificar a influência das variações climáticas na umidade ascensional, realizaram-se dois momentos diferentes de simulação. Primeiro manteve-se fixo o valor da umidade e variou-se o valor da temperatura, em um segundo momento manteve-se a temperatura constante e variou-se a umidade relativa da parede.

Para verificar a influência da temperatura na altura da frente úmida foi adotado o valor de umidade relativa constante de 60% e o valor de temperatura de 10, 20, 30 e 40°C nas faces leste e oeste para cada simulação.

Tabela 5 – Configuração de clima utilizada

		Clima A	Clima B	Clima C	Clima D
Face Oeste e Leste	Temperatura	10°C	20°C	30°C	40°C
	Umidade Relativa	60%	60%	60%	60%
Face Sul	Temperatura	21°C	21°C	21°C	21°C
	Umidade Relativa	100%	100%	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para verificar a influência da umidade relativa manteve-se constante a temperatura em 30°C e a variou-se o valor de umidade relativa em 20, 40, 60 e 80% para cada simulação.

Tabela 6 – Configuração de clima utilizada

		Clima E	Clima F	Clima G	Clima H
Face Oeste e Leste	Temperatura	30°C	30°C	30°C	30°C
	Umidade Relativa	20%	40%	60%	80%
Face Sul	Temperatura	21°C	21°C	21°C	21°C
	Umidade Relativa	100%	100%	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

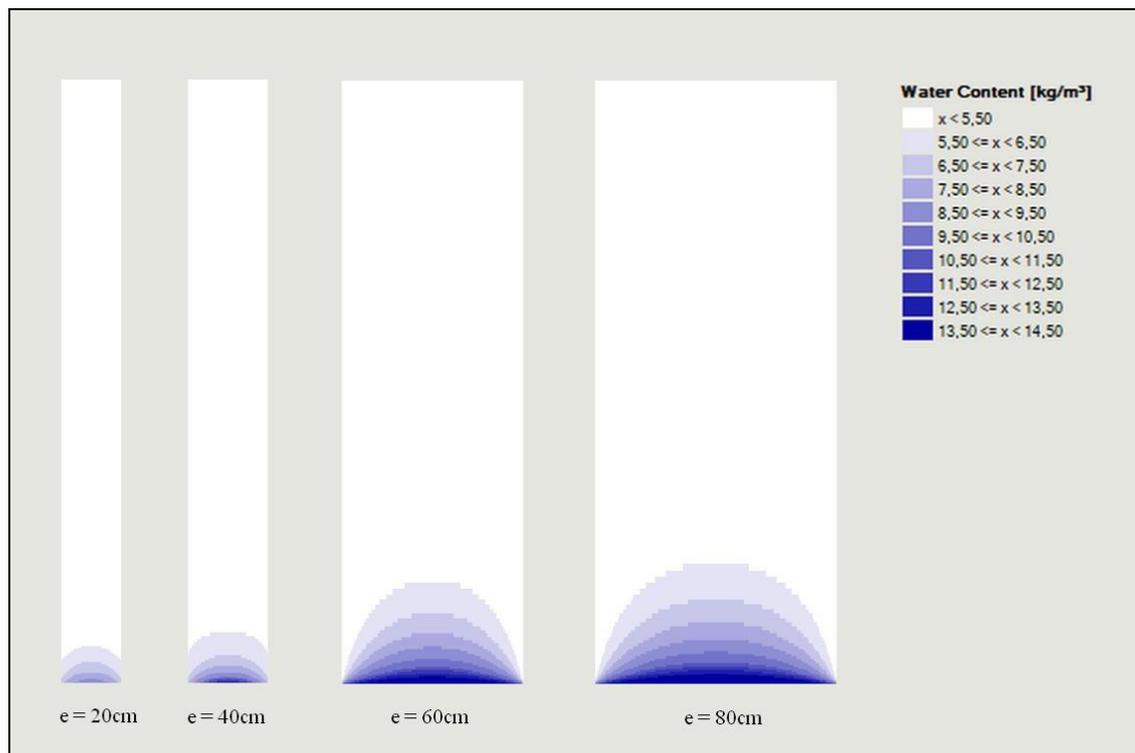
O material escolhido foi o *Solid Brick, extruded*, cuja as propriedades já foram apresentadas, e a manteve-se uma geometria constante de 25 cm de espessura por 2 metros de altura.

4 RESULTADOS

4.1 Influência da espessura da parede na umidade ascensional

Ao fim das simulações foi possível visualizar que o teor de umidade aumenta conforme aumenta a espessura da parede, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi possível aferir a altura de frente úmida atingida em cada parede na aba de visualização de resultados do WUFI-2D, os valores estão expostos na tabela 7. A parede com a espessura de 20 cm apresentou uma taxa de umidade de $5,5 \text{ kg/m}^3$ a uma altura de 16 cm enquanto a parede com 80 cm de espessura conteve esta taxa de umidade em uma altura de 38 cm.

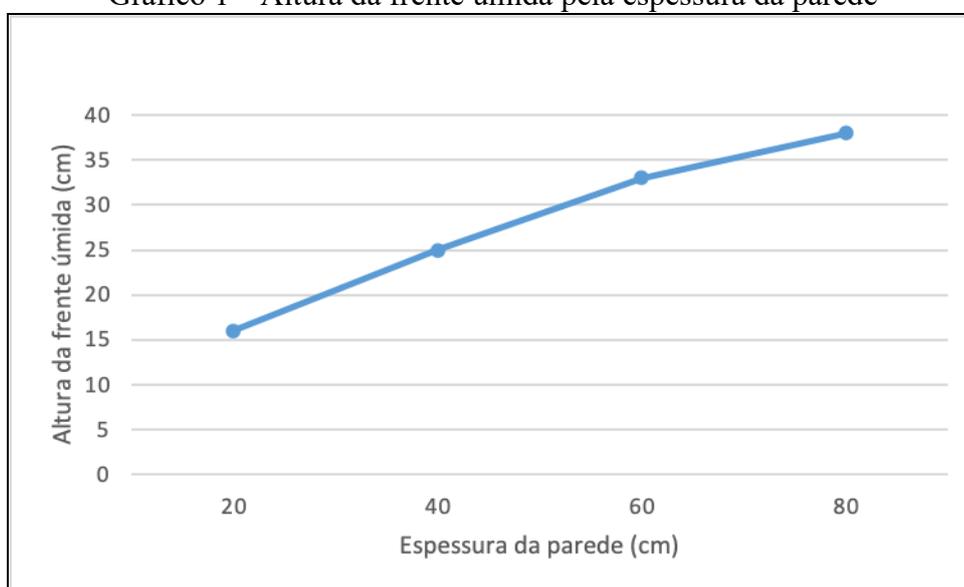
Tabela 7 – Altura da frente úmida

Espessura da parede				
	e = 20 cm	e = 40 cm	e = 60 cm	e = 80 cm
Altura de frente úmida atingida	16 cm	25 cm	33 cm	38 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores obtidos, foi possível construir o Gráfico 1 que relaciona a altura atingida pela frente úmida com os valores de espessuras das paredes.

Gráfico 1 – Altura da frente úmida pela espessura da parede



Fonte: Elaborado pelo autor.

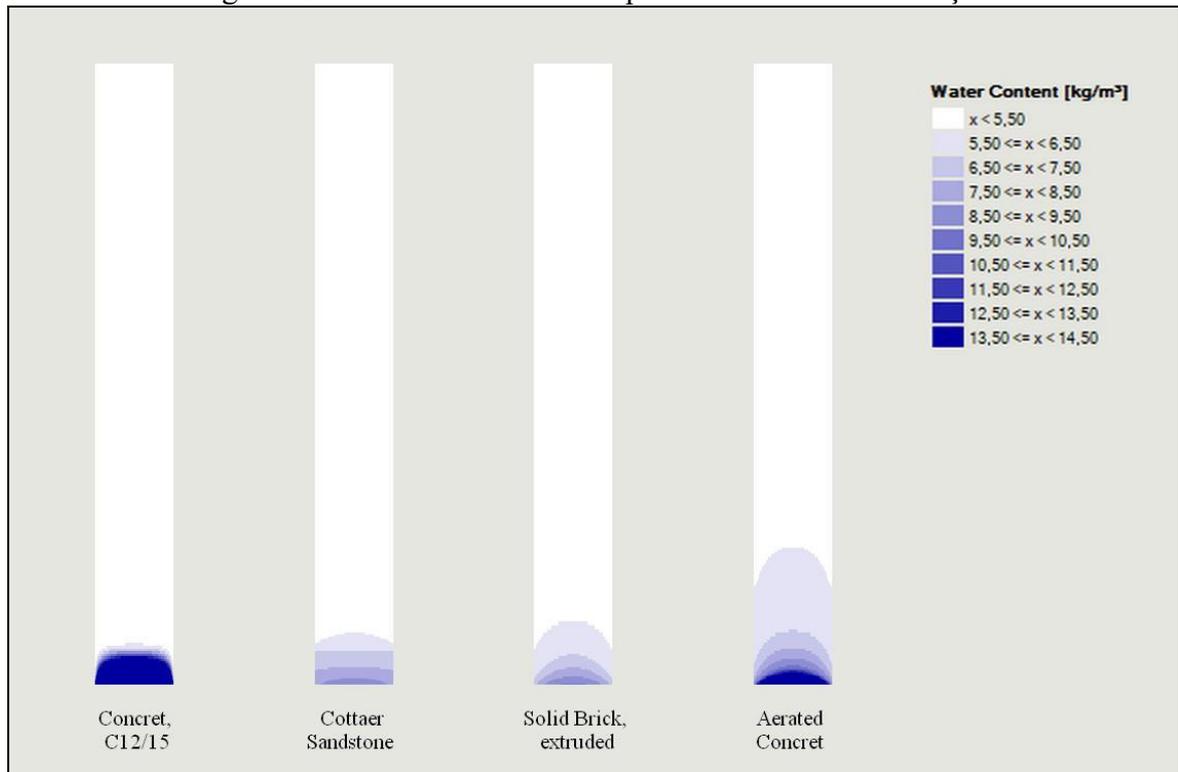
É possível identificar ao analisar o gráfico que o acréscimo de umidade com o aumento da espessura da parede não ocorre de maneira linear, tendendo a ter um valor menor a medida em que se alarga a parede e uma altura da frente úmida constante em estruturas com espessuras muito elevadas.

Com base no gráfico anterior foi possível elaborar uma equação que expressa a evolução da altura de frente úmida e permite identificar o valor dessa altura para espessuras de paredes não simuladas. A equação apresenta um valor de $R^2 = 0,9993$, valor este muito próximo de 1, e é representada por $y = -x^2 + 12,4x + 4,5$.

4.2 Influência do material utilizado

Na Figura 29 é possível identificar o teor de umidade para os diferentes materiais simulados.

Figura 29 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a figura anterior é possível perceber que a parede de concreto C12/15 é a que contém uma menor altura de frente úmida com a taxa de umidade de $5,5 \text{ kg/m}^3$ atingindo uma altura de 13,4 cm e a de concreto aerado apresenta a maior altura de frente úmida com uma altura de 44 cm para a taxa de $5,5 \text{ kg/m}^3$. Os valores das alturas de frente úmida atingida na simulação de cada material são apresentados na Tabela 8.

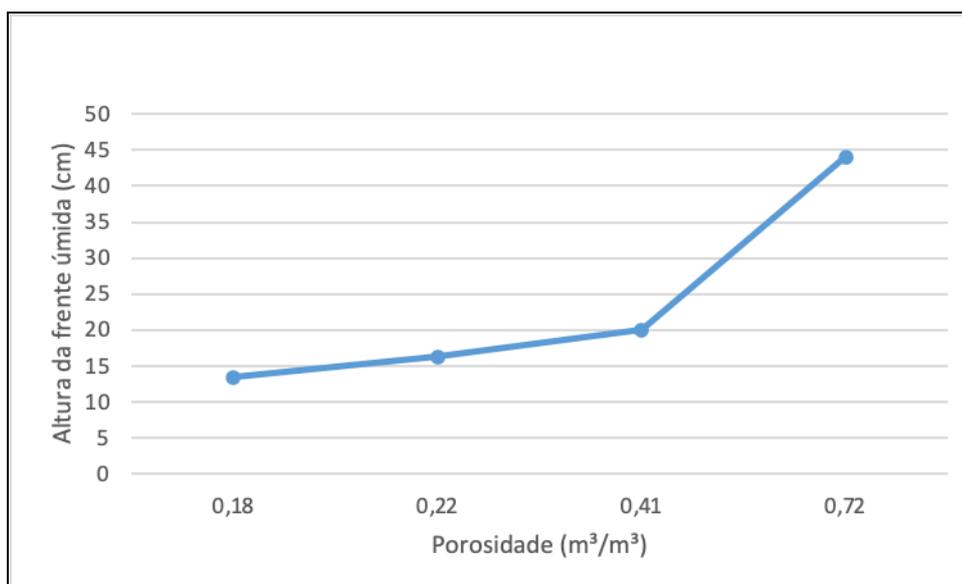
Tabela 8 – Altura da frente úmida

	Material utilizado			
	Concret, C12/15	Cottaer Sandstone	Solid Brick, extruded	Aerated Concret
Altura de frente úmida atingida	13,4 cm	16,3 cm	20 cm	44 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo a porosidade dos materiais uma propriedade de grande influência na umidade ascensional, traçou-se um gráfico relacionando a porosidade com a altura da frente úmida, como mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais



Fonte: Elaborado pelo autor.

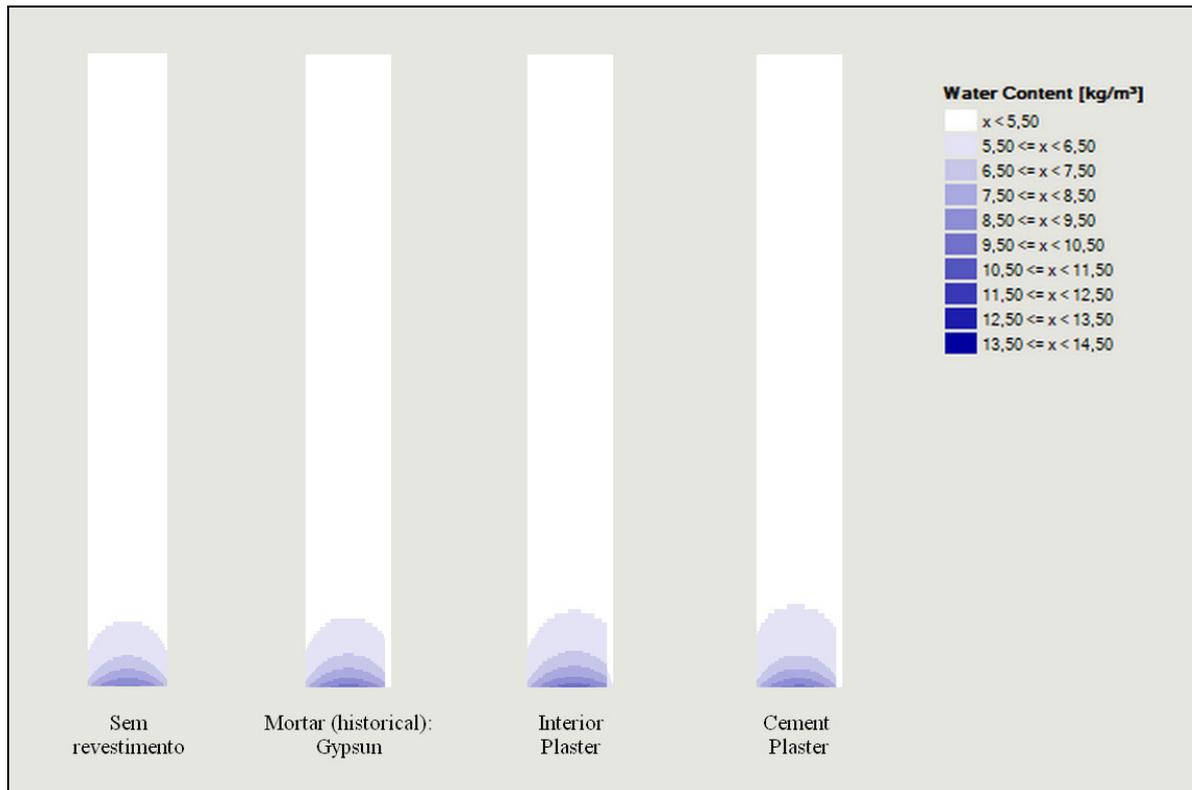
É possível notar que os materiais com uma porosidade menor apresentam uma altura de frente úmida menor e com o aumento da porosidade essa altura tende a também aumentar.

É notável também que a distribuição da umidade se dá de maneira distinta nos materiais, a parede como o material concreto C12/15 embora apresente a menor altura de frente úmida apresenta uma concentração de umidade na base de 40 kg/m³ enquanto a parede de concreto aerado que apresentou a maior altura de frente úmida tem uma concentração de umidade na base de 20,8 kg/m³. A diferença na distribuição da umidade em cada material é decorrente de outras propriedades dos materiais.

4.3 Influência dos revestimentos na altura da frente úmida

A Figura 30 evidencia a diferença do teor de umidade com a aplicação dos revestimentos.

Figura 30 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível identificar que houve um aumento na altura da frente úmida em todas as paredes que foram aplicados os revestimentos. A amostra que recebeu o revestimento de *Mortar (historical): Gypsun* foi a que apresentou a menor alteração na altura da frente úmida e a que recebeu o *Cement Plaster* a que apresentou uma maior alteração. Os valores das alturas de frente úmidas estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Altura da frente úmida

	Material utilizado			
	Solid Brick extruded	Mortar (historical): Gypsun	Interior Plaster	Cement Plaster
Altura de frente úmida atingida	20 cm	21,6 cm	24,6 cm	26 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando as propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados nos revestimentos, é possível observar que os materiais mais impermeáveis conduzem à uma altura de frente úmida maior e os que possuem uma porosidade maior, possibilitam uma altura menor de frente úmida. A Tabela 10 apresenta os valores de porosidade dos materiais utilizados como revestimento.

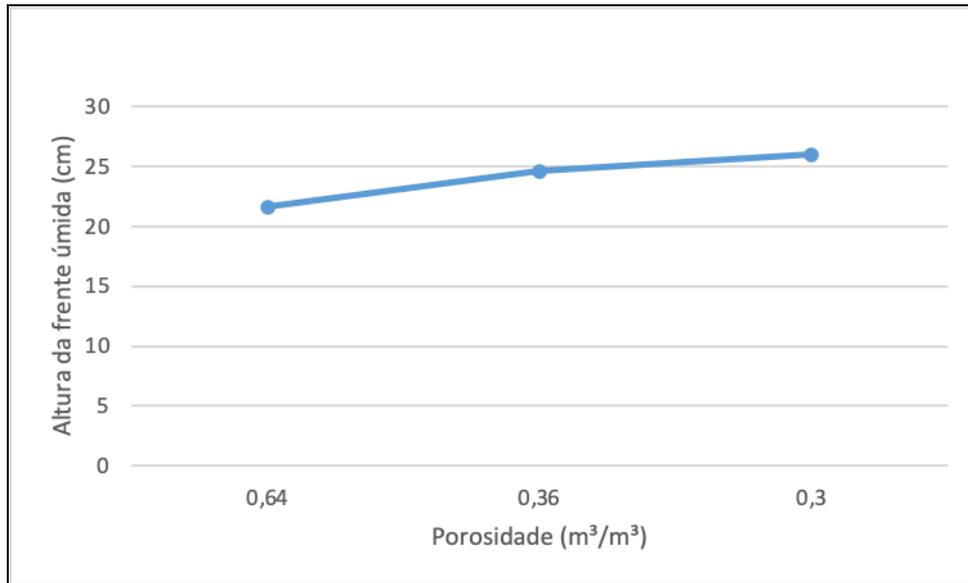
Tabela 10 – Porosidade dos materiais utilizados como revestimento

	Mortar (historical): Gypsun	Interior Plaster	Cement Plaster
Porosidade (m ³ /m ³)	0,64	0,36	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 3, que relaciona a porosidade dos revestimentos com a altura da frente úmida, apresenta de maneira mais clara essa relação.

Gráfico 3 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais



Fonte: Elaborado pelo autor.

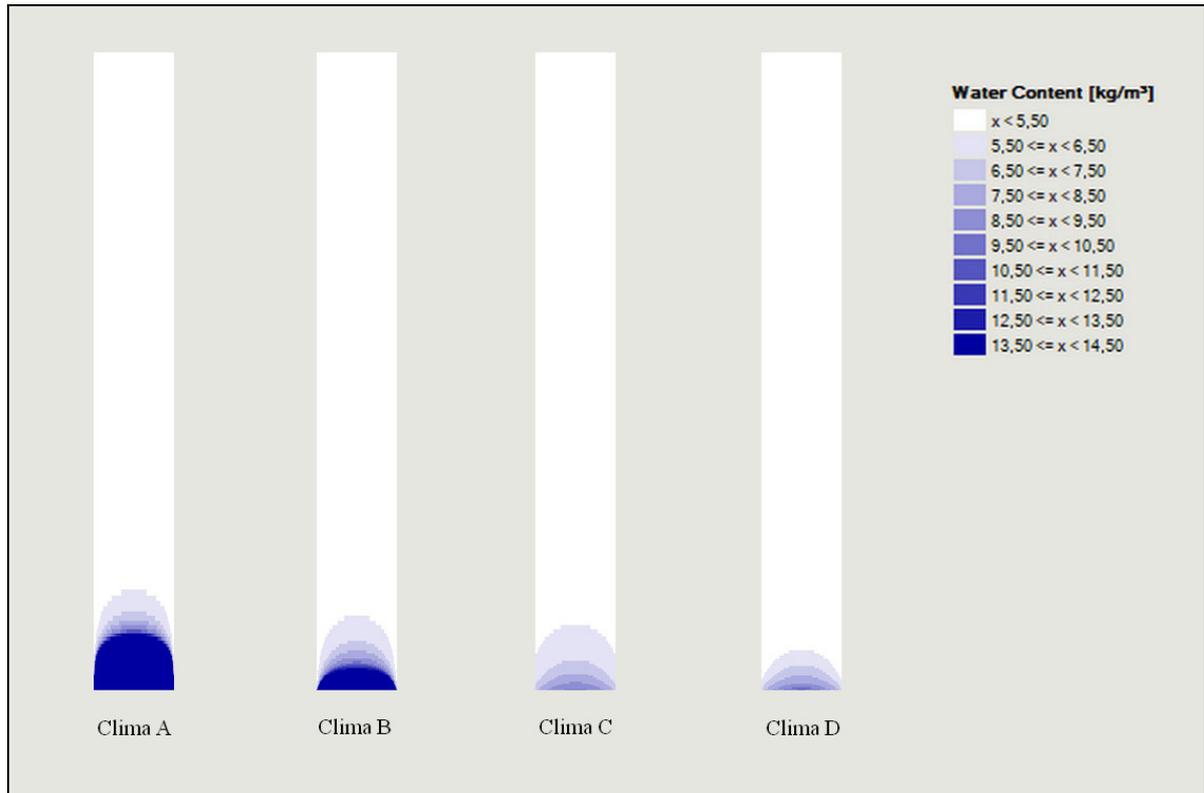
Ao analisar o Gráfico 3 observa-se que a adoção do material *Cement Plaster*, que possui uma porosidade de $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$, para o revestimento gerou uma altura de frente úmida de 26 cm, já a adoção de um material mais permeável como o *Mortar (historical): Gypsun*, que possui uma porosidade de $0,64 \text{ m}^3/\text{m}^3$, apresenta uma altura de frente úmida menor de 21,6 cm, e uma diferença de apenas 1,6 quando comparada com a parede sem revestimento.

É possível entender os resultados obtidos pela diminuição da evaporação com a aplicação dos revestimentos. A utilização de revestimentos com uma porosidade maior, que permitem uma maior evaporação, tende a ocorrer uma menor alteração da altura da frente úmida.

4.4 Influência das condições climáticas

As simulações para o efeito da variação da temperatura na umidade ascensional resultaram nos teores de umidade apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o clima com temperatura mais baixa apresenta uma maior altura de frente úmida e o clima com maior temperatura apresenta uma menor altura de frente úmida. As alturas de frente úmidas encontradas no fim das simulações, para os respectivos climas, são apresentadas na Tabela 11.

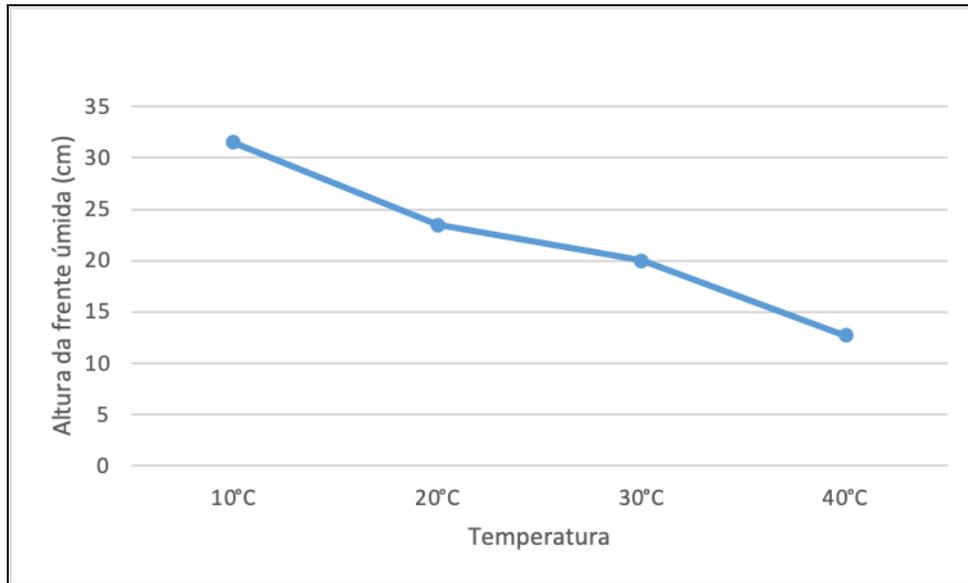
Tabela 11 – Altura da frente úmida

	Clima A	Clima B	Clima C	Clima D
Altura de frente úmida atingida	31,5 cm	23,5 cm	20 cm	12,7 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse desses dados, é possível construir um gráfico relacionando a temperatura com a altura de frente úmida.

Gráfico 4 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais



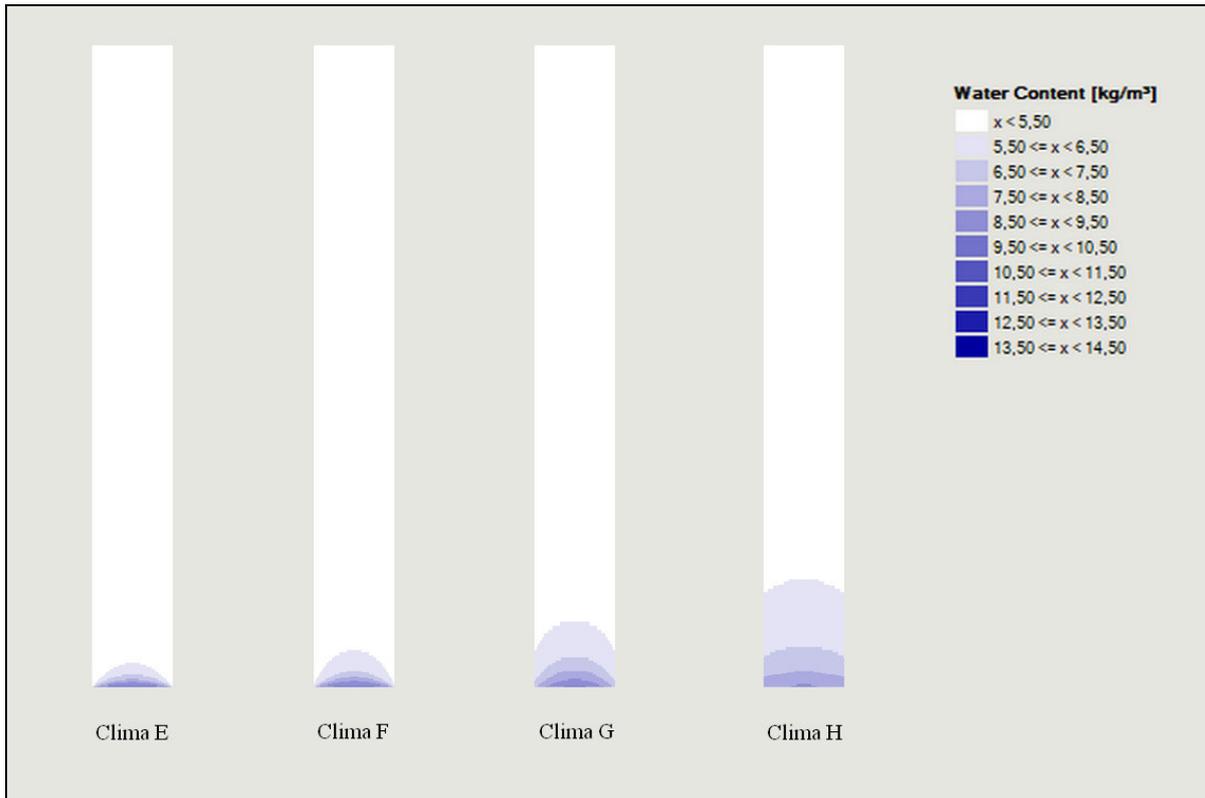
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar a partir da análise do Gráfico 4 que o clima no qual a temperatura era de 10°C obteve a maior altura de frente úmida (31,5 cm), já o clima com a temperatura de 40° C apresentou a menor altura de frente úmida (12,7 cm).

É possível observar também que embora o valor da temperatura esteja variando em intervalos iguais o valor de decréscimo da altura de frente úmida ocorre de maneira diferente para cada clima. Entre o clima com a temperatura de 10°C e o clima de 20°C o decréscimo da altura atingida pela frente úmida com o aumento da temperatura foi de 8 cm, já entre os climas com as temperaturas de 20°C e 30°C esse decréscimo foi de apenas 3,5 cm, este valor voltou a subir quando comparamos os climas com as temperaturas de 30°C e 40°C, chegando a um valor de 7,3 cm.

Já as simulações em que variava umidade relativa, resultaram nos teores de umidade que mostra a Figura 32.

Figura 32 – Teor de umidade nas paredes ao fim da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é esperado, a medida em se eleva a umidade relativa do ambiente maior é a altura da frente úmida alcançada, os valores da altura de frente úmida para cada clima são apresentados na Tabela 12.

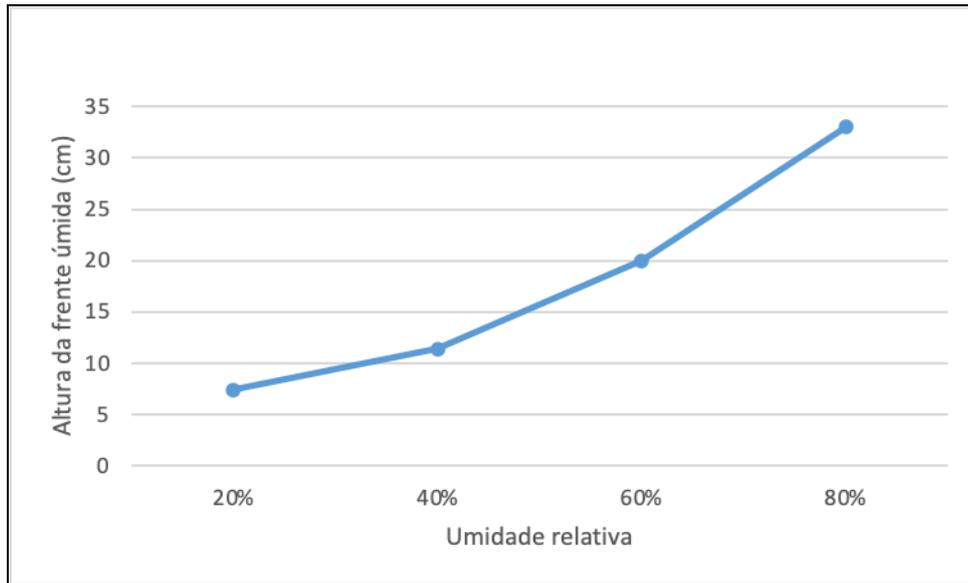
Tabela 12 – Altura da frente úmida

	Clima E	Clima F	Clima G	Clima H
Altura de frente úmida atingida	7,4 cm	11,4 cm	20 cm	33 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 5 evidencia a relação da altura da frente úmida com a umidade relativa do ambiente.

Gráfico 5 – Altura da frente úmida pela porosidade dos materiais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 5 é possível observar que o aumento da umidade relativa gera também o aumento do valor da frente úmida, obtendo-se um valor de 33 cm de altura para o clima como a umidade relativa de 80%. Observa-se que o valor de acréscimo da altura de frente úmida também eleva com o aumento da umidade relativa atingindo valores de 4, 8,6 e 13 cm na comparação entre cada clima.

5 CONCLUSÃO

A umidade ascensional é um problema complexo e de difícil entendimento, mas o estudo desse fenômeno é de grande importância na construção civil, dado os problemas que a mesma pode causar nas edificações.

No decorrer deste trabalho foi possível observar os fatores que condicionam a umidade ascensional e entender um pouco dos mecanismos de fixação da umidade.

Por meio das simulações numéricas utilizando o software WUFI-2D, possibilitou-se atender os objetivos específicos, observando a diferença de altura de frente úmida para cada fator de influência da umidade ascensional.

Os resultados apresentados permitiram um melhor entendimento dos fatores que influenciam a altura de frente úmida correlacionando este valor com os parâmetros dos materiais ou do clima.

As simulações em que se variou a espessura da parede mostraram que paredes mais finas tendem a apresentar uma altura de frente úmida menor se comparado com paredes com uma espessura mais elevada, mas observou-se também que o acréscimo dessa altura tende a ser menor quanto mais se aumenta a espessura.

Os resultados das simulações referente as diferentes propriedades dos materiais mostraram que os materiais que possuíam uma porosidade maior tendem a possuir uma altura de frente úmida maior e os que apresentam uma quantidade menor de vazios atingem uma menor altura de frente úmida.

Quanto a utilização de revestimento foi possível observar que a aplicação de revestimentos gerou um acréscimo de altura de frente úmida em todas as simulações, porém a utilização de materiais mais porosos para o revestimento possibilita um menor acréscimo de altura de frente úmida e materiais mais impermeáveis geram variações maiores nesta altura.

Com as simulações para a avaliação do efeito do clima na umidade ascensional, verificou-se que climas com temperaturas baixas tendem a proporcionar uma altura de frente úmida maior que os climas com temperaturas mais altas. Já sobre o efeito da umidade relativa percebeu-se que em climas muito úmidos a altura de frente úmida tende a ser maior e em climas com a umidade relativa baixa essa altura tende a diminuir.

Embora o software WUFI-2D apresente algumas limitações em sua utilização, as simulações apresentaram resultados satisfatórios, estando todos em acordo com o que é proposto na literatura.

Para trabalhos posteriores seria importante a utilização de outros materiais nas simulações e uma comparação dos resultados obtidos com experimentos práticos.

REFERÊNCIAS

FREITAS, Vasco Peixoto de, TORRES, Maria Isabel., GUIMARÃES, Ana Sofia. **Humidade Ascensional**. 1 ed. Porto: FEUP edições, 2008. ISBN: 978-972-752-101-2.

FREITAS, Vasco Peixoto de. **Transferência de humidade em paredes de edifícios: Análise do fenómeno de interface**. 1992. Dissertação (Doutorado em engenharia civil), Faculdade de engenharia, Universidade do porto, Porto, 1992.

SALOMÃO, Maria Claudia de Freitas. **Estudo da umidade ascendente em painéis de alvenaria de blocos cerâmicos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SANTOS, Pedro Miguel Valentim dos. **Levantamento, diagnóstico e reabilitação de patologia em edifícios residenciais na região de Viseu**. 2012. Tese (Mestrado em engenharia civil), Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 2012.

SILVA, Nuno Santoalha de Almeida e. **Simulação numérica da influência da interface no fenómeno da humidade ascensional – WUFI-2d**. 2013. Dissertação (Mestrado integral em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2013.

SOCOLOSKI, Rafaela Falcão. **Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TEIXEIRA, Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães. **Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de engenharia, Universidade do porto, Porto, 2007.

WUFI-2D. version 4.2. Fraunhofer Institute for Building Physics. 2019.

ZIRKELBACH, D. et al. **WUFI@ 2D: Calculation Example Step by Step**. Fraunhofer Institute for Building Physics, 2007.