

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE
HUMIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Maria Clara de Carvalho Pimenta do Vale

SETEMBRO 1998



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Civil

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE
HUMIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**

Maria Clara de Carvalho Pimenta do Vale

Licenciada em Arquitectura pela Faculdade de Arquitectura da Universidade do
Porto

Dissertação submetida para a satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Construção de Edifícios

Dissertação realizada sob a supervisão de

Professor Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas
do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro 1998

Ao meu marido, Nelson,
à minha filha, Raquel,
aos meus Pais, Joaquim e Maria José,
e aos meus irmãos, Zé e Ricardo

Universidade do Porto	
Faculdade de Engenharia	
Biblioteca 1	
Nº	60 138
CDU	
Data	25 / 1 / 2002

AGRADECIMENTOS

Gostaria, em primeiro lugar, agradecer ao Prof. Vasco Freitas, pelo apoio e disponibilidade sempre demonstrada, pelos seus conselhos, pela sua atenção e pela sua confiança o meu mais sentido agradecimento

Gostaria também de agradecer ao Nelson, meu marido, pela crítica construtiva e pelo apoio sempre dado, especialmente na aprendizagem de programação, à minha filha, por ter compreendido a importância deste trabalho, e me ter dispensado muitas vezes do meu papel de mãe, e ao Arq. Guilherme Guimarães pela disponibilização do equipamento informático da empresa e pela compreensão demonstrada.

Por último, uma nota de gratidão aos membros da minha família, nomeadamente aos meus pais, meus irmãos e meus sogros, pelo apoio que me concederam neste período atarefado e conturbado da minha vida.

RESUMO

O estudo das transferências conjuntas de calor e humidade em meios porosos é uma tarefa importante para melhor conhecer e compreender o comportamento das paredes dos edifícios ao longo do tempo. A simulação numérica destes fenómenos é um bom auxiliar pois possibilita um maior conhecimento com um menor dispêndio de tempo.

Neste trabalho tomamos como referência o modelo de Luikov e De Vries de transferência de calor e humidade em meios porosos, com a formulação já definida por V. Freitas, no seu programa Trhumidade, e escrevemos um novo programa, para ambiente windows, para simulação numérica do comportamento de paredes de edifícios quando sujeitas as gradientes de temperatura e humidade.

Este programa dispõe de um sistema de entrada de dados amigável do utilizador, bastante simples, e com uma interface gráfica, que permite, num relance, abranger a totalidade dos elementos envolvidos na simulação.

Foram feitas várias simulações, primeiramente com vista à determinação da sensibilidade dos diversos parâmetros utilizados, e posteriormente para estudo de situações reais.

Esta sequência de simulações teve como objectivo o estabelecimento de algumas ideias-chaves e de regras básicas a adaptar à construção civil.

ABSTRACT

Moisture and heat transfer in porous media studies are an important task to better know and understand the behaviour of building envelopes during time. Numerical analyses of this phenomena can be very helpful because makes possible, with less time to know more about it.

In this work, we took Luikov and De Vries model of heat and moisture transfer, with the code already established by V. Freitas on is computer program Trhumidade, and we made a windows based new program for numerical simulation of wall behaviour under moisture and temperature gradients.

This is an user friendly input program, with an graphical interface that gives an entire overview of the simulations conditions, with a single look.

We made some simulations, first to establish the parameter sensibility factors, and then to study some real based situations.

The ultimate objective of this work was to establish some key ideas and basic rules about building construction, which could help people to better build.

RESUMÉ

L'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux, c'est un travail important pour mieux connaître et comprendre le comportement des murs des édifices. La simulation numérique de ce phénomène c'est une bonne aide parce qu'il nous donne la possibilité de mieux connaître avec moins de temps nécessaire.

Dans ce travail nous prenons le modèle de Luikov et De Vries, de transferts de chaleur et d'humidité en milieu poreux, avec la formulation définie par V. Freitas, dans son programme d'ordinateur Trhumidade, et on a écrit un nouveau programme, pour windows, pour la simulation numérique du comportement des murs des édifices, quand sont soumis à gradients de température et d'humidité.

On a fait des simulations, en premier lieu, pour établir la sensibilité des paramètres, et en suite, pour étudier des situations réelles.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL DO TRABALHO

Agradecimentos	III
Resumo	IV
Abstract.....	V
Resumé	VI
Índices.....	VII
Índice Geral do Trabalho	VII
Índice de Figuras.....	X
Índice de Quadros	XIV
Listagem de Abreviaturas e Símbolos.....	XVI
1. Introdução	1
1.1 Objectivo do Trabalho.....	2
1.2 Motivos da Escolha.....	3
1.3 Método Seguido, Organização e Estrutura do Texto	4
2. Modelização da Transferência de Calor e Humidade em Materiais de Construção	6
2.1 Modelos Teóricos de Transferência	6
2.1.1 Modelo de Glaser	9
2.1.2 Modelo de Krischer-Vos	10
2.1.3 Modelo de Luikov e Philip /De Vries	10
2.2 Descrição Matemática do modelo de Luikov e Philip /De Vries	10
2.3 Programas de Cálculo Existentes	15
2.4 Evolução do Programa Trhumidade	21

2.4.1	Trhumidade	21
2.4.2	Trhum 1.0 / Trhum 96	22
2.4.3	Trhum 98.....	25
3.	Concepção do Programa.....	27
3.1	Concepção do Modelo Matemático	27
3.2	Concepção da Interface com o Utilizador.....	29
3.2.1	Entrada de dados	30
3.2.2	Dados necessários	32
3.3	Potencialidades e limitações do Programa.....	41
4.	Simulação Numérica	44
4.1	Estabelecimento das Situações de Simulação.....	44
4.1.1	Condições gerais de localização	44
4.1.2	Materiais	45
4.1.3	Dados climáticos	52
4.2	Simulação do Comportamento em Embebição e Secagem dos Materiais de Construção	54
4.2.1	Condições Iniciais	54
4.2.2	Condicionantes climáticas	58
4.2.3	Intervalo de tempo da simulação	64
4.2.4	Simulação de situações de referência	66
4.2.5	Análise dos resultados da simulação	69
4.2.6	Interpretação dos resultados - correlação com algumas condicionantes da construção	70
5.	Conclusões	71
5.1	Outras Fontes Bibliográficas	74
6.	Anexo A.....	76

6.1	Conceitos, Simbologia E Unidades	76
6.2	Conversões de unidades	96
7.	Anexo B - Listagem parcial do programa.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico representando o comportamento diferencial dos materiais higroscópios em absorção e desabsorção [1]	7
Figura 2 - Diagrama psicrométrico que relaciona as pressões de saturação, o teor de humidade e as humidades relativas das ambiências.....	8
Figura 3 - Organograma do programa Trhumidade [1]	22
Figura 4 - Janela de entrada do programa Trhum 1.0	23
Figura 5 - Aparência do Trhum 96 2.0	23
Figura 6 - organograma da estrutura do programa Trhum 1.0 [6]	24
Figura 7 - Janela de entrada do programa Trhum 98	25
Figura 8 - Janela de tarefas.....	31
Figura 9 - Janela de definição do projecto.....	32
Figura 10 - Janela de definição do objecto	33
Figura 11 - Janela referente ao tempo de simulação.....	34
Figura 12 - Janela de definição de condições constantes.....	35
Figura 13 - Janela de definição dos perfis iniciais da amostra.....	36
Figura 14 - Janela de definição do tipo de ficheiro de clima	37
Figura 15 - Janela de definição de clima constante ao longo da simulação	37
Figura 16 - Janela da definição de clima variável.....	38
Figura 17 – Janela de ligação ao Access, com a base de dados de características dos materiais.....	39
Figura 18 – Janela com a base de dados das características dos materiais.....	40
Figura 19 – Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 - Secagem [1]	41
Figura 20 - Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 - Embebição [1]	42

Figura 21 - Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 – Barreira impermeável à difusão de vapor [1]	43
Figura 22 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade e da temperatura no betão	46
Figura 23 - Variação do coeficiente de difusividade higrotérmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão	46
Figura 24 - Variação da pressão capilar em função do teor de humidade e da temperatura no betão.....	47
Figura 25 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão	47
Figura 26 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular	48
Figura 27 - Variação do coeficiente de difusividade higrotérmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular.....	48
Figura 28 - Variação da pressão capilar em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular	49
Figura 29 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular	49
Figura 30 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade e da temperatura no barro vermelho.....	50
Figura 31 - Variação do coeficiente de difusividade higrotérmica em função do teor de humidade e da temperatura no barro vermelho.....	50
Figura 32 - Variação da pressão capilar em função do teor de humidade e da temperatura no barro vermelho	51
Figura 33 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade e da temperatura no barro vermelho	51
Figura 34 – Zonas Climáticas de Inverno [13]	52
Figura 35 – Zonas climáticas de Verão [13].....	52

Figura 36 - Variação da temperatura no teste da distribuição inicial de temperaturas ao longo da amostra	55
Figura 37 - Variação da temperatura da amostra ao longo de 24 horas - temperatura inicial 10°C	55
Figura 38 - Variação da temperatura da amostra ao longo de 24 horas - temperatura inicial 40°C	56
Figura 39 – Variação do teor de humidade da amostra, partindo de teores de humidade diferentes para humidades relativas, interior e exterior, de 20%	57
Figura 40 – Variação do teor de humidade da amostra, partindo de teores de humidade diferentes para humidades relativas, interior e exterior, de 50%	57
Figura 41 – Variação do teor de humidade ao longo de 10 dias, para humidades relativas de 80 % e 20%, respectivamente.....	58
Figura 42 – Variação do teor de humidade em função das temperaturas interiores e exteriores.....	59
Figura 43 – Variação do teor de humidade em função do gradiente de temperaturas.....	59
Figura 44 – Secagem por gradiente de temperatura.....	60
Figura 45 - Influência da Humidade relativa na secagem do betão	61
Figura 46- Variação do teor de humidade ao longo do tempo - tempo de colocação da amostra em equilíbrio higroscópico com o ambiente para uma baixa humidade relativa.....	61
Figura 47 – Variação do teor de humidade nos terços da amostra.....	62
Figura 48 – Deslocamento da frente húmida para o interior da parede.....	63
Figura 49 – Diferença de teor de humidade de duas amostras.....	63
Figura 50 – Variação do teor de humidade da amostra em função do intervalo de tempo escolhido para simulação (perfil efectuado no ponto médio da amostra)	65
Figura 51 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) – $Tr_{humidade} [1]$	66
Figura 52 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) – $Tr_{hum} 98$	66

Figura 53 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-50%) – Trhumidade [1]	67
Figura 54 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-50%) – Trhum 98.....	67
Figura 55 – Embebição diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-75%) e da temperatura (0.2°C – 25°C) – Trhum 98	68
Figura 56 – Embebição e secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) e da temperatura (0.2°C – 45°C) – Trhum 98	68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo do Inquérito sobre modelos de transferência de calor, ar e humidade - Janeiro de 1993 [11]	17
Quadro 2 - Novos programas informáticos de modelização de transferência de calor e/ou ar e/ou humidade para diversas áreas [24] [31]	20
Quadro 3 - Dados necessários para definição do projecto	32
Quadro 4 - Dados necessários à definição do objecto	33
Quadro 5 - Definição dos dados necessários ao estabelecimento do tempo de simulação	34
Quadro 6 - Definição dos dados constantes necessários à simulação	35
Quadro 7 - Definição dos perfis iniciais de temperatura e teor de humidade.....	36
Quadro 8 - Identificação dos tipos de ficheiros de clima possíveis	37
Quadro 9 - Definição dos dados de clima necessários.....	38
Quadro 10 – Definição das bases de dados existentes no programa.....	39
Quadro 11 - Coordenadas Geográficas de algumas localidades Portuguesas [29]	45
Quadro 12 - Pressão atmosférica média em algumas cidades portuguesas [29]	53
Quadro 13 - Temperatura Média em algumas cidades portuguesas [29]	53
Quadro 14 - Valores fixos no teste da distribuição inicial de temperaturas ao longo da amostra.....	54
Quadro 15- Valores fixos no teste da distribuição inicial de teores de Humidade ao longo da amostra.....	56
Quadro 16 - Valores fixos no testes da variação das temperaturas exteriores e interiores ao longo do tempo	58
Quadro 17 - Valores fixos no testes da variação das humidades relativas exteriores e interiores ao longo do tempo	60
Quadro 18 – Valores fixos no teste da influencia da radiação sobre a secagem das paredes.	62

Quadro 19 - Valores de teste no estudo da influencia conjunta da chuva, temperatura e
humidade relativa.....64

Quadro 20 - Valores fixos no testes da variação do intervalo de tempo 64

LISTAGEM DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atenuação	m^2/Kg
β	Coeficiente de transferência superficial de umidade	m/s
η	Coeficiente de viscosidade dinâmica	N.s/m^2
λ	Condutibilidade térmica	$\text{W/m}^2.\text{°C}$; $\text{W/m}^2 .\text{K}$
θ	Humidade Absoluta	Kg/m^3
ρ	Massa volúmica	Kg/m^3
π	Permeabilidade ao vapor	kg/m.s.Pa ; g/m.h.mmHg
ε	Porosidade	%
ψ	Sucção capilar	Pa ; $\text{m H}_2\text{O}$; N/m^2
σ	Tensão interfacial ou superficial	N/m
θ ; W_v ; W	Teor de umidade (volumico)	m^3/m^3
λ^*	Condutibilidade térmica aparente	$\text{W/m}^2.\text{°C}$; $\text{W/m}^2 .\text{K}$
ρ^*	Massa volúmica equivalente	Kg/m^3
φ ; HR	Humidade relativa	%
θ_h	Ângulo de humidificação	grau
ρ_s	Massa volúmica seca	Kg/m^3
B	Coeficiente de penetração da umidade	$\text{m.s}^{-1/2}$
c	Calor específico	J/Kg.K ; $\text{Cal/g } \text{°C}$
c^*	Calor específico equivalente	J/Kg.K ; $\text{Cal/g } \text{°C}$
C_h	Concentração de umidade	Kg/m^3
c_s	Calor específico do material seco	J/Kg.K ; $\text{Cal/g } \text{°C}$
C_v	Concentração de vapor	Kg/m^3
DT	Coeficiente de difusividade higratérmica	$\text{m}^2/\text{s.K}$
DW	Coeficiente de difusividade hídrica	m^2/s
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
H	Entalpia	
h (h_e ; h_i)	Coeficiente de condutância térmica superficial	$\text{W/m}^2.\text{°C}$; $\text{W/m}^2 .\text{K}$
K	Coeficiente de transmissão térmica	$\text{W/m}^2.\text{°C}$; $\text{W/m}^2 .\text{K}$
P	Permeância	$\text{g/m}^2.\text{h.mmHg}$; $\text{Kg/m}^2.\text{s.Pa}$
P	Pressão	atm ; mmHg ; mb ; Pa ; N/m^2

P	Pressão Atmosférica	atm ; mmHg ; mb
P_c	Pressão capilar	Pa ; N/m ²
P_s	Pressão de saturação	N/m ² ; Pa
P_v	Peso Volúmico	Kg/m ³
P_v	Pressão de vapor	N/m ² ; Pa
R	Raio de curvatura	m
r	Raio do poro	m
R_{term}	Resistência térmica	m ² .°C/W ; m ² .K/W
S	Grau de saturação	%, Kg/Kg
T	Temperatura	°C ; K
t	Tempo	s
V	Volume	m ³
v	Volume específico	m ³
V_a	Volume fase gasosa	m ³
W_{cr}	Teor de humidade crítico	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_h	Teor de Humidade higroscópica	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_h	Teor de humidade higroscópico	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_L	Teor de humidade livre	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_m ; W	Teor de humidade (mássico)	Kg/Kg
W_{max}	Teor de Humidade máxima	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_{sat}	Teor de Humidade de saturação	Kg/Kg ; m ³ /m ³
W_{sat}	Teor de Humidade saturação	Kg/Kg ; m ³ /m ³

1. INTRODUÇÃO

A actividade da construção civil em Portugal, continua ainda a ser encarada de uma forma muito empírica, e muito pouco qualificada. O saber de experiências feito, que outrora nos dava alguma segurança na qualidade, resistência e longevidade das construções, hoje em dia deu lugar a uma inexperiência quase sistemática e a um desconhecimento profundo da actividade, de grande parte dos intervenientes na construção. Esta desqualificação que tem vindo a verificar-se tem razões múltiplas, mas concorrendo todas para o mesmo efeito.

A mão de obra, na grande maioria dos casos, não é qualificada nem específica para determinado trabalho. Normalmente não existem sistemas de formação, inicial ou contínua, nem de reconversão da mão da obra. Onde dantes existia a passagem de saberes de mestre para aprendiz ficou o vazio.

A alteração dos modos de construir, em muitos casos, foi também penalizante para a qualidade dos edifícios. O aligeiramento das paredes das construções, e consequente diminuição da sua inércia, possibilitado pelo facto de lhes ter sido retirada a função estrutural de suporte, agora desempenhada pelo betão armado, cria, por si só, condições para a existência de sérias patologias nas construções, quando não são tomados cuidados adicionais.

A rapidez com que os sistemas de construção se alteram, não permitem o enraizamento das novas formas de construir no conhecimento colectivo não especializado, com a celeridade que seria desejável. Não permitem, pela passagem dos anos, o necessário teste natural dos mesmos sistemas.

A elevada diversidade de materiais construtivos disponíveis, com condicionantes próprios e diferentes, e que aumenta dia a dia, dificulta também, numa determinada vertente, a qualificação da construção. O desejo de inovar não vem sempre acompanhado pelo conhecimento das condições de aplicação dos diversos materiais.

Não devemos pensar que a deficiente qualidade da nossa construção resulta unicamente de deficiências na execução. Resulta antes, principal e fundamentalmente, de erros de

concepção do sistema construtivo, do modo como se relacionam todos os materiais envolvidos, da maneira como são colocados em conjunto.

A água é o principal elemento responsável pelas patologias existentes nas construções, quer como razão ou consequência, nas suas diversas formas e estados.

A qualificação das edificações passa pelo estudo dos diversos fenómenos associados à construção, nomeadamente os que envolvem a transferências de humidade entre os materiais construtivos e as ambiências, assunto que tem merecido o interesse desde sempre.

1.1 OBJECTIVO DO TRABALHO

O deficiente conhecimento dos mecanismos de secagem dos diversos materiais construtivos usados correntemente na construção, e sobretudo dos tempos necessários à secagem dos mesmos, por uma lado, e a necessidade de encurtar prazos de obra, por outro, torna o estudo da secagem dos materiais de construção premente, com vista ao estabelecimento de algumas normas básicas que possibilitem a garantia de um mínimo de qualidade na execução de diversos trabalhos de construção civil.

É importante estudar os mecanismos de transferência de humidade entre os materiais construtivos e a envolvente, quer essa humidade resulte da água necessária à trabalhabilidade do material na fase de construção, quer resulte de infiltrações das águas das chuvas durante a vida útil do mesmo, ou então de condensações que ocorram no seu interior, motivadas pelos gradientes de pressão e temperatura a que estão sujeitos.

A existência de diversos modelos teóricos de transferência de humidade dos materiais, e a exploração e validação já feitos dos mesmos, particularmente através do Programa TRHUMIDADE, elaborado por V. Freitas [1], possibilita agora um estudo sistemático dos fenómenos associados a ciclos de humedecimento e secagem de diversos materiais construtivos.

O presente estudo, visa, em última instância, o estabelecimento e definição de algumas regras, práticas e simples, a seguir na construção de edifícios, que permitam, por si só, uma maior garantia de qualidade da mesma.

1.2 MOTIVOS DA ESCOLHA

Para quem lida com a construção no seu dia a dia, quer a nível de concepção dos espaços e sistemas construtivos, quer ao nível da própria construção, no seguimento das obras, ou mesmo da recuperação de construções antigas, mais ou menos danificadas, a problemática da qualidade, da durabilidade, da manutenção e seus custo, dos materiais e elementos construtivos está sobremaneira presente.

A necessidade de "antever", aquando da escolha de determinado material, ou sistema construtivo, o seu estado ao fim de determinado espaço de tempo, os montantes despendidos na sua manutenção por deficiências ou de concepção ou execução são aspectos que nos acompanham na nossa actividade diária.

A determinação científica e rigorosa dos fenómenos físicos e químicos associados à construção, se bem que difícil, em virtude da complexidade do problema, em si, não é garante de qualidade, primeiro, porque implica um conhecimento mais profundo das ciências naturais do que aquela que as pessoas ligadas à construção usualmente possuem, e em segundo lugar, pela quantidade de variáveis em jogo não permitir uma relação directa e simples de causa - efeito. É importante poder predizer, com algum rigor ou aproximação, o comportamento ao longo do tempo de um sistema construtivo, sem contudo despendar muito tempo na análise efectiva da situação.

Poder simular, ainda que parcialmente, o comportamento ao longo do tempo, de um edifício, ou de alguns dos seus componentes, permitirá uma escolha de soluções mais consciente e informada, (e esperamos que mais acertada!), com ganhos evidentes, na qualidade do conjunto, na sua durabilidade, resistência, estanqueidade, desempenho térmico assim como na manutenção do seu aspecto.

Poder simular os fenómenos de secagem dos materiais construtivos, em função de determinado clima, permite-nos o estabelecimento de prazos mais correctos para o faseamento e encadeamento das diversas actividades de uma obra.

Com base em modelos teóricos de comportamento de materiais porosos sujeitos a gradientes de temperatura e humidade, já testados no confronto com a análise de situações reais, e válidos dentro de determinadas fronteiras, é possível elaborar programas informáticos, que simulem esses comportamentos ao longo do tempo.

O interesse por esta problemática tem vindo a crescer desde a década de 50, em vários países do mundo, tendo-se realizado progressivamente cada vez mais estudos sobre o assunto. Como ferramenta importante, e quase indispensável, nesses estudos surgem os programas informáticos de simulação, mais ou menos potentes, mais ou menos restritos... Nesta altura existem já vários programas informáticos distintos para simulação do comportamento dos materiais construtivos, com características e aplicações diversas também.

1.3 MÉTODO SEGUIDO, ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho, uma vez que se baseia num modelo teórico, já definido e validado, orientou-se para a sistematização do estudo do comportamento dos materiais, primeiro pela adaptação do programa informático existente a uma linguagem e imagem mais actuais, e amigas do utilizador e depois pelas simulações de várias situações, que permitiram inferir regras de comportamento e execução, quando fixados alguns dos parâmetros.

Os programas informáticos anteriormente realizados desenvolviam-se ainda sobre uma plataforma DOS, com tudo o que isso implica a nível de funcionamento e imagem. A presente versão do programa foi rescrita em Visual Basic para plataforma Windows 95 ou superior, permitindo uma melhor relação do utilizador comum com o programa, com uma utilização mais intuitiva, e sistemas de ajuda interactiva.

O programa informático não era a finalidade última do trabalho, mas um meio, uma ferramenta importante de simulação que auxilia o estudo, e que poderá permitir, no futuro, uma maior penetração deste tipo de estudos de comportamento por simulação nas actividades mais prosaicas da construção.

O presente trabalho estrutura-se da seguinte forma: uma primeira parte de enquadramento nos sistemas de modelização da transferência de calor e humidade em materiais de construção; uma segunda referente à concepção do programa utilizado; a terceira parte é referente ao estabelecimento de condições de simulação e às simulação de situações, e uma última parte de interpretação e comparação dos resultados, conclusões e estabelecimento de regras práticas. Em apêndice colocamos informações adicionais sobre o tema e sobre o programa informático, que julgamos serem de utilidade, mas que carregariam demasiado o texto, se inseridos no corpo do trabalho.

No capítulo 2 damos uma perspectiva global de diversos modelos existentes de transferência de humidade e calor em materiais, das leis pelas quais se regem, e dos programas informáticos para simulação, suas características e restrições. Particularizamos a análise do modelo de Luikov / De Vries, uma vez que foi o modelo seguido na elaboração do presente estudo. Seguidamente fazemos o historial do programa *TRHUMIDADE*, da evolução formal e funcional do mesmo, e uma apresentação mais detalhada da presente versão.

No capítulo 3 esclarecem-se alguns aspectos referentes à concepção do programa *TRHUMIDADE*, com a definição mais detalhada dos elementos necessários, do modo de funcionamento, e da forma de apresentação dos resultados.

No capítulo 4 estabelecemos as várias condições de simulação propostas, que nos permitiram fazer análises de sensibilidade dos diversos parâmetros envolvidos na simulação, fazendo a simulação e uma primeira análise dos resultados com vista a uma nova sequência de simulações. Dá-mos particular ênfase à apresentação gráfica quer das variáveis iniciais, quer dos resultados, para uma rápida apreensão da globalidade da simulação.

A análise dos resultados das simulações permitiu tirar algumas conclusões relativamente ao comportamento de certos materiais em determinado conjunto de condições, e relacionar com as diversas condicionantes existentes numa obra, e o modo como se poderão interrelacionar com vista a uma melhor qualificação dos elementos construídos. Estas conclusões deram origem a algumas regras básicas, de simples implementação, para serem utilizadas em construções sem requisitos especiais, como uma forma de garantia de uma qualidade mínima. Permitiram ainda estabelecer algumas linhas que julgamos poderem ser seguidas em trabalhos futuros sobre esta temática.

Temos ainda um outro desejo, que é o de poder eventualmente contribuir para a passagem de uma análise qualitativa das construções, para uma análise quantitativa das mesmas que possa servir de base, por exemplo, a um sistema de certificação da construção.

2. MODELIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.1 MODELOS TEÓRICOS DE TRANSFERÊNCIA

Os materiais utilizados correntemente na construção, são, quase sem exceção, materiais com uma estrutura porosa, isto é, materiais, que ou na sua estrutura microscópica ou macroscópica, possuem ocos, espaços que embora pertencendo à forma do material, não se encontram preenchidos pelo mesmo. Estes espaços encontram-se preenchidos pelo elemento, ou elementos que envolvem o material, ar, se o material se encontra na atmosfera, ar e água, se o material se encontra em ambiente mais ou menos húmido, ou um outro qualquer elemento, no estado líquido ou gasoso, que pela sua estrutura e dimensão molecular, possa preencher os "ocos" do material. Os meios porosos são extremamente complexos porque são compostos por elementos em três fases, sólida, líquida e gasosa.[2]

A fixação e o transporte de humidades em materiais porosos, resulta essencialmente de três mecanismos físicos fundamentais: a absorção, a condensação e a capilaridade.[1] Estes três fenómenos são responsáveis, na generalidade dos casos, pela justificação da variação do teor de humidade de um material poroso.

O comportamento higroscópico dos materiais caracteriza-se pela variação do seu teor de humidade em função da humidade relativa da ambiência em que estão colocados. A generalidade dos materiais utilizados correntemente em construção civil são higroscópicos, em maior ou menor grau. A fixação da humidade no material processa-se em três fases, primeiramente ocorre a fixação de uma única camada de moléculas de água no interior dos poros, *absorção monomolecular*, seguidamente, assiste-se à deposição de camadas sucessivas de moléculas, *absorção plurimolecular*. Quando ou a quantidade de moléculas depositadas é suficientemente grande, ou o diâmetro do poro relativamente pequeno, as diversas camadas de moléculas que envolvem as paredes do poro juntam-se, estando nessa altura configurado o fenómeno de condensação capilar.

A histerese, nos materiais higroscópios, define-se como o comportamento diferencial, em absorção e em desabsorção, em embebição e em secagem, dos mesmos. Este fenómeno tem especial incidência nas fases de condensação capilar e de absorção plurimolecular.

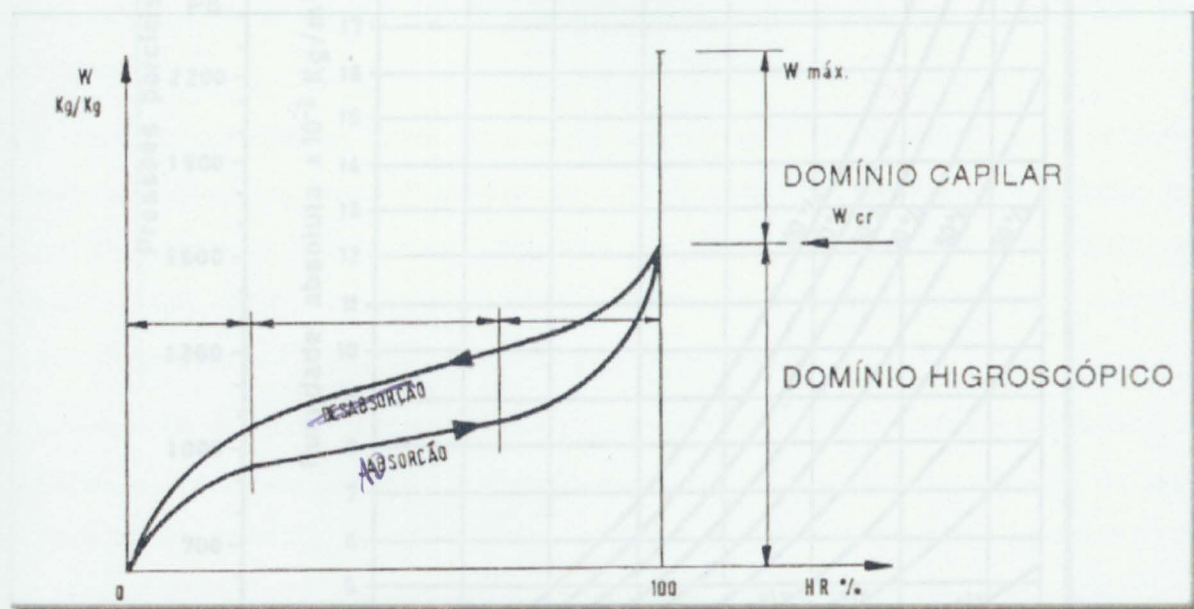


Figura 1 - Gráfico representando o comportamento diferencial dos materiais higroscópios em absorção e desabsorção [1]

A condensação de um líquido que se encontre na fase de vapor, ocorre sempre que a pressão instalada seja superior à pressão de saturação do mesmo. Uma vez que, quer a pressão de saturação, quer a pressão instalada, são influenciadas pela temperatura, a principal razão para a ocorrência de condensações é a diminuição da temperatura e consequentemente a diminuição da pressão de saturação. [Anexo B - Listagem parcial do programa] No momento que a pressão de vapor instalada é igualada pela pressão de saturação, verifica-se a condensação do vapor. [Figura 2]

As condensações ocorrem geralmente, ou quando existe um forte gradiente de temperaturas, e não são tomados os cuidados para impedir o estabelecimento de condições próximas da pressão de saturação, ou quando, apesar do gradiente de temperatura não ser importante, estamos perante teores de humidade elevados.

Se as condensações ocorrem no interior de um material são designadas por condensações internas, se ocorrem na superfície do mesmo são apelidadas de condensações superficiais.

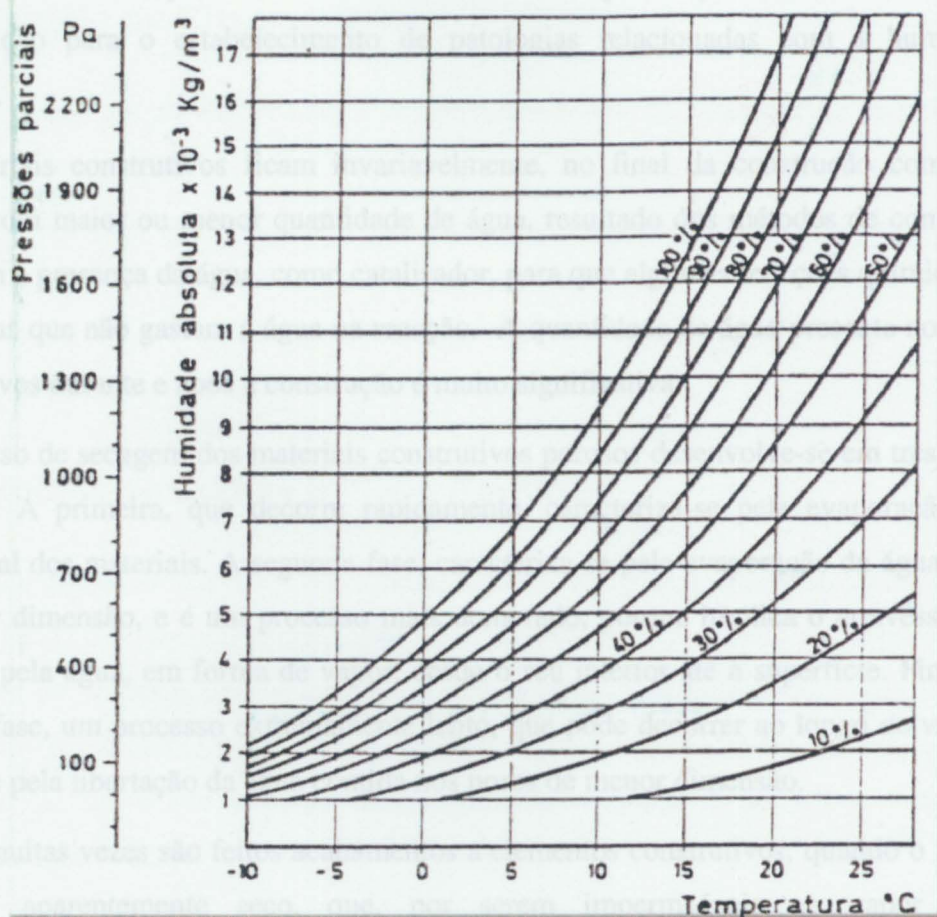


Figura 2 - Diagrama psicrométrico que relaciona as pressões de saturação, o teor de humidade e as humidades relativas das ambiências.

A capilaridade resulta das forças de atracção que se desenvolvem entre um corpo no estado sólido e um líquido, e podem anular ou inverter outras forças, como por exemplo a gravidade. A capilaridade é responsável pelo humedecimento e embebição de sólidos que se encontram em contacto directo com um líquido, funcionando a estrutura porosa do mesmo como um sistema de vasos capilares. A pressão capilar é função da temperatura, da humidade e da dimensão da estrutura porosa do material.

A pressão capilar varia em função inversa do teor de humidade, anulando-se para um teor de humidade igual ao teor de humidade máximo.[1]

Para além dos fenómenos atrás descritos, como responsáveis pelo humedecimento dos materiais, a construção, com todos os trabalhos que implica, tem uma importante contribuição para o estabelecimento de patologias relacionadas com a humidade nos edifícios.

Os materiais construtivos ficam invariavelmente, no final da construção com os poros cheios, com maior ou menor quantidade de água, resultado dos métodos de confecção que requerem a presença da água, como catalisador, para que algumas reacções químicas tenham lugar, mas que não gastam a água na reacção. A quantidade de água presente nos materiais construtivos durante e após a construção é muito significativa.

O processo de secagem dos materiais construtivos porosos desenvolve-se em três fases [3] distintas. A primeira, que decorre rapidamente, caracteriza-se pela evaporação da água superficial dos materiais. A segunda fase, caracteriza-se pela evaporação da água dos poros de maior dimensão, e é um processo mais demorado, porque implica o atravessamento do material pela água, em forma de vapor, desde o seu interior até à superfície. Finalmente, a terceira fase, um processo extremamente lento, que pode decorrer ao longo de vários anos, traduz-se pela libertação da água contida nos poros de menor dimensão.

Assim, muitas vezes são feitos acabamentos a elementos construtivos, quando o material se encontra aparentemente seco, que, por serem impermeáveis ao vapor de água, impossibilitam esta secagem mais profunda, dando lugar a patologias graves.

A necessidade de caracterizar as situações e os mecanismos de transferência de humidade levou ao aparecimento de modelos matemáticos que pretendem definir e reproduzir esses fenómenos.

2.1.1 Modelo de Glaser

O modelo matemático de simulação da termodifusão de Glaser é baseado na lei de Fick, sendo unicamente válido para condições estacionárias e permanentes.

Permite, pela sua simplicidade, um rápido e fácil cálculo dos riscos de condensações no interior dos elementos de construção, através de resolução gráfica do problema, contudo não

contempla qualquer movimento posterior da fase líquida resultante das condensações. Tem servido como instrumento para previsão do comportamento à humidade de paredes e como base para definição de regras de qualidade de elementos construtivos.

2.1.2 Modelo de Krischer-Vos

Continua a ser um método bastante simplificador dos mecanismos de transferência de humidade em materiais porosos. A evolução relativamente ao método de Glaser surge no facto de considerar, para além do vapor de água, a água em fase líquida, e calcular a dimensão da zona condensada, (não a quantidade condensada). O cálculo baseia-se essencialmente no efeito dos gradientes de humidade, não considerando o efeito dos gradientes de temperatura na transferência de humidade.

2.1.3 Modelo de Luikov e Philip /De Vries

Os modelos matemáticos desenvolvidos, independentemente e quase simultaneamente por Luikov (1954) e Philip/ De Vries (1957), são semelhantes, residindo a sua única diferença no sistema de unidades para a medição da concentração de humidade, volúmica (m^3/m^3) com Luikov e mássica (Kg/Kg) com Philip /De Vries. Estes modelos permitem o cálculo do transporte de humidade simultaneamente na fase líquida e de vapor, bem como a transferência de calor.[1]

2.2 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DE LUIKOV E PHILIP /DE VRIES

O modelo proposto por Luikov e Philip /De Vries baseia-se nas Leis de difusão da massa de Fick e Darcy e na Lei da difusão de calor de Fourier, e é o que iremos utilizar neste trabalho, com as hipóteses simplificativas já estabelecidas por Vasco Freitas.[1] [6]

As equações de conservação de calor e de massa para meios macroscopicamente homogêneos são as seguintes:

Conservação da massa:

$$\frac{d}{dt}(\rho_i \theta_i) = -\nabla(\dot{m}_{ic} + \vec{m}_{id}) + M_i \quad (2-1)$$

Conservação da energia

$$\frac{d}{dt}(\rho_i h_i + \rho_w h_w \theta_i) = -\nabla(\dot{q} + h_w(\vec{m}_{ic} + \vec{m}_{id})) \quad (2-2)$$

em que:

ρ_i, ρ_w	[Kg/m ³]	Densidade do material e da água
$\vec{m}_{ic}, \vec{m}_{id}$	[Kg/m ² s]	Densidade de fluxo de massa transportada por convecção e difusão
$\dot{q}$	[J/m ² s]	Densidade do fluxo de calor transportado por condução
M_i	[Kg/m ³ s]	Termo traduzindo a condensação – evaporação
h_i, h_w	[Jm ³ /Kg]	Entalpias mássicas da água e do material
θ	[m ³ /m ³]	Teor de humidade

Assumindo-se que existe conservação da massa global, o somatório dos termos que traduzem a condensação – evaporação (M_i) deverá ser igual a zero. É também admitido que $\vec{m}_{ic} = 0$, considerando que os materiais de construção não são permeáveis ao ar.[1]

O movimento da humidade pode ser dividido em movimento na fase líquida e movimento na fase vapor.

Movimento na fase líquida

$$\vec{m}_{ld} = -\rho_l (D\theta_l \cdot \nabla \theta_l + D_t \cdot \nabla T) + \rho_l K \cdot \vec{K} \quad (2.3)$$

Movimento na Fase Vapor

$$\vec{m}_{vd} = -\rho_v (D\theta_v \cdot \nabla \theta_v + D_t \cdot \nabla T) \quad (2.4)$$

O potencial de gravidade $\rho_l K \cdot \vec{K}$ deverá ser desprezado, uma vez que iremos estudar transferência de humidade em paredes verticais submetidas a um fluxo unidireccional horizontal.

Partindo ainda dos seguintes pressupostos simplíficativos;

- Que o meio poroso se encontra submetido a pequenos gradientes de temperatura;
- Que a capacidade calorífica varia pouco com a temperatura;
- Que a água é incompressível;

podemos escrever as equações generalizadas do modelo de Philip/De Vries.

Massa

$$(1 + \alpha) \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + x \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (D\theta \cdot \nabla \theta_l + D_t \cdot \nabla T) \quad (2.5)$$

Energia

$$\begin{aligned} (\rho C) * \frac{\partial T}{\partial t} = & \nabla (\lambda * \nabla T) + \rho_l C_l (D\theta_l \cdot \nabla \theta_l + D_t \cdot \nabla T) \cdot \nabla T + \\ & + \rho_l \rho_v (D\theta_v \cdot \nabla \theta_v + D_t \cdot \nabla T) \cdot \nabla T + \\ & + \rho_l L (\nabla (D\theta_v \cdot \nabla \theta_v + D_t \cdot \nabla T)) - \\ & - \alpha \frac{\partial \theta_l}{\partial t} - x \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.6)$$

As equações simplificadas de Philip/De Vries são obtidas, admitindo que o transporte de energia devido ao fluxo de massa é negligenciável, assim como a variação temporal do teor de vapor de água condensada.

Massa

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla(D\theta_l \cdot \nabla \theta_l + D_t \cdot \nabla T) \quad (2-7)$$

Energia

$$(\rho C) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + \rho_l L \nabla(D\theta_v \cdot \nabla \theta_l + D_t \cdot \nabla T) \quad (2-8)$$

Resumidamente, como pressupostos simplificativos do modelo foram considerados os seguintes aspectos:

- Os materiais porosos encontram-se submetidos a fracos gradientes de temperatura.
- Os materiais de construção não são permeáveis ao ar.
- A influência da parcela referente ao transporte de calor por fenómenos de evaporação - condensação é pouco significativa face ao transporte por difusão, pelo que pode ser desprezada.
- Os materiais usados em construção civil são homogéneos e macroscopicamente isotrópicos.
- Os materiais deverão ter estrutura indeformável.
- Não existe qualquer reacção química entre a água e os componentes do material de construção
- Considera-se negligenciável o potencial da gravidade.

- O modelo não contempla nem o congelamento da água, nem a ebulição, nem o degelo, pelo que devemos compreender as temperaturas dos materiais entre os 4°C e os 99°C
- O teor de humidade da fase líquida é muito mais elevado do que o da fase vapor.

O sistema de equações diferenciais que serviram de base ao programa de cálculo automático Trhumidade, na simulação do comportamento das paredes de edifícios à transferência conjunta de calor e humidade, em regime variável e para um fluxo unidireccional, após as simplificações atrás descritas, foram as seguintes:

Massa

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dw \frac{\partial w}{\partial x} + Dt \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{ 2-9}$$

Energia

$$(\rho C)^* \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{ 2-10}$$

Em que:

ρ^*	[Kg/m ³]	Massa volúmica equivalente
C^*	[J/Kg.K]	Capacidade calorífica equivalente
λ^*	[W/mK]	Condutibilidade térmica aparente
T	[°C]	Temperatura
Dw	[m2/s]	Coefficiente de difusividade hídrica
Dt	[m2/sK]	Coefficiente de difusividade higrotérmica
θ	[m ³ /m ³]	Teor de humidade
w	[Kg/Kg]	Teor de Humidade

$$w = \frac{\theta_l}{\theta_0}$$

A teoria de Philip/De Vries tem sido utilizada por diversos investigadores para previsão ou simulação do comportamento de elementos porosos quando sujeitos à transferência conjunta de humidade e calor, tendo, na generalidade, existido uma boa concordância dos valores experimentais com os valores obtidos pelo modelo teórico.

Estas verificações do modelo de De Vries permitem-nos afirmar que, apesar de poderem permanecer algumas dúvidas quanto à definição de alguns parâmetros experimentais, o mesmo já foi suficientemente validado e poderá servir de base a estudos de simulação numérica, sem componente experimental, do comportamentos dos materiais sujeitos à transferência conjunta de calor e humidade.

2.3 PROGRAMAS DE CÁLCULO EXISTENTES

A "International Energy Agency" foi criada em 1975 com o propósito de aumentar a segurança energética através da conservação de energia e do desenvolvimento de fontes de energia alternativas. Uma das áreas de intervenção desta comissão é a conservação de energia em edifícios.

Na sequência dos trabalhos da comissão, foi elaborado um inquérito aos modelos de simulação e monitorização de edifícios existentes, no respeitante aos fenómenos de transferências de calor, ar e humidade, em elementos de construção. Este inquérito foi realizado nos diversos países que faziam parte da comissão; Bélgica, Canadá, Dinamarca, Alemanha, Finlândia, Grécia, Itália, Japão, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos, dando-nos uma panorâmica do estado de desenvolvimento desta área científica, nessa altura, e do interesse suscitado por este ramo de investigação nos diversos países. Devemos referir que Portugal não fez parte dessa Comissão, razão pela qual o Programa Trhumidade, realizado por V. Freitas [1], em 1992, não aparece mencionado.

Os trabalhos da comissão que deveria elaborar o "Annex 24", desenvolveram-se nas seguintes vertentes:

- Desenvolvimento do Modelo e Algoritmo - implementação, melhoria na modelização bem como teste de modelos simplificados com potencialidade de utilização na simulação.
- Condições ambientais interiores e exteriores – escolha dos parâmetros ambientais, metodologia de análise e estabelecimento de bases de dados de condicionantes climáticas.
- Propriedades dos materiais – Determinação e recolha das propriedades dos materiais com relevância para o estudo.
- Verificação experimental – Ensaios de transferência de humidade, calor e ar, e comparação com valores obtidos pelo modelo.
- Prática e desempenho – transposição do conhecimento adquirido para uma correcta concepção e execução de elementos construtivos.

Foi feito um inquérito, junto dos países participantes, entre 1991 e 1993, que originou uma listagem comparativa dos modelos matemáticos de simulação da transferência de humidade, ar e calor e correspondentes programas informáticos.

Quadro 1 - Resumo do Inquérito sobre modelos de transferência de calor, ar e humidade - Janeiro de 1993 [11]

Nome do Modelo	Tipo de transferência	Tipo de Modelo	País	Instituto
WALLDRY	1D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 7	Canadá	CMHC
WALLFEM	1D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 9	Canadá	CMHC
Wand	1D - Calor + Humidade	Tipo 1	Bélgica	KU - Leuven, LB
Glasta	1D - Calor + Humidade	Tipo 2	Bélgica	Physibel
HAMPI	1D - Calor + Humidade	Tipo 3	Canadá	Universidade de Saskatchewan
MATCH	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Dinamarca	TU - Dinamarca Therm. Insul. Lab
LTMB	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	França	INSA, Dep Genie-Civil, Toulouse
V30	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	França	CSTB
WFTK	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Alemanha	Fraunhofer Institut fur Bauphysik
JOKE	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Alemanha	TU - Cottbus Fachber. Physik + Werkstoffe
COND	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Alemanha	TU - Cottbus Fachber. Physik + Werkstoffe
HYGRO	1D - Calor + Humidade	Tipo 1	Holanda	TNO - Bouw, afdeling BBI
P1200A	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Suécia	SP
FUKT74:6	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Suécia	Gullfiber AB
BRECON2	1D - Calor + Humidade	Tipo 1	Reino Unido	BRE Scottish Laboratory
MOIST	1D - Calor + Humidade	Tipo 4	Estados Unidos	National Institute of Standards and Technology
NatKon	2D - Calor + Ar	Tipo 5	Bélgica	KU - Leuven, LB
AHCONP, ANHCONP	2D - Calor + Ar	Tipo 5	Suécia	Lund University
EMPTEDD	2D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 6	Canadá	TROW _ CMHC
TRATMO2	2D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 9	Finlândia	VTT - Lab. Of Heating and Ventilation
TCCC2D	2D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 8	Finlândia	VTT - Lab. Of Heating and Ventilation
LATENITE	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	Canadá	NRC , IRC
CHEoH	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	França	Intitut de Mécanique des Fluides, Toulouse
TONY	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	França	Intitut de Mécanique des Fluides, Toulouse
V320	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	França	CSTB
WUFIZ	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	Alemanha	Fraunhofer Institut fur Bauphysik
VADAU	2D - Calor + Humidade	Tipo 4	Suécia	Chalmers University of Technology
WISH - 3D	3D - Calor + Ar	Tipo 5	Holanda	TNO - Bouw, afdeling BBI
Konvek	3D - Calor + Ar + Humidade	Tipo 6	Bélgica	KU - Leuven, LB

Os programas podem ser divididos em 9 tipos diferentes, do ponto de vista do modelo matemático utilizado;

- Tipo 1 – Baseados no modelo de Glaser de transferência de calor e difusão de vapor; Condições climáticas constantes, propriedades dos materiais constantes. Elemento de relação entre a transferência de calor e a difusão de vapor: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$.
- Tipo 2 - Baseados no modelo de Glaser de transferência de calor e difusão de vapor, corrigido para a transferência capilar de humidade, resultante da condensação. Condições climáticas constantes, propriedades dos materiais constantes. Elemento de relação entre a transferência de calor e a difusão de vapor: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$.
- Tipo 3 – Transferência de calor e difusão de vapor em regime variável. As propriedades dos materiais são função do seu teor em humidade. Elementos de relação entre a transferência de calor e a difusão de vapor: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$ e o calor latente.
- Tipo 4 - Transferência de calor, água líquida e difusão de vapor em regime variável. . As propriedades dos materiais são função do seu teor em humidade e da sua temperatura. Elementos de relação entre a transferência de calor e a difusão de vapor: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$ e o calor latente.
- Tipo 5 – Transferência de calor e ar, em regime variável e constante. Propriedades dos materiais constantes. Elemento de relação entre a transferência de calor e de a: a entalpia (H).
- Tipo 6 – Transferência de calor, ar e difusão de vapor em regime constante. Propriedades dos materiais constantes. Elementos de relação entre a transferência de calor e de massa: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$, o calor latente., e a entalpia (H).
- Tipo 7 - Transferência de calor, ar em regime constante, difusão de vapor em regime variável. Propriedades dos materiais constantes. Elementos de relação entre a transferência de calor e de massa: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$, o calor latente, e a entalpia (H).

- Tipo 8 - Transferência de calor, ar e difusão de vapor em regime variável. Propriedades dos materiais função do seu teor de humidade e temperatura. Elementos de relação entre a transferência de calor e de massa: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$, o calor latente, e a entalpia (H).
- Tipo 9 - Transferência de calor, ar, água líquida e difusão de vapor em regime variável. Propriedades dos materiais função do seu teor de humidade e temperatura. Elementos de relação entre a transferência de calor e de massa: a equação da Pressão de Saturação $P_{sat}(T)$, o calor latente, e a entalpia (H).

Os programas informáticos listados são encarados fundamentalmente como instrumentos de investigação para a equipa que os elaborou e que domina o seu uso. Não existe, na maioria deles uma aposta na divulgação dos mesmos com vista à generalização do seu uso. Dos 29 programas a que o “Annex 24” faz referência apenas 6 estão disponíveis numa base comercial.

Desde 1993 o panorama alterou-se ligeiramente, por um lado pela evolução natural dos programas existentes, com novas versões, e plataformas mais amigas do utilizador, e por outro, pela divulgação de programas existentes, num grande veículo de informação que é a Internet. Assistiu-se também a um interesse crescente pela modelização das transferências de calor, de ar e sobretudo de humidade por parte de outras áreas científica e tecnológicas.

A importância quer do estudo, quer da simulação das transferências de humidade é reconhecida por várias áreas de investigação científica. De referir que o sector bio-alimentar, o sector agro-alimentar, da hidrologia, das energias renováveis e alguns outros tem merecido a atenção dos investigadores desta área, tendo aparecido adaptações dos programas e modelos existentes, aos mesmos, bem como desenvolvimento de modelos e programas específicos para essas áreas.

Tem-se vindo a verificar também a uma divulgação maior dos programas, quer ao nível institucional, por colaborações entre centros de investigação e laboratórios, quer ao nível comercial pela disponibilização pública de alguns dos programas.

Quadro 2 - Novos programas informáticos de modelização de transferência de calor e/ou ar e/ou
humidade para diversas áreas [24] [31]

Nome do Modelo	Tipo de transferência / Aplicação	Instituto / (desenvolvimento ou comercialização)
HEAT 2	2D – Calor	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
HEAT 3	3D – Calor	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
HEAT2R	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
WH	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
SHT	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
CW	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
UPD10+UTD1087	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
CELLAR	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
CRAWL	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
TWOW	Transferência de calor e extracção de calor do solo; Transferência de calor e Humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
AST	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
DST	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
SST	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
SBMB	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
GSH	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
HEB	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
TECOCLAY	Transferência de calor no solo	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
HEAT 2R	Transferência de calor em sólidos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
MPC	Transferência de calor em sólidos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
MPC	Transferência de calor em sólidos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
SCTTRANS	Transferência de calor em sólidos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
MPCPCH	Transferência de calor em sólidos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
AST	Transferência de calor e Humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
1D-HAM	Transferência de calor e Humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
GRT	Transferência de calor e Humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
3DCH	Transferência de calor e Humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
JAM-1	1D- Transferência de humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
JAM-2	2D- Transferência de humidade	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
CRAWLRE	Humidade relativa em estufas	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
ATTICS	Temperatura e transferência de calor em sótãos	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
MOVIES ¹	Transferência de humidade e sal em alvenarias de tijolo	Faculty of Architecture and Building Physics – Eindhoven University of technology

¹ Programa para criação de um filme baseado nos valores obtidos experimentalmente

2.4 EVOLUÇÃO DO PROGRAMA TRHUMIDADE

2.4.1 Trhumidade

O programa Trhumidade foi elaborado por Freitas [1] , em 1992, na sequência de trabalho realizado para a elaboração de Tese de Doutoramento, utilizando a formulação proposta por Luikov e De Vries para a resolução numérica de equações de transferência de humidade. O programa, tal como foi concebido nessa altura, aplicava a paredes de múltiplas camadas o modelo teórico de transferência de calor e humidade, estudando especialmente o fenómeno da interface entre diversos materiais e as diferentes situações de continuidade.

Foi realizado em Fortran 77 e assentava na resolução das equações de transferência de calor e humidade pelo método das diferenças finitas. A complexidade do cálculo, motivada fundamentalmente pelo facto de estudar paredes em múltiplas camadas, exigia computadores com capacidade elevada, no caso um Eclipse MV 2000 – Data General. O TRHUMIDADE organizava-se internamente, ao nível do código, no programa principal e em oito sub-rotinas.

O organograma da Figura 3, apresenta o processo de computação do programa e os métodos utilizados, para chegar aos valores finais do teor de humidade e das temperaturas instaladas ao longo do tempo.

O facto do programa necessitar, para ser executado, de um computador com requisitos especiais restringiu-lhe logo à partida a capacidade de ser utilizado fora do âmbito da investigação científica.

A forma de introdução, no programa, dos dados, necessários à simulações, revelava também alguma complexidade, pelo facto de serem necessário vários ficheiros diferentes para uma única simulação. Para os dados iniciais eram necessários três ficheiros, para a definição do clima um quarto, e seis por cada material diferente, isto para além dos ficheiros de escrita dos resultados.

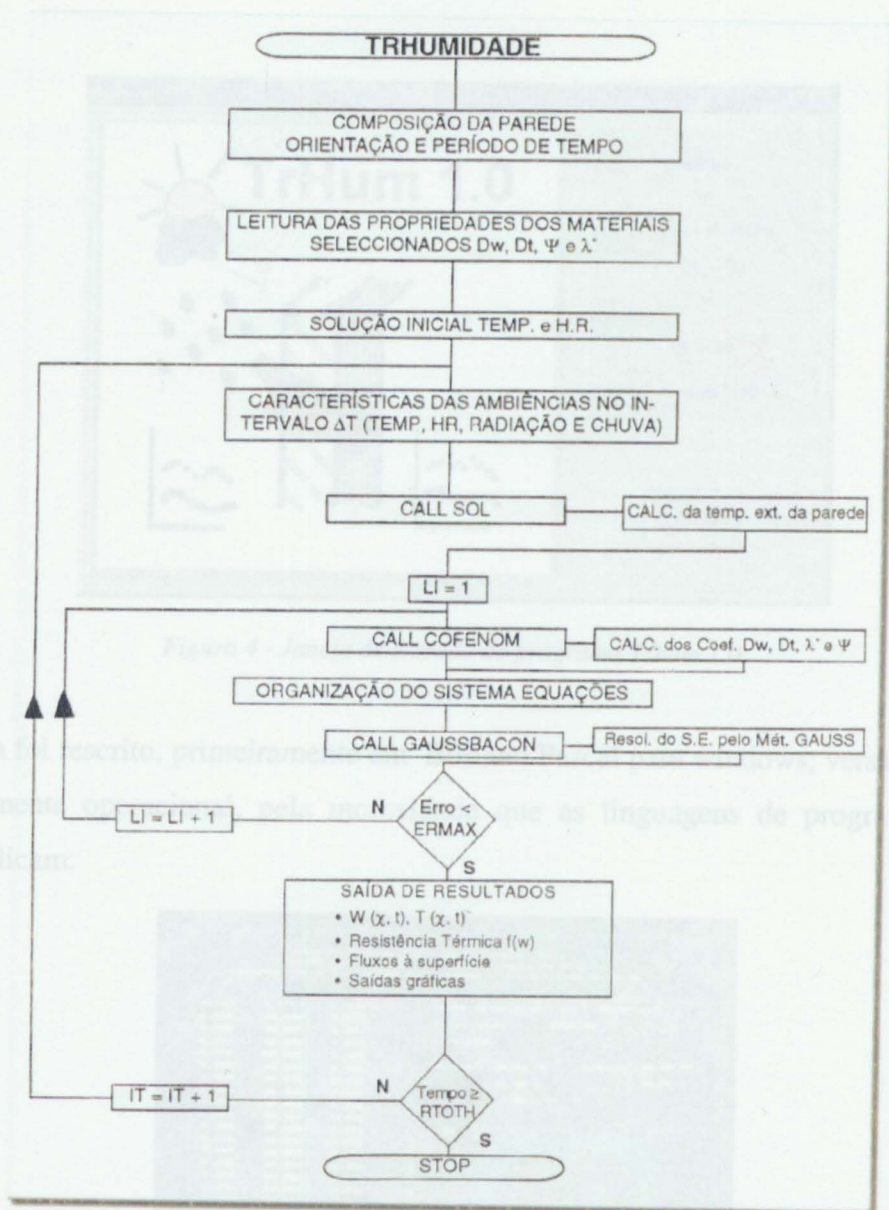


Figura 3 - Organograma do programa Trhumidade [1]

2.4.2 Trhum 1.0 / Trhum 96

Em 1995 Holm [6] fez a primeira adaptação do programa para PC (computador pessoal). Para tal foram necessárias alterações ao próprio âmbito do mesmo, a mais importante das quais foi a restrição da possibilidade de simulação a paredes compostas por uma única camada homogênea, isto é, sem necessidade de entrar em conta com os fenómenos de continuidade entre diversos materiais.

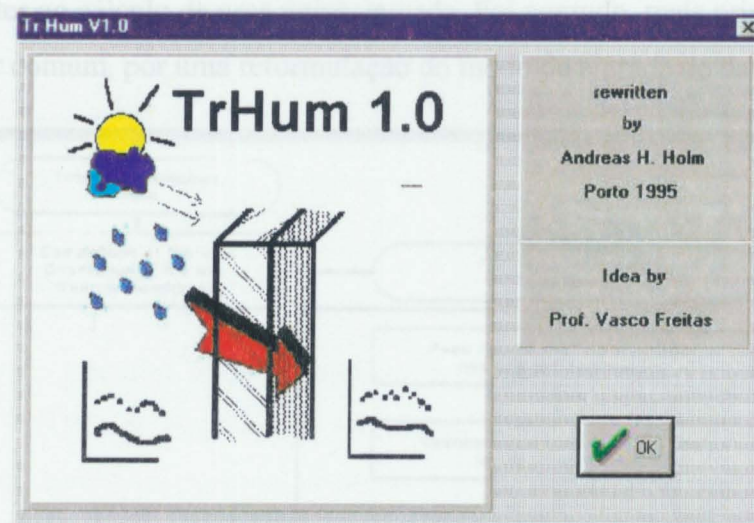


Figura 4 - Janela de entrada do programa Trhum 1.0

O programa foi reescrito, primeiramente em Borland Pascal para windows, versão que nunca ficou totalmente operacional, pela morosidade que as linguagens de programação ditas visuais implicam.

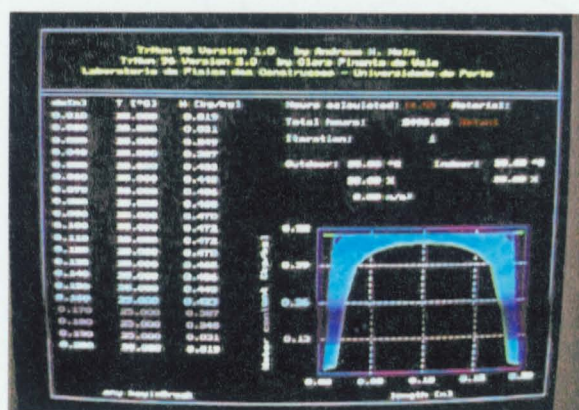


Figura 5 - Aparência do Trhum 96 2.0

Posteriormente foi feita uma nova versão, em turbo pascal, para funcionar sobre sistema operativo MS DOS ou afim. Esta versão, [Figura 5] visualmente, é muito menos interessante e apelativa que a versão windows, mas ficou quase totalmente operacional, com algumas restrições relativas à efectuação de simulações com sol ou com humidades relativas superiores a 90%.

A estrutura do programa manteve-se sensivelmente idêntica à do Trhumidade, com as reduções inerentes ao cálculo de uma única camada. Foi contudo mais privilegiada a relação com o utilizador comum, por uma reformulação do modo de entrada de dados.

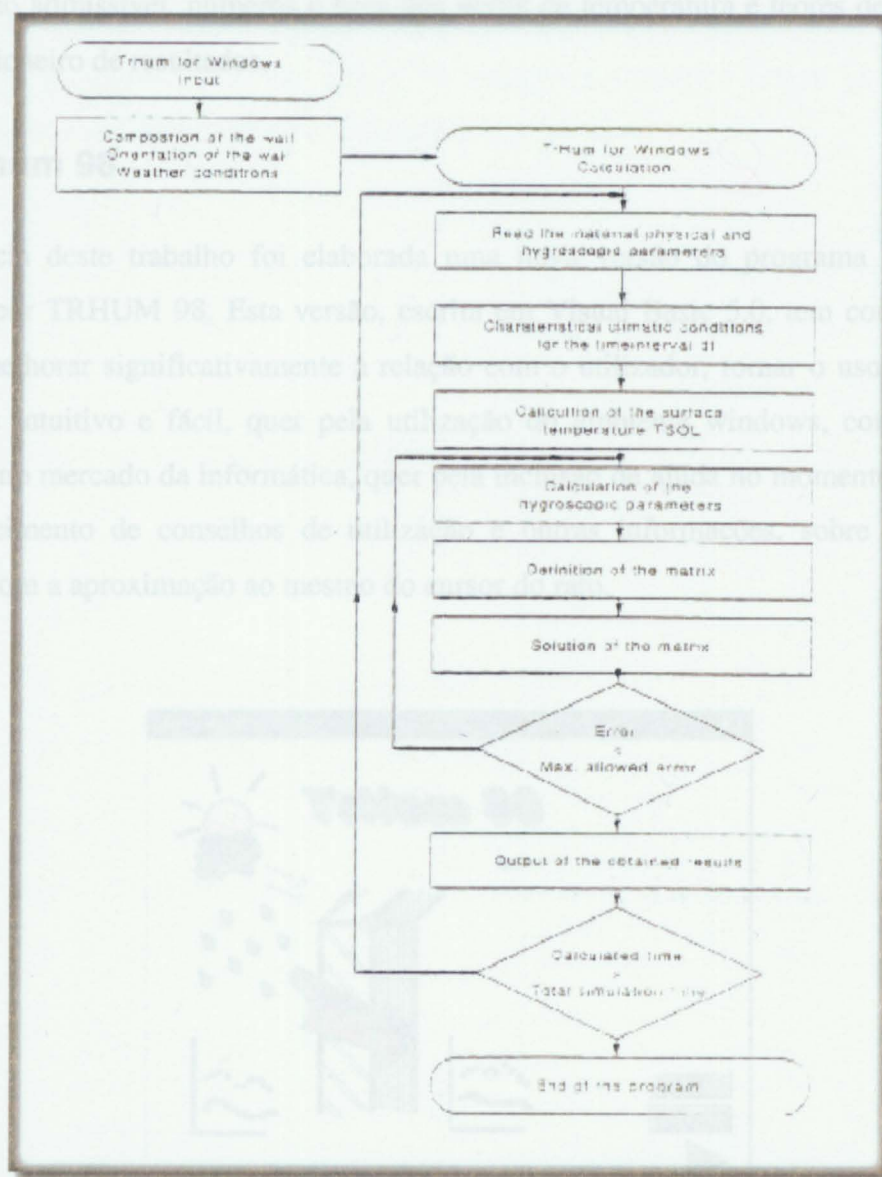


Figura 6 - organograma da estrutura do programa Trhum 1.0 [6]

A entrada de dados no programa continua a ser feita a partir de ficheiros de texto com informação, contudo o seu número foi reduzido, e foram criadas linhas de informação ao utilizador. Nesta versão são necessários três ficheiros para efectuar uma simulação, um com

os valores referentes à definição do clima, o segundo, uma base de dados com parâmetros de caracterização de materiais construtivos e um terceiro com as definições relativas ao elemento a estudar, sua localização e características, e definições relativas ao projecto em si, erro máximo admissível, números e hora dos perfis de temperatura e teores de humidade a incluir no ficheiro de resultados.

2.4.3 Trhum 98

Na sequência deste trabalho foi elaborada uma nova versão do programa Trhumidade, designada por TRHUM 98. Esta versão, escrita em Visual Basic 5.0, tem como objectivo principal melhorar significativamente a relação com o utilizador, tornar o uso do software muito mais intuitivo e fácil, quer pela utilização do ambiente windows, com uma larga penetração no mercado da informática, quer pela inclusão de ajuda no momento ("on line"), pelo aparecimento de conselhos de utilização e outras informações, sobre determinado comando, com a aproximação ao mesmo do cursor do rato.

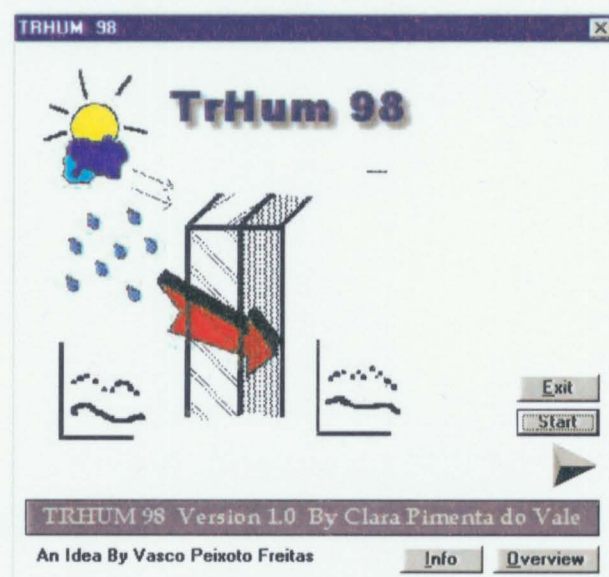


Figura 7 - Janela de entrada do programa Trhum 98

O windows, como sistema operativo, ou como ambiente de trabalho, estabeleceu standard que permitem que os programas que os utilizam, sejam facilmente usados por utilizadores sem formação específica nos mesmos.

A aposta principal foi efectivamente na melhoria do aspecto visual e da facilidade de utilização do programa, uma vez que a formulação matemática estava já definida nos programas anteriores, Trhumidade e Trhum 96.

3. CONCEPÇÃO DO PROGRAMA

O programa Trhum 98 divide-se em duas grandes partes, o estabelecimento da interface com o utilizador e o modelo matemático que serviu de base à simulação.

3.1 CONCEPÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O programa Trhum 98, corresponde a uma nova versão do programa Trhumidade, com restrições de âmbito das simulações relativamente ao programa inicial, e com uma aposta na possibilidade da generalização do uso do mesmo a um público não especialmente qualificado.

O projecto baseia-se na resolução numérica das equações de transferência conjunta de humidade e calor em meios porosos constituídos por um único material, macroscopicamente homogéneo, isotrópico, de acordo com a formulação proposta por Luikov e De Vries.

As equações simplificadas de acordo com o descrito no Capítulo 2.2, são resolvidas pelo método das diferenças finitas.

Massa

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dw \frac{\partial w}{\partial x} + Dt \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{3-1}$$

Energia

$$(\rho C)^* \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{3-2}$$

Em que:

ρ^*	[Kg/m ³]	Massa volúmica equivalente
C^*	[J/Kg.K]	Capacidade calorífica equivalente
λ^*	[W/mK]	Condutibilidade térmica aparente

T	[°C]	Temperatura
Dw	[m2/s]	Coeficiente de difusividade hídrica
Dt	[m2/sK]	Coeficiente de difusividade higrotérmica
θ	[m³/m³]	Teor de humidade
w	[Kg/Kg]	Teor de Humidade

A função teor de humidade $W(x, t)$ e a função Temperatura $T(x, t)$, que satisfazem as equações deverão ser deriváveis uma vez em relação ao tempo, no intervalo $(1, +\infty)$ e duas vezes em relação ao espaço no intervalo $(0,e)$.

O método das diferenças finitas consiste em primeiro lugar na substituição, numa equação diferencial, das derivadas pelas derivadas aproximadas.

Assim:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (y_{i+1} - y_i) \tag{3-3}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) \tag{3-4}$$

Utilizando o método implícito centrado de Crank-Nicholson, obtemos a linearização do sistema pela avaliação dos coeficientes no instante $(m+\theta) \Delta t$.

$$x^{(m+\theta)} = \theta .x^{(m+1)} - (1 - \theta) .x^m \tag{3-5}$$

Com $\theta = 1/2$

Assim, a determinação dos coeficientes (DW, DT, λ^* , C^* , ρ^*) no instante $(m + 1/2) \Delta t$, faz-se do seguinte modo:

$$a(w,T)^{m+1/2} = 1/2 \left[a(w^{m+1},T^{m+1}) + (w^m,T^m) \right] \tag{3-6}$$

Tomando A e B pelas expressões:

$$A = \left[D w \frac{\partial w}{\partial x} + D T \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (3-7)$$

$$B = \left[\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (3-8)$$

Podemos escrever as equações de conservação de massa e energia da seguinte forma:

Massa

$$W_k^{m+1} - W_k^m = \frac{\theta}{\Delta x} [A_{k+1/2}^{m+1} - A_{k-1/2}^{m+1}] + \frac{1-\theta}{\Delta x} [A_{k+1/2}^m - A_{k-1/2}^m] \quad (3-9)$$

Energia

$$\rho^* C_k^{*m+1} \frac{T_k^{m+1} - T_k^m}{\Delta t} = \frac{\theta}{\Delta x} [B_{k+1/2}^{m+1} - B_{k-1/2}^{m+1}] + \frac{1-\theta}{\Delta x} [B_{k+1/2}^m - B_{k-1/2}^m] \quad (3-10)$$

Temos portanto, em cada nó interior duas equações de transferência e seis incógnitas; W_{k-1} , W_k , W_{k+1} , T_{k-1} , T_k , T_{k+1} .

3.2 CONCEPÇÃO DA INTERFACE COM O UTILIZADOR

Como atrás foi referido, foi dado grande importância ao aspecto formal do programa, ao modo como as diversas janelas de entrada de dados são apresentadas, e às indicações que se dão ao utilizador para o encadeamento dos passos a executar para uma simulação.

O programa foi executado em inglês, tanto ao nível do interface com o utilizador, como ao nível dos comentários às linhas de código, fundamentalmente por duas razões. Primeiro, porque achamos que devemos apostar na internacionalização do programa, quer para o seu teste e validação, quer para a sua divulgação, pois esta área científica e de investigação, em Portugal, ainda se encontra numa fase de desenvolvimento e expansão, com um necessário

longo caminho a percorrer até atingir a penetração que tem em alguns países estrangeiros. Em segundo lugar, porque quer os contactos do Laboratório de Física das Construções com organismos congéneres estrangeiros, quer os mercados internacionais promovidos pela FEUP, poderão levar a uma continuação destes trabalho por um investigador não nacional, à semelhança do que já aconteceu no passado.

O inglês, como língua com maior divulgação internacional, pareceu-nos a escolha lógica para o desenvolvimento do programa, apesar de todo o respeito e carinho que temos pela nossa língua pátria.

3.2.1 Entrada de dados

Para melhorar a operatividade e a funcionalidade da interface gráfica do programa, optamos por considerar múltiplas formas de inserir os dados no mesmo, para que cada utilizador o possa fazer do modo mais adaptado às suas necessidades e ao seu hábito.

O Trhum 98 considera 4 tipos principais de entrada de dados, a partir de menus e submenus, por atalhos pré-definidos, conjugação de duas ou mais teclas que permitem aceder a janelas, pela janela de tarefas, e pelas janelas encadeadas.

3.2.1.1 Janelas encadeadas

Este sistema de entrada de dados é especialmente destinado a utilizadores pouco familiarizados, quer com o informática, quer com o programa, pois a sequência de acções necessárias está pré-definida, e é executada automaticamente pelo computador, após acordo do utilizador.

Dois botões, com forma de setas, em dois sentidos opostos, permitem ao utilizador a passagem directa à janela seguinte ou à anterior.

Este tipo de entrada de dados impõe como condição a passagem por todas as janelas antes de efectuar o cálculo, o que pode ser moroso.

3.2.1.2 Janela de tarefas

Esta entrada de dados destina-se a um utilizador já com mais conhecimento do software, pois requer que o mesmo saiba quais os passos que deverá executar para a entrada de todos

os dados necessários. Não implica o encadeamento de janelas, pelo que permite ao utilizador escolher quais os dados que pretende fornecer em cada momento, e ordem pela qual o deseja fazer. Tem ainda uma utilização preferencial na edição de projectos já definidos, pois permite a alteração de um só parâmetro sem ter que verificar todos os outros.

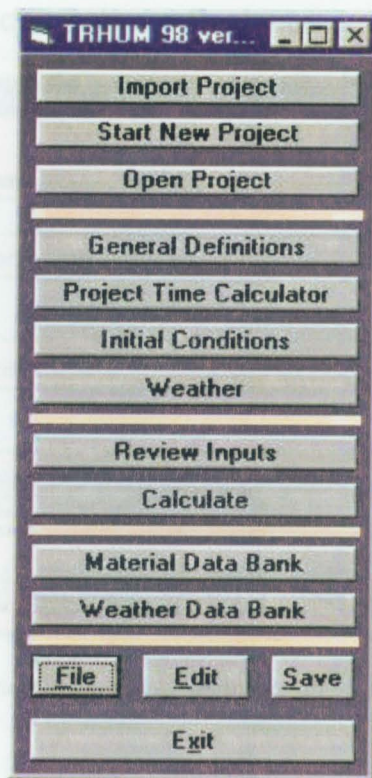


Figura 8 - Janela de tarefas

3.2.1.3 Menus, submenus e atalhos

Todas as funções existentes no programa estão disponíveis através de menus e submenus, estando as mais importantes também disponíveis por atalhos.

Pelos menus é possível aceder a funções que não estão disponíveis nem na janela de tarefas nem por janelas encadeadas. Estas funções, na sua maior parte, são pequenos utilitários criados para auxiliar o utilizador em pequenas tarefas, como consulta de dados, conversão de unidades...

A utilização de menus e submenus exige do utilizador um conhecimento mais profundo do programa, uma vez que os comandos e funções não estão imediatamente visíveis, sendo necessário procurá-los numa sequência, dentro do menu e submenu correspondente.

3.2.2.2 Definição do objecto

3.2.2 Dados necessários

3.2.2.1 Dados genéricos sobre o Projecto

Figura 9 - Janela de definição do projecto

Quadro 3 - Dados necessários para definição do projecto

Designação Original	Designação e Descrição
Project definition	Janela de definição do projecto
Name	Nome do projecto. De preenchimento obrigatório, identifica o projecto.
Description Notes	Descrição e notas ao projecto. De preenchimento facultativo, permite uma definição maior das condicionantes do projecto.
Layer number Thickness Number of steps DX	Definições relativas a cada camada. Identificação pelo número, espessura, número de passos ou espaçamento, estes dois últimos valores são interdependentes.

3.2.2.2

Definição do objecto

Figura 10 - Janela de definição do objecto

Quadro 4 - Dados necessários à definição do objecto

Designação Original	Designação e descrição
Object definition	Janela referente à definição do objecto.
	Dados específicos sobre o objecto a ser alvo dos testes.
Material Name	Nome do material, a ser escolhido dentre os disponíveis na base de dados
Thickness	Espessura (em cm)
Number of layers	Numero de camadas teóricas em que se divide a amostra, para estabelecimento de espessura da malha para cálculo diferentes. Isto permite fazer a diferenciação da espessura da malha, reduzindo-a em zonas onde seja necessário uma maior definição, e aumentando-a noutras zonas onde tal não se verifique.
Layer number	Definições relativas a cada camada. Identificação pelo número, espessura, número de passos ou espaçamento, estes dois últimos valores são interdependentes.
Thickness	
Number of steps	
DX	

3.2.2.3 Definição do tempo de simulação

Figura 11 - Janela referente ao tempo de simulação

Quadro 5 - Definição dos dados necessários ao estabelecimento do tempo de simulação

Designação Original	Designação e descrição
Calculation time	Janela referente ao tempo de simulação.
Project start Project finish	Datas de inicio e fim de simulação, com definição exacta de hora, dia, mês e ano.
Year Day of year Hour of day	Variáveis internas que calculam o numero de anos, os dias desde o inicio do ano, e as horas desde o inicio do dia.
Thermal Resistance Indoor and Outdoor	Coefficiente de condutância térmica superficial, interior e exterior (h_i ; h_e)
Moisture Resistance Indoor and Outdoor	Coefficiente de transferência superficial de humidade, interior e exterior (β_i ; β_e)
Acceptable error	Precisão pretendida no processo iterativo, utilizado para a definição da convergência do resultado.
Geographic location and conditions	Definições de ordem geográfica
City; Country Latitude; Longitude Wind direction; Wind speed; Azimuth	Cidade, país, latitude, longitude, direcção do vento, velocidade, e azimute da perpendicular à fachada. Permite também a escolha de cidades disponíveis na base de dados, para as quais existam dados referentes ao clima.

3.2.2.4 Definição das condições iniciais

Initial Conditions

Heat Resistance

Indoor : 0

Outdoor : 0

Moisture Resistance

Indoor : 0

Outdoor : 0

Maximum Error : 0

Initial Profiles

Geographic Location and Conditions

City :

Country :

Latitude : 0

Longitude : 0

Wind Direction : 0

Wind Speed (m/s) : 0

Azimuth of the perpendicular plane to the surface :

Geographic Location...

Cancel **Exit**

Figura 12 - Janela de definição de condições constantes

Figura 13 - Janela de definição dos perfis iniciais da amostra

Quadro 6 - Definição dos dados constantes necessários à simulação

Quadro 7 - Definição dos perfis iniciais de temperatura e teor de humidade

Designação Original	Designação e descrição
Initial conditions	Janela referente às condições iniciais e Parâmetros constantes de caracterização da amostra
Heat Resistance Indoor and Outdoor	Coeficiente de condutância térmica superficial, interior e exterior (h_i ; h_e)
Moisture Resistance Indoor and Outdoor	Coeficiente de transferência superficial de humidade, interior e exterior (β_i ; β_e)
Maximum error	Precisão pretendida no processo iterativo, utilizado para a definição da convergência do resultado.
Geographic location and conditions	Definições de ordem geográfica
City; Country Latitude; Longitude Wind direction; Wind speed; Azimuth	Cidade, país, latitude, longitude, direcção do vento, velocidade, e azimuth da perpendicular à fachada. Permite também a escolha de cidades disponíveis na base de dados, para as quais existam dados referentes ao clima.

3.2.2.5 Definição dos perfis iniciais de temperatura e teor de humidade

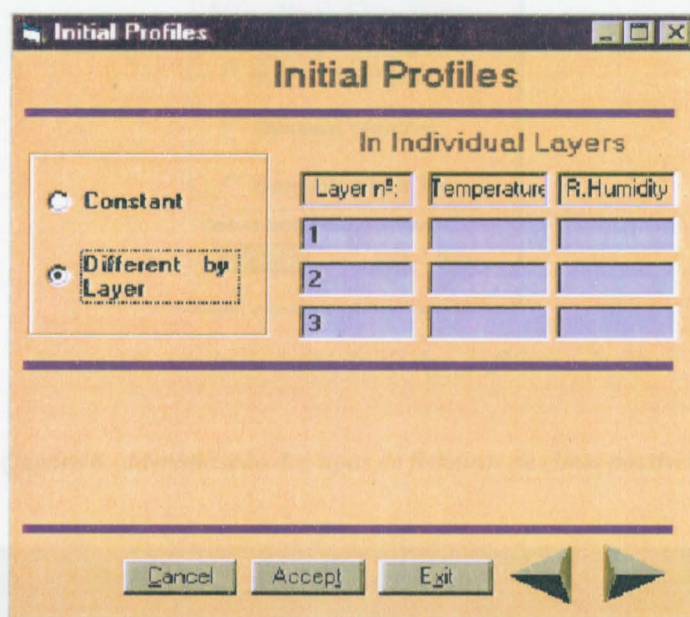


Figura 13 - Janela de definição dos perfis iniciais da amostra

Quadro 7 - Definição dos perfis iniciais de temperatura e teor de humidade

Designação Original	Designação e descrição
Initial Profiles	Janela dos perfis iniciais de temperatura e teor de humidade
Constant Different by layer	Permite o estabelecimento dos perfis iniciais constantes ao longo da amostra, ou com diferenciação por camadas.
Layer N. ;Temperature; R. Humidity	Identificação da camada, temperatura e teores de humidade iniciais

3.2.2.6

Definição do ficheiro de clima

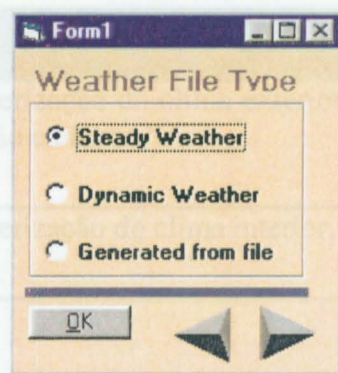


Figura 14 - Janela de definição do tipo de ficheiro de clima

Quadro 8 - Identificação dos tipos de ficheiros de clima possíveis

Designação Original	Designação e descrição
Weather file Type	Janela de definição do tipo de ficheiro de clima
Steady weather	Permite o estabelecimento de vários tipos de ficheiro de clima. Clima constante ou variável ao longo de toda a simulação, devendo nestes casos ser fornecido pelo utilizador. Tem ainda a hipótese de gerar um ficheiro de clima a partir das bases de dados existentes no programa, ou a partir de um ficheiro de duração inferior à simulação, por repetição do mesmo, ou a partir de dados relativos à temperatura média do ar, humidades relativas médias e amplitudes médias diárias, de referência.
Dynamic weather	
Generated from file	

Figura 15 - Janela de definição de clima constante ao longo da simulação

Quadro 9 - Definição dos dados de clima necessários

Designação Original	Designação e descrição
Outdoor Temperature; Relative Humidity, Radiation, Rain	Caracterização do clima exterior; temperatura, humidade relativa, radiação e chuva.
Indoor Temperature, Relative Humidity.	Caracterização do clima interior, temperatura, humidade relativa.

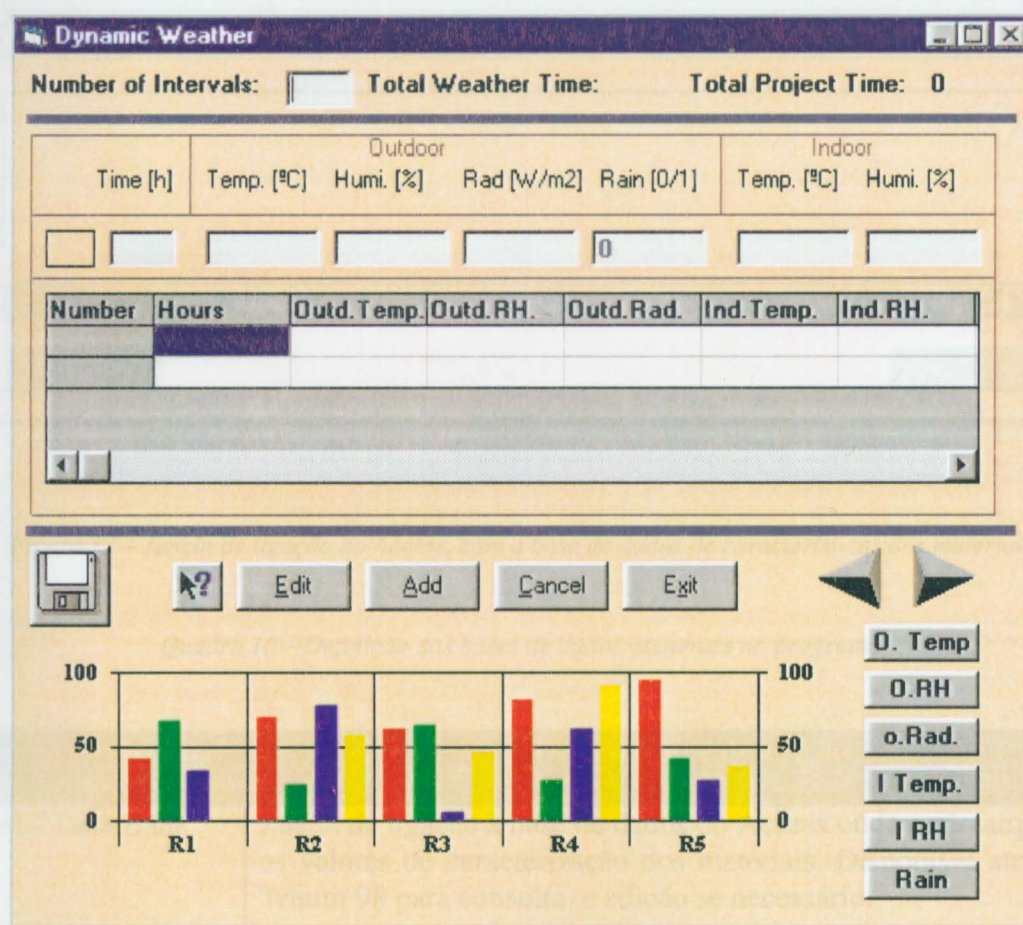


Figura 16 - Janela da definição de clima variável

É possível, para uma leitura mais directa das condicionantes climáticas, ver num gráfico com a distribuição ao longo do tempo do parâmetro de caracterização pretendido.

3.2.2.7 Bases de dados

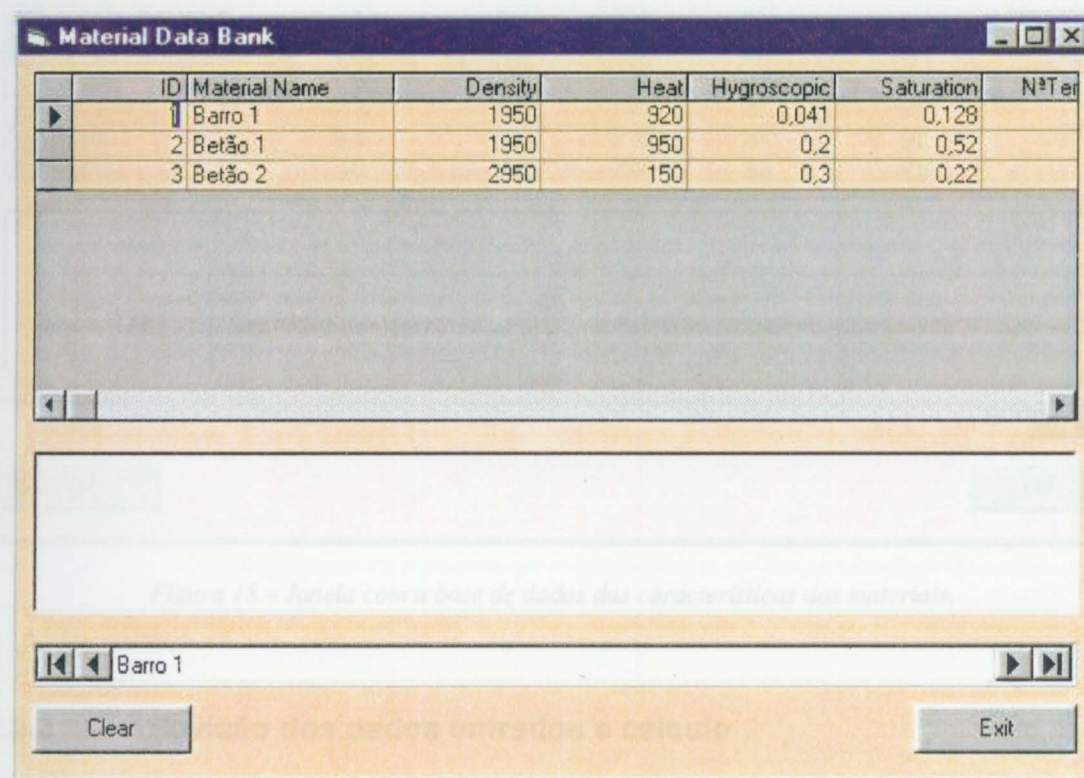


Figura 17 – Janela de ligação ao Access, com a base de dados de características dos materiais

Quadro 10 – Definição das bases de dados existentes no programa

Designação Original	Designação e descrição
Material Data Bank	Janela de ligação à base de dados do Access onde estão arquivados os valores de caracterização dos materiais. Disponível através do Trhum 98 para consulta, e edição se necessário.
Weather Data Bank	Janela de ligação à base de dados do Access onde estão arquivados alguns ficheiros de clima. Funciona de forma análoga à base de dados dos materiais.

The screenshot shows a window titled "Weather Data Bank" with a table containing 11 rows of material data. Below the table is a text area with the number "1" and navigation buttons. At the bottom are "Clear" and "Exit" buttons.

	ID	Interv	Text	Hrext	rad	Tint	Hrint	Rain
▶	1	1	7,1	88	0	20	50	1
	2	1	7	88	0	20	50	1
	3	1	6,9	88	0	20	50	1
	4	1	6,8	88	0	20	50	1
	5	1	6,7	88	0	20	50	1
	6	1	6,7	89	0	20	50	1
	7	1	6,7	89	0	20	50	1
	8	1	6,8	89	34	20	50	1
	9	1	7,3	88	140	20	50	1
	10	1	8,4	83	230	20	50	1
	11	1	10	78	292	20	50	1

1

Clear Exit

Figura 18 – Janela com a base de dados das características dos materiais.

3.2.2.8 Revisão dos dados entrados e cálculo

Designação Original	Designação e descrição
Review inputs	Janela de revisão dos valores entrados, com o resumo da totalidade dos parâmetros definidos. Funciona como um meio de verificação da informação relativa ao projecto.
Calculate	Simulação do comportamento do elemento à transferência conjunta de calor e humidade, de acordo com os parâmetros definidos. Permite a saída dos resultados em forma de tabela, ou sob a aparência de gráfico tridimensional, que nos apresenta quer a variação da temperatura, quer a variação do teor de humidade, como uma superfície, em relação ao tempo da simulação e à espessura da amostra. Permite ainda a visualização dos resultados em gráficos bi-dimensionais, dando, em horas pré-definidas, curvas com os valores da temperatura e do teor de humidade ao longo da amostra.

Figura 19 – Possibilidade de aplicação do programa Thtan 2D - Janela [1]

3.3 POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO PROGRAMA

Uma simulação é uma parametrização do real, mas dada a quantidade de elementos em jogo, uma simulação é necessariamente imprecisa, com alguma variação relativamente ao fenómeno real que lhe serviu de base.

As simulações de transferências de calor e humidade em meios porosos não são excepção, não descrevem exactamente e fielmente, o fenómeno real, por um lado, pelas simplificações do modelo teórico necessárias ao seu cálculo em tempo oportuno e com meios acessíveis, por outro, pela dificuldade de caracterizar univocamente todos os parâmetros que definem uma situação real. Servem contudo para identificar comportamentos, e para analisar comparativamente diversas situações.

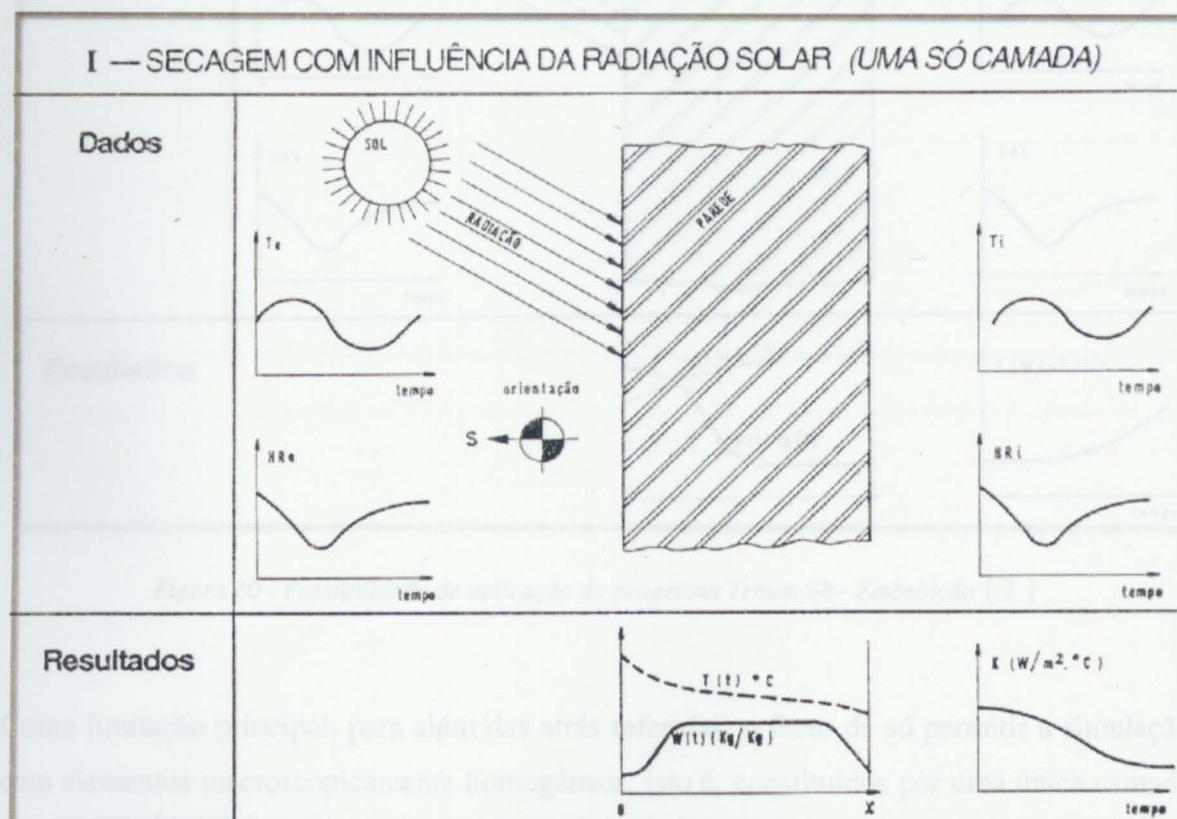


Figura 19 – Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 - Secagem [1]

Sabemos que os perfis hídricos determinados por simulação não são rigorosamente coincidentes, em valor, com os obtidos experimentalmente, mas existe uma boa concordância na forma da distribuição dos mesmos.

O programa Trhum 98 é um instrumento importante para a análise de situações existentes ou para auxílio na concepção de novas situações, pois permite, sem grandes esforço ou necessidade de tempo ter a percepção do comportamento do elemento quando sujeito a determinadas condições.

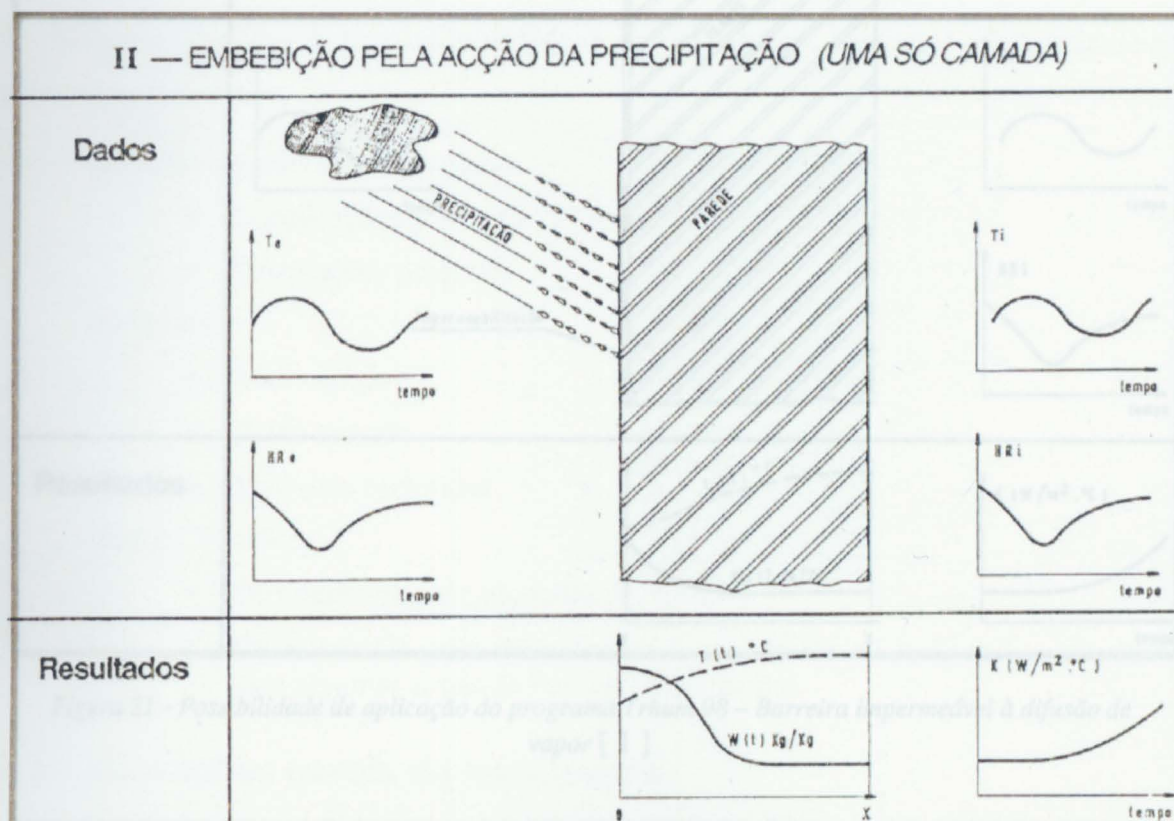


Figura 20 - Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 - Embebição [1]

Como limitação principal, para além das atrás referidas, o facto de só permitir a simulação com elementos macroscopicamente homogéneos, isto é, constituídos por uma única camada de um único material.

O programa permite um conjunto vasto de simulações com interesse na construção, designadamente estudos de embebição de elementos, por chuva incidente ou por

condensações internas, estudo de secagem por efeito da radiação, da temperatura, ou da humidade relativa, estudos de ciclos embebição e secagem, determinação dos tempos necessários para determinado teor de humidade ser atingido, ou mesmo, a determinação da variação da resistência térmica dos elementos em função da sua humidificação.

4.1 ESTABELECIMENTO DAS SITUAÇÕES DE SIMULAÇÃO

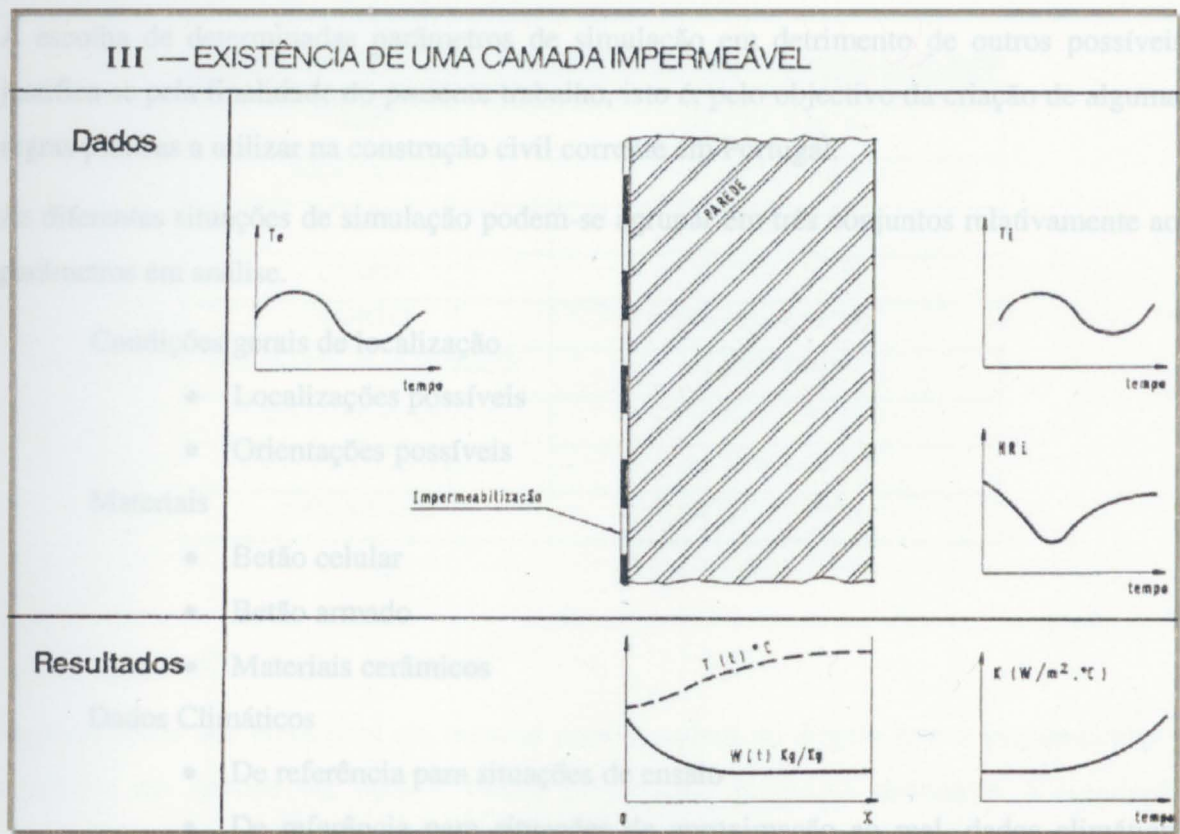


Figura 21 - Possibilidade de aplicação do programa Trhum 98 – Barreira impermeável à difusão de vapor [1]

4.1.1 Condições gerais de localização

• Localizações possíveis

As localizações possíveis de estudo no âmbito deste trabalho são, por necessidade de amostragem do universo de situações, em primeiro lugar, Portugal Continental e regiões insulares, e em segundo lugar, toda a Península Ibérica. Contudo, o programa permite, se conhecidos os dados climáticos necessários, a simulação em qualquer ponto do globo.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 ESTABELECIMENTO DAS SITUAÇÕES DE SIMULAÇÃO

A escolha de determinadas parâmetros de simulação em detrimento de outros possíveis, justifica-se pela finalidade do presente trabalho, isto é, pelo objectivo da criação de algumas regras praticas a utilizar na construção civil corrente em Portugal.

As diferentes situações de simulação podem-se agrupar em três conjuntos relativamente aos parâmetros em análise.

Condições gerais de localização

- Localizações possíveis
- Orientações possíveis

Materiais

- Betão celular
- Betão armado
- Materiais cerâmicos

Dados Climáticos

- De referência para situações de ensaio
- De referência para situações de aproximação ao real, dados climáticos para algumas zonas de Portugal Continental

4.1.1 Condições gerais de localização

- Localizações possíveis

As localizações possíveis de estudo no âmbito deste trabalho são, por necessidade de restrição do universo de situações, em primeiro lugar, Portugal Continental e regiões insulares, e em segundo lugar, toda a Península Ibérica. Contudo, o programa permite, se fornecidos os dados climáticos necessários, a simulação em qualquer ponto do globo.

A localização poderá ser dada por aproximação à maior cidade da região, sendo as coordenadas de estudo as dessa mesma cidade, ou então poderão ser fornecidas a longitude e a latitude exactas do local a estudar.

Quadro 11 - Coordenadas Geográficas de algumas localidades Portuguesas [29]

Localidade	Coordenada Geográfica
BEJA	38.02°N 7.80°W
BRAGANÇA	41.80°N 6.70°W
COIMBRA	40.20°N 8.40°W
FARO	37.02°N 7.90°W
PORTO	41.20°N 8.69°W
PORTO/PEDRAS RUBRAS	41.23°N 8.60°W
SINTRA/GRANJA	38.83°N 9.30°W
VIANA DO CASTELO	41.70°N 8.80°W
VILA REAL	41.32°N 7.70°W

- Orientações possíveis

As orientações dos elementos em estudos correspondem ao ângulo que a perpendicular à superfície em análise faz com o Norte. O presente programa destina-se à simulação numérica de elementos verticais, dentro desta restrição todas as orientações são possíveis.

4.1.2 Materiais

Os materiais a estudados no âmbito deste trabalho foram os seguintes:

- Betão celular
- Betão armado
- Materiais cerâmicos

Estes materiais correspondem aos comumente utilizados na construção civil corrente, como elementos de suporte, como elementos de fronteira e como bases para receber revestimentos.

No caso do betão armado será negligenciado o efeito das armaduras de ferro nos processos de humedecimento e secagem. No caso dos materiais cerâmicos, tijolos e afins, não será tido em conta o efeito das juntas de argamassa nos mesmos processos.

4.1.2.1 Betão

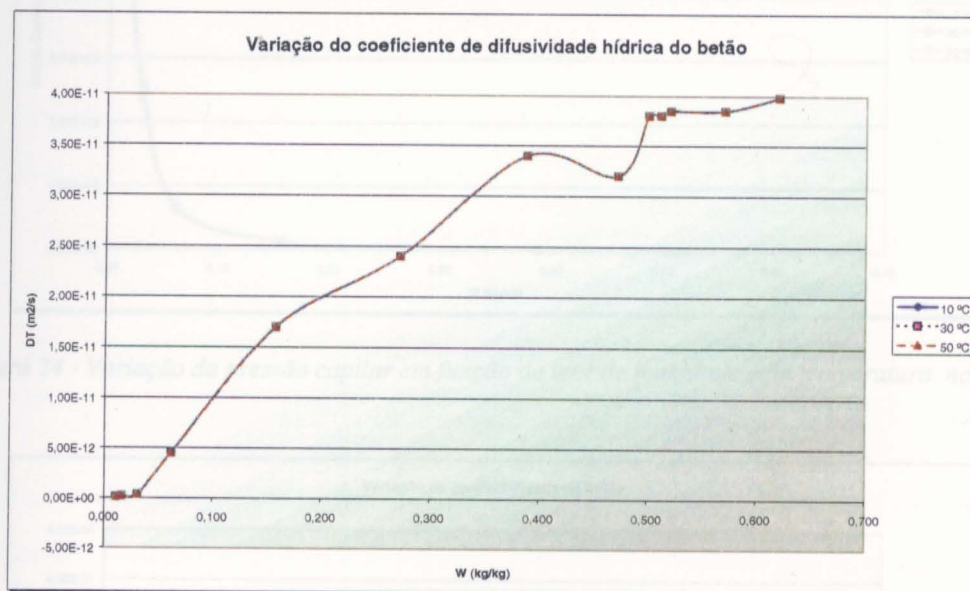


Figura 22 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade e da temperatura no betão

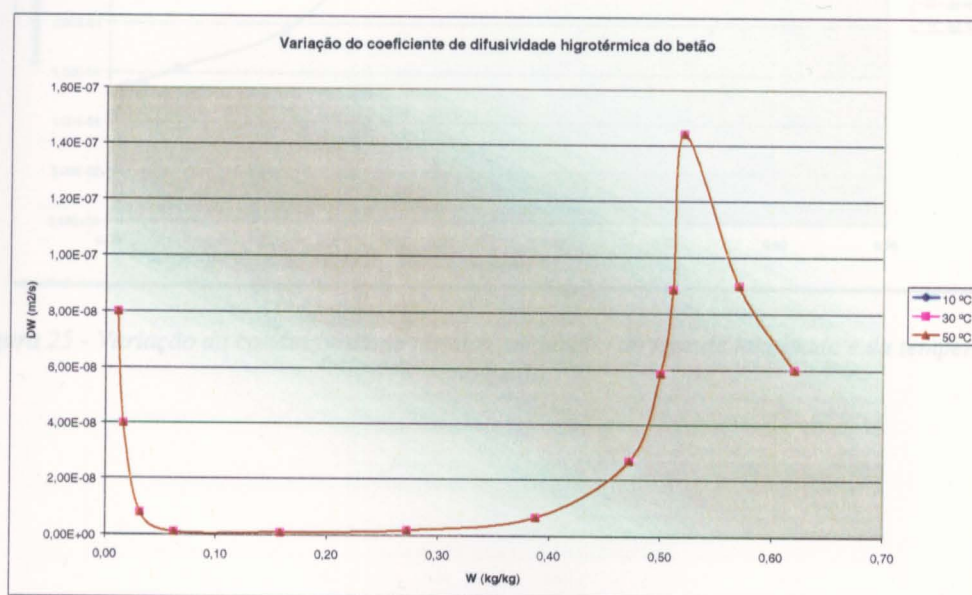


Figura 23 - Variação do coeficiente de difusividade higrótérmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão

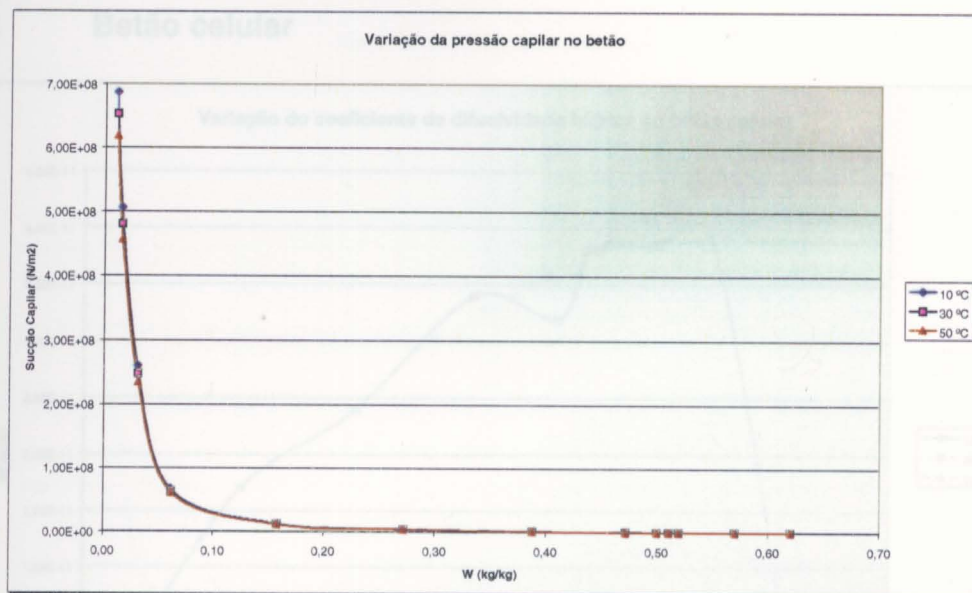


Figura 24 - Variação da pressão capilar em função do teor de humidade e da temperatura no betão

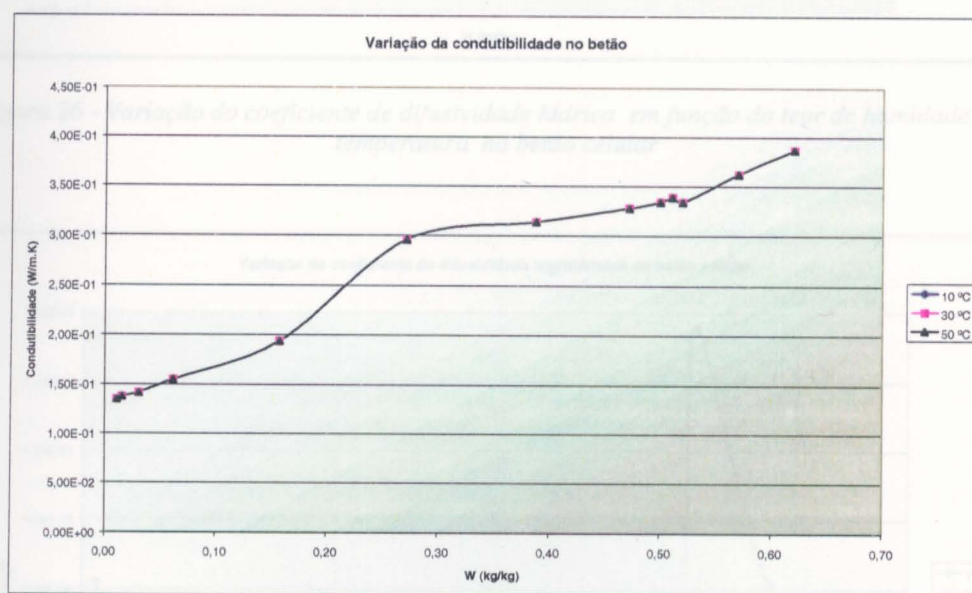


Figura 25 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão

4.1.2.2 Betão celular

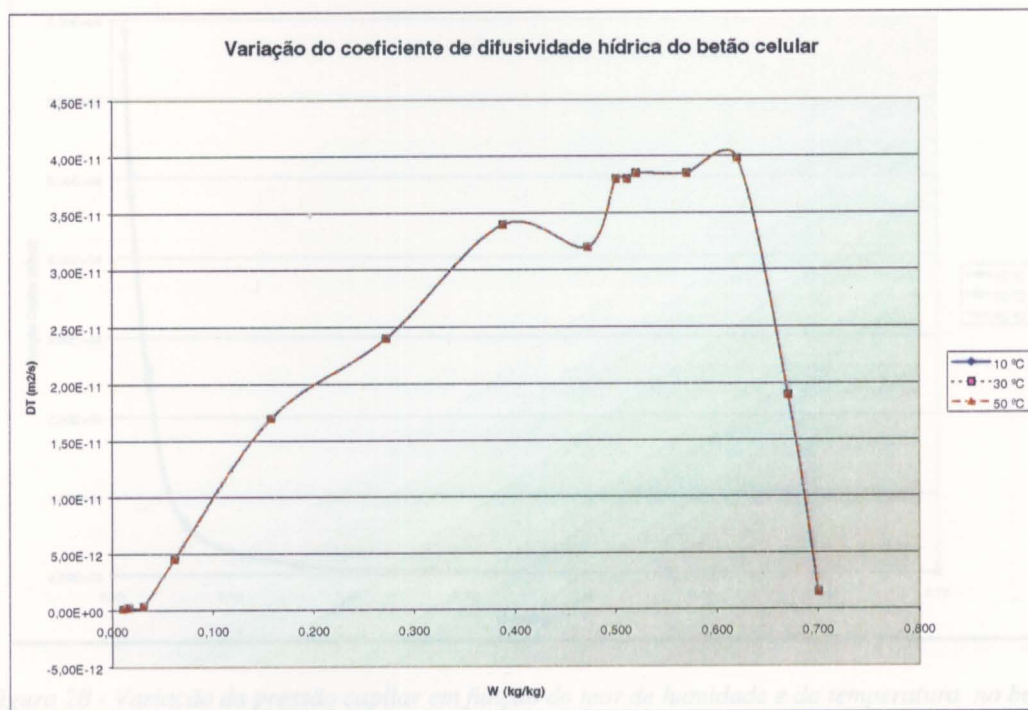


Figura 26 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular

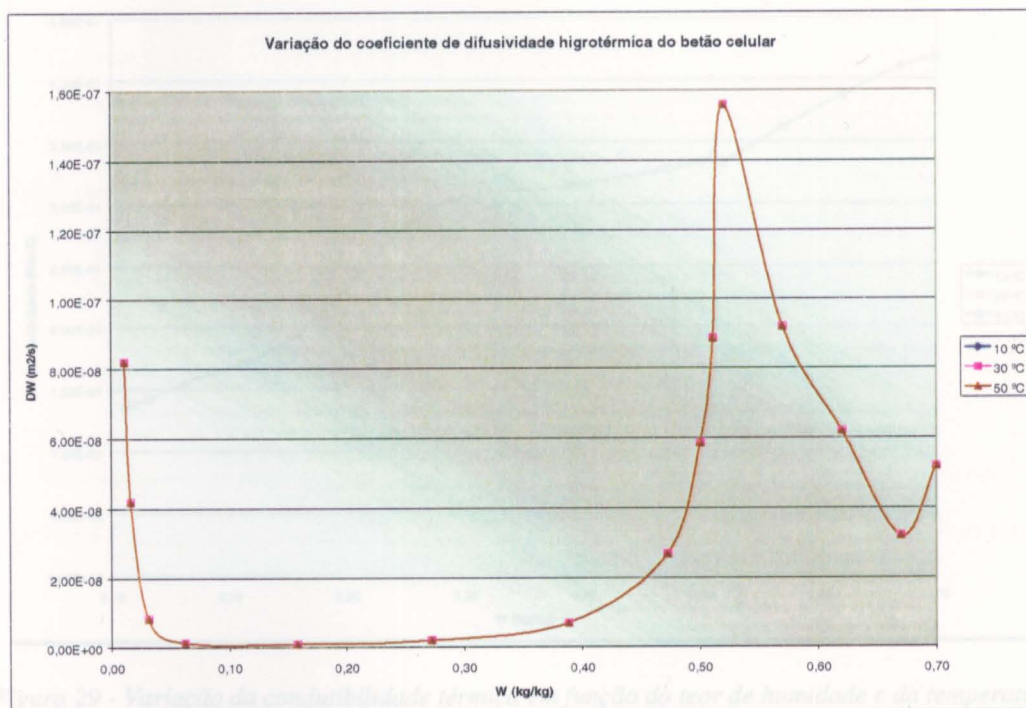


Figura 27 - Variação do coeficiente de difusividade higrótérmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular

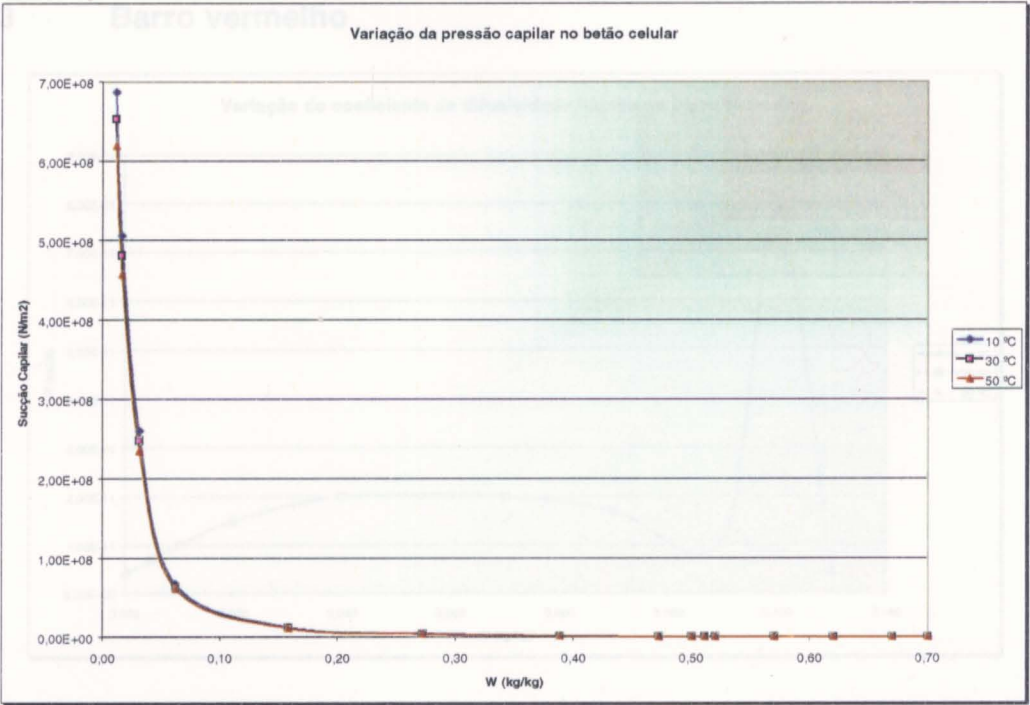


Figura 28 - Variação da pressão capilar em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular

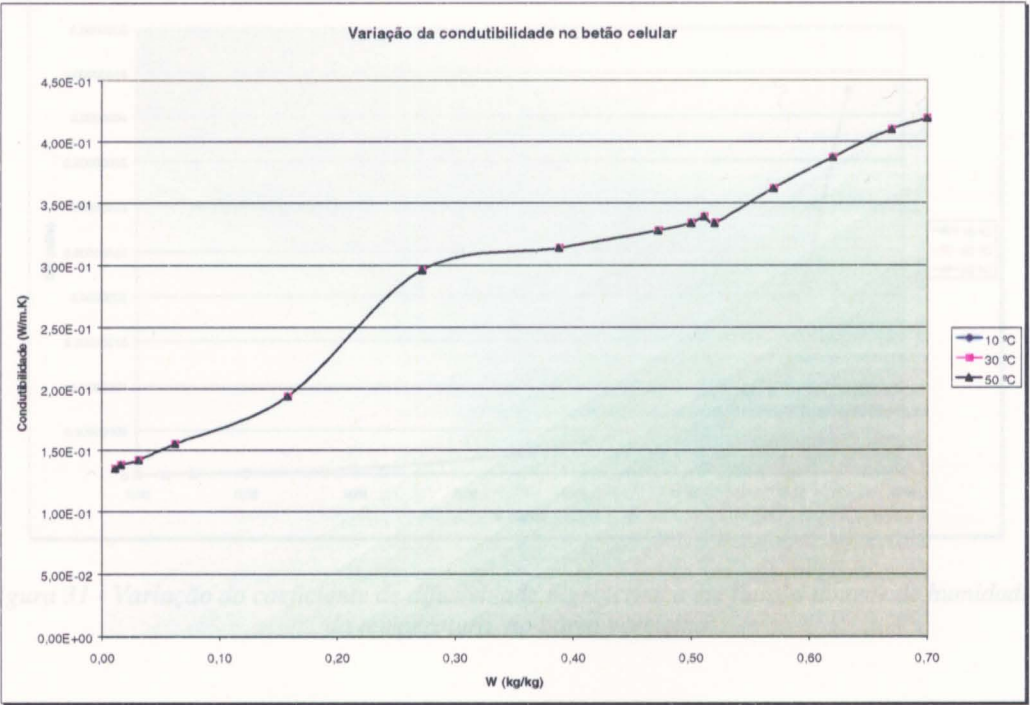


Figura 29 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de humidade e da temperatura no betão celular

4.1.2.3 Barro vermelho

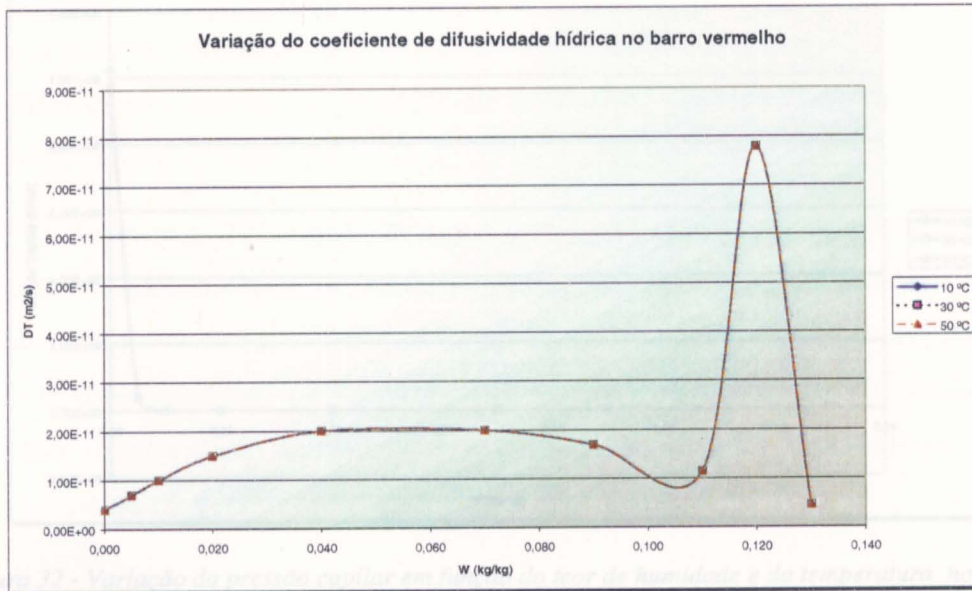


Figura 30 - Variação do coeficiente de difusividade hídrica em função do teor de umidade e da temperatura no barro vermelho

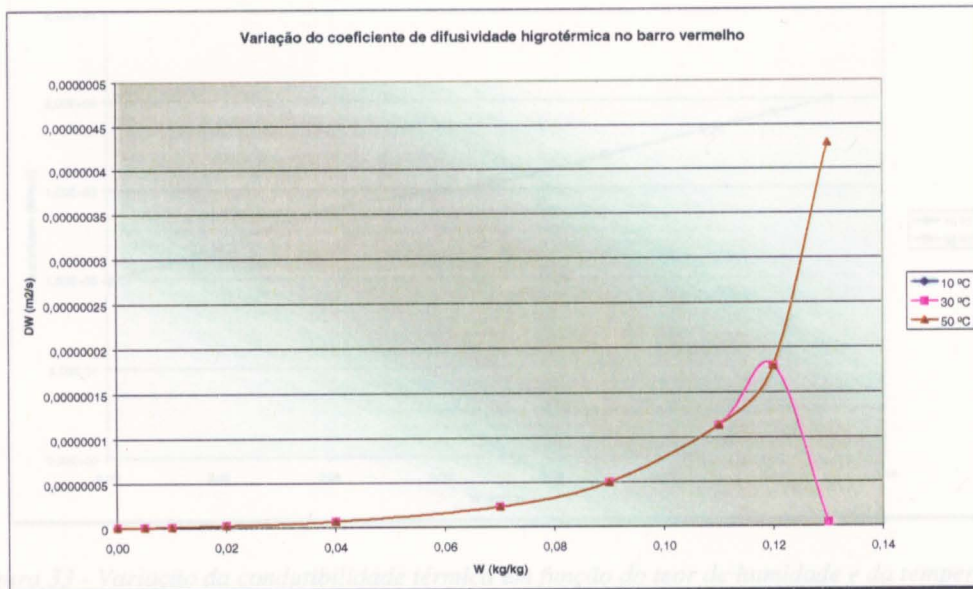


Figura 31 - Variação do coeficiente de difusividade higrótérmica em função do teor de umidade e da temperatura no barro vermelho

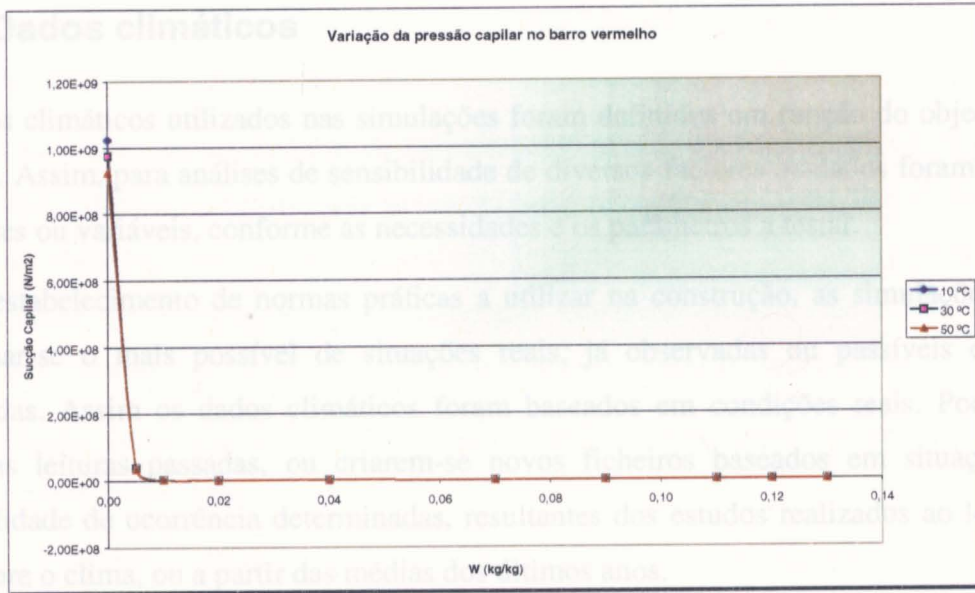


Figura 32 - Variação da pressão capilar em função do teor de umidade e da temperatura no barro vermelho

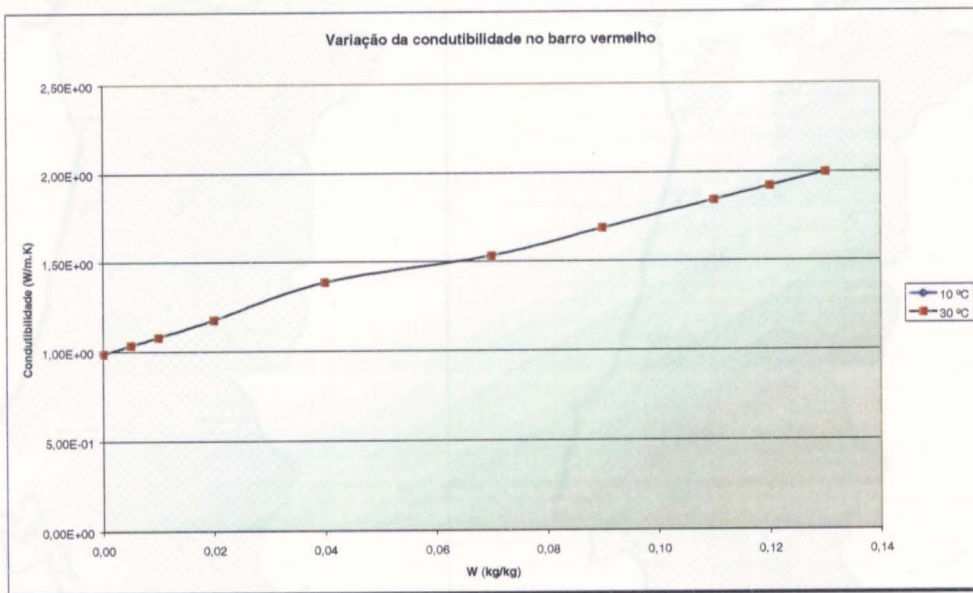


Figura 33 - Variação da condutibilidade térmica em função do teor de umidade e da temperatura no barro vermelho

4.1.3 Dados climáticos

Os dados climáticos utilizados nas simulações foram definidos em função do objectivo das mesmas. Assim, para análises de sensibilidade de diversos factores os dados foram gerados, constantes ou variáveis, conforme as necessidades e os parâmetros a testar.

Para o estabelecimento de normas práticas a utilizar na construção, as simulações devem aproximar-se o mais possível de situações reais, já observadas ou passíveis de serem observadas. Assim os dados climáticos foram baseados em condições reais. Poderão ser utilizadas leituras passadas, ou criarem-se novos ficheiros baseados em situações com probabilidade de ocorrência determinadas, resultantes dos estudos realizados ao longo dos anos sobre o clima, ou a partir das médias dos últimos anos.

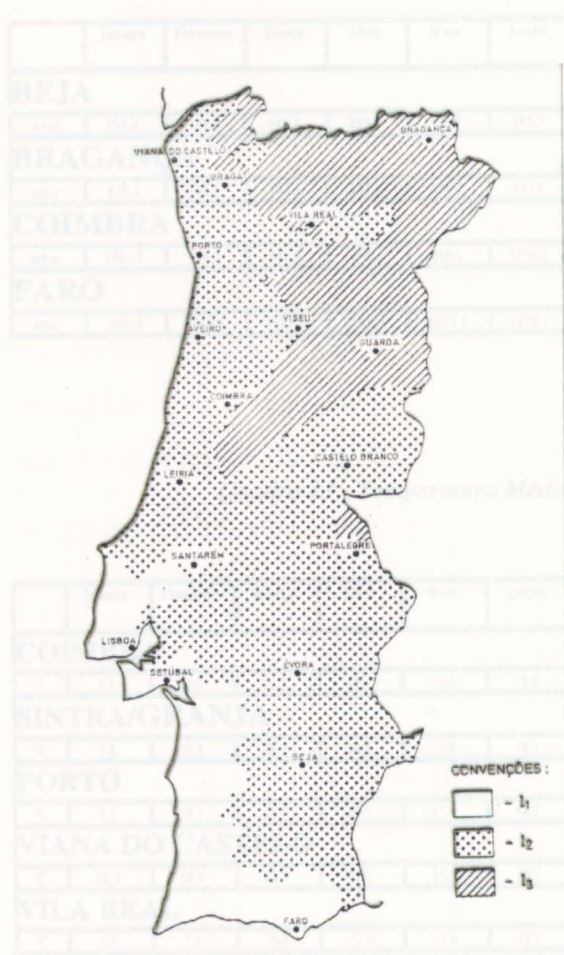


Figura 34 – Zonas Climáticas de Inverno [13]

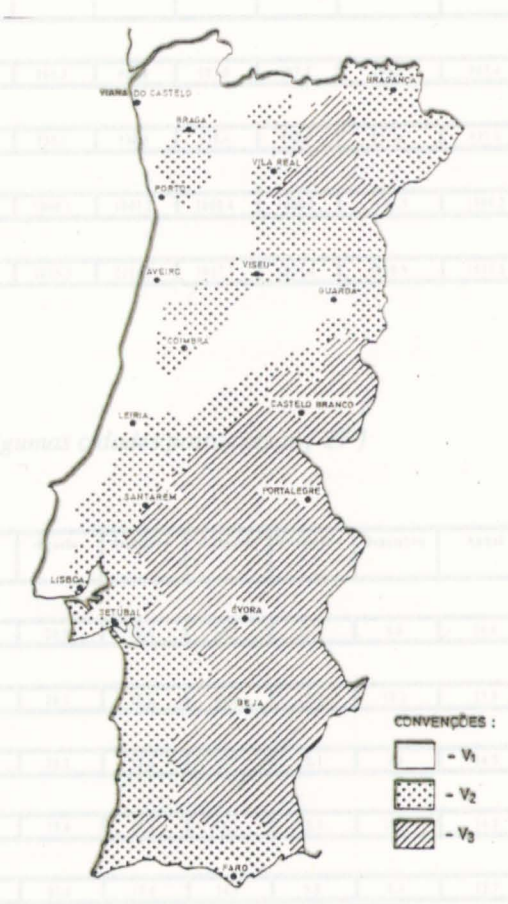


Figura 35 – Zonas climáticas de Verão [13]

O programa possuiu uma base de dados com alguns ficheiros de definição de clima. Poderão ser sempre adicionados ou gerados mais.

Sempre que não exista um ficheiro de clima específico para determinado local, o programa tem a possibilidade de gerar um, que possa definir, por aproximação, o clima da localização pretendida. Para tal, adoptou-se as divisões climáticas estabelecidas no Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios, que de uma forma operativa, estabelecem 3 zonas diferenciadas de clima para Inverno e outras 3 para Verão.

O clima destas zonas está definido no programa pelas temperaturas médias do ar, e pelas humidades relativas médias.

Quadro 12 - Pressão atmosférica média em algumas cidades portuguesas [29]

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
BEJA													
mbar	989.9	988.8	986.9	985.6	986.2	986.7	987.1	986.5	986.6	987.9	987.5	989.5	987.4
BRAGANÇA													
mbar	938.1	936.5	936.3	935.1	936.3	937.4	938.6	938.1	938.3	938.4	936.9	937.6	937.3
COIMBRA													
mbar	1001.5	999.5	999.6	998.5	999.2	1000.0	1000.6	1000.1	1001.2	1000.4	1000.0	1002.5	1000.2
FARO													
mbar	1020.4	1018.5	1017.3	1016.2	1015.9	1016.2	1016.0	1015.3	1016.7	1017.3	1017.4	1019.9	1017.2

Quadro 13 - Temperatura Média em algumas cidades portuguesas [29]

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Anual
COIMBRA													
°C	9.3	10.2	11.7	13.4	16.0	18.8	20.7	20.9	19.4	15.9	12.2	9.6	14.8
SINTRA/GRANJA													
°C	9.8	10.5	12.2	14.2	15.3	18.2	19.9	20.1	19.2	16.6	13.1	10.3	15.0
PORTO													
°C	9.2	10.3	11.5	13.3	15.7	18.5	20.1	20.1	18.8	15.7	12.1	9.4	14.5
VIANA DO CASTELO													
°C	10.0	10.4	12.1	13.1	15.3	18.3	19.8	19.6	18.8	16.3	12.8	10.5	14.8
VILA REAL													
°C	6.3	7.6	10.0	11.5	14.8	18.9	21.9	21.6	19.4	14.9	9.8	6.9	13.7

4.2 SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM EMBEBIÇÃO E SECAGEM DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O estabelecimento das condições de simulação requer o conhecimento de quais os parâmetros que são verdadeiramente determinantes nos resultados. Assim foram feitas algumas simulações, sem correspondência a situações reais, com vista à determinação da influência dos diversos parâmetros e da sensibilidade à alteração dos mesmos por parte deste modelo.

Foram executadas análises de sensibilidade aos seguintes factores:

- Condições iniciais
- Condicionantes climáticas
- Intervalo de tempo da simulação

4.2.1 Condições Iniciais

Serão as condições iniciais de uma amostra, isto é, a distribuição dos teores de humidade e de temperatura, determinantes ou não nos resultados finais da simulação?

Foram feitas várias simulações, variando unicamente a distribuição inicial dos teores de humidade e da temperatura, e colocando-os sob as mesmas condições de simulação, para determinar o efeito das mesmas sobre os resultados finais.

A análise das temperaturas realizou-se entre os 10 °C e os 35°C, e a análise dos teores de humidade entre os 0.05 e os 0.50 Kg/kg para o betão celular.

Quadro 14 - Valores fixos no teste da distribuição inicial de temperaturas ao longo da amostra

Material	Betão 1
Tempo de simulação	24 h
Espessura	10 cm
dx	0,5
he	25
hi	25
be	0,003
bi	0,003
Latitude	42 N
Longitude	8 E
Azimute	180
Direcção do Vento	80
Velocidade do Vento	3
Erro Maximo	0,002

Exterior	
Temperatura	10;20;30
Humidade Relativa	50%
Radiação	0,00
Chuva	0
Interior	
Temperatura	10;20;30
Humidade relativa	50%
Passo	0,05
Perfis Iniciais Constantes	
Temperatura	Teste
Humidade	0,20

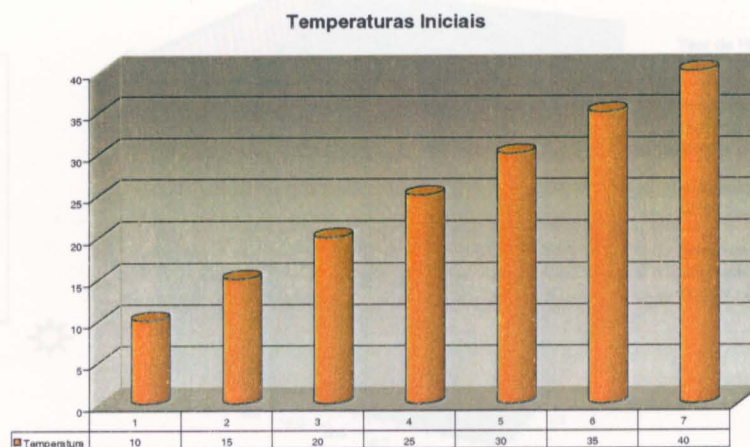


Figura 36 - Variação da temperatura no teste da distribuição inicial de temperaturas ao longo da amostra

A distribuição inicial de temperaturas na amostra, deixa de ter qualquer efeito sobre o resultado da simulação, mesmo para períodos relativamente curtos. Num tempo de simulação nunca superior a 24 horas, independentemente das temperaturas iniciais, a amostra fica com uma variação de temperaturas que reflecte unicamente a diferença de temperaturas entre interior e exterior. (Figura 37, Figura 38)

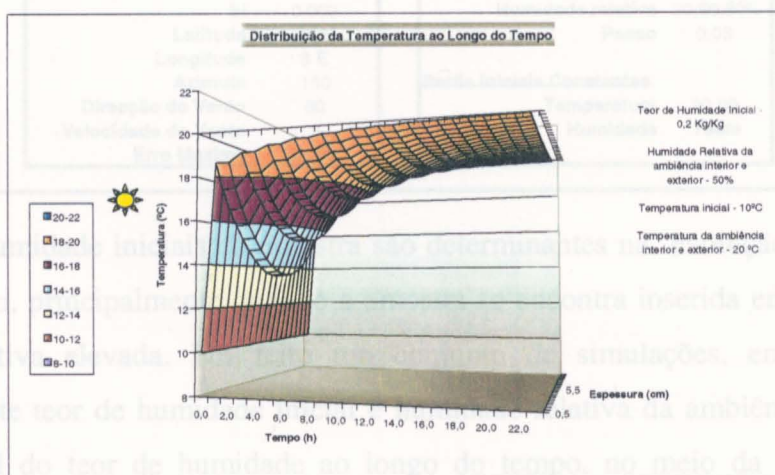


Figura 37 - Variação da temperatura da amostra ao longo de 24 horas - temperatura inicial 10°C

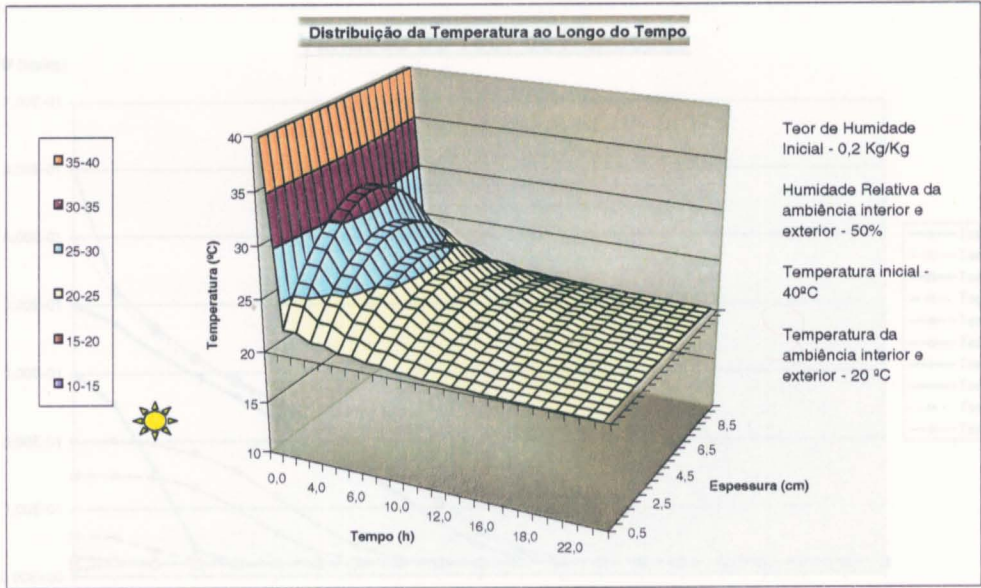


Figura 38 - Variação da temperatura da amostra ao longo de 24 horas - temperatura inicial 40°C

Figura 39 - Variação do teor de humidade da amostra, partindo de teores de humidade diferentes

Quadro 15- Valores fixos no teste da distribuição inicial de teores de Humidade ao longo da amostra

Material	Betão 1	Exterior	
Tempo de simulação	24 h	Temperatura	20,00
Espessura	10 cm	Humidade Relativa	20;50;80%
dx	0,5	Radiação	0,00
he	25	Chuva	0
hi	25	Interior	
be	0,003	Temperatura	20%
bi	0,003	Humidade relativa	20;50;80%
Latitude	42 N	Passo	0,05
Longitude	8 E	Perfis Iniciais Constantes	
Azimuth	180	Temperatura	20,00
Direcção do Vento	80	Humidade	Teste
Velocidade do Vento	3		
Erro Maximo	0,002		

Os teores de humidade iniciais da amostra são determinantes na evolução dos mesmos ao longo do tempo, principalmente quando a amostra se encontra inserida em ambiência com humidade relativa elevada. Foi feito um conjunto de simulações, em que se variou combinadamente teor de humidade inicial e humidade relativa da ambiência. A Figura 39 mostra o perfil do teor de humidade ao longo do tempo, no meio da amostra, para os diversos teores de humidade iniciais. Para humidades relativas de 20 %, consegue-se a estabilização da amostra em cerca de 140 horas, para o teor de humidade mais elevado.

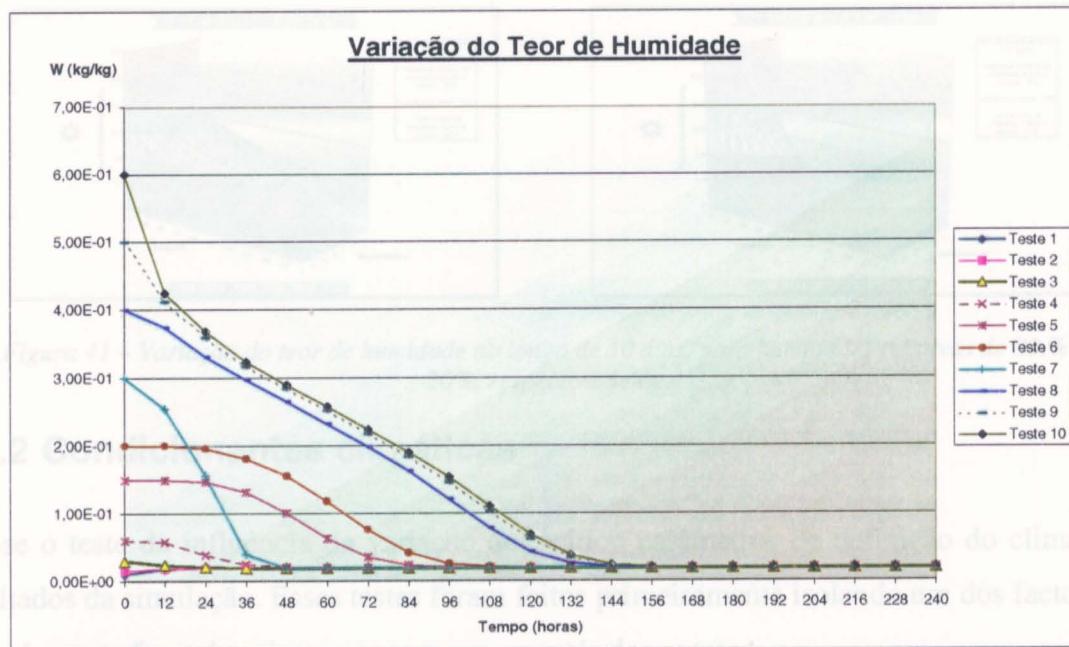


Figura 39 – Variação do teor de humidade da amostra, partindo de teores de humidade diferentes para humidades relativas, interior e exterior, de 20%

Quando subimos a humidade relativa para 50 %, o tempo de estabilização aumenta exponencialmente.

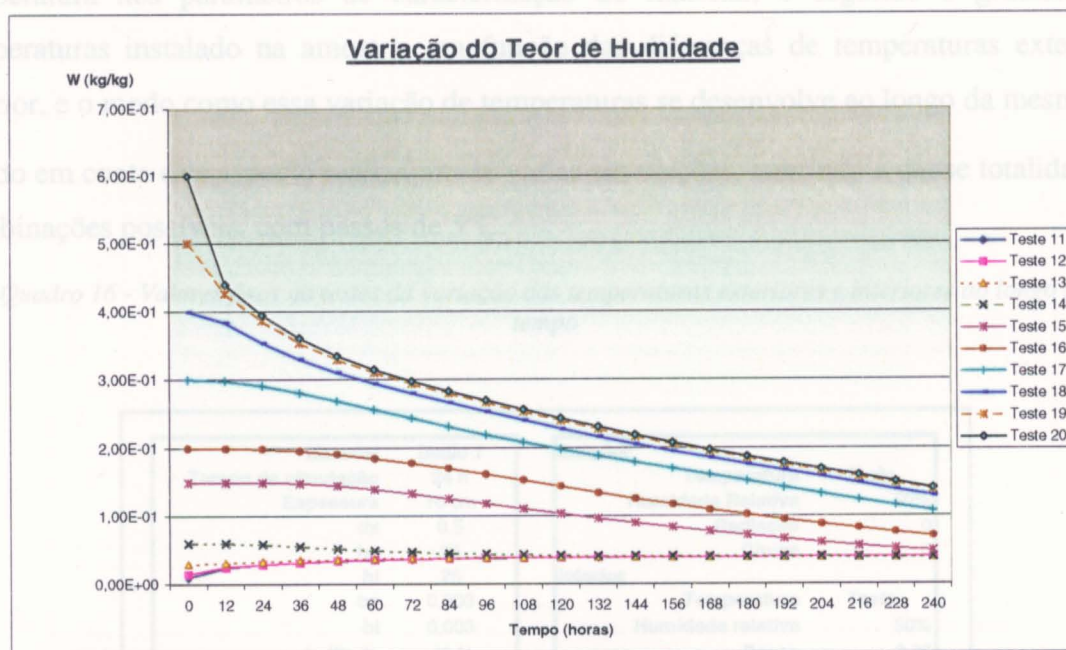


Figura 40 – Variação do teor de humidade da amostra, partindo de teores de humidade diferentes para humidades relativas, interior e exterior, de 50%

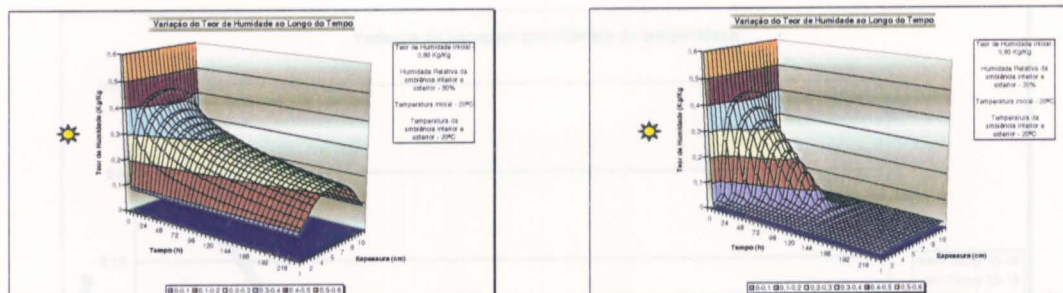


Figura 41 – Variação do teor de humidade ao longo de 10 dias, para humidades relativas de 80 % e 20%, respectivamente

4.2.2 Condicionantes climáticas

Fez-se o teste da influência da variação dos vários parâmetros de definição do clima, nos resultados da simulação. Esses testes foram feitos primeiramente isolando um dos factores, e seguidamente fazendo-o interagir com um ou mais dos outros.

4.2.2.1 Temperaturas interior e exterior

Ao estudar a influência da variação da temperatura devemos ter em conta dois factores, primeiro, a variação da temperatura interior e exterior em si, isto é, a influência do valor da temperatura nos parâmetros de caracterização do material, e segundo o gradiente de temperaturas instalado na amostra, em função das diferenças de temperaturas exterior e interior, e o modo como essa variação de temperaturas se desenvolve ao longo da mesma.

Tendo em conta este aspecto realizaram-se varias simulações, cobrindo a quase totalidade de combinações possíveis, com passos de 5°C.

Quadro 16 - Valores fixos no testes da variação das temperaturas exteriores e interiores ao longo do tempo

Material	Betão 1
Tempo de simulação	24 h
Espessura	10 cm
dx	0,5
he	25
hi	25
be	0,003
bi	0,003
Latitude	42 N
Longitude	8 E
Azimute	180
Direcção do Vento	80
Velocidade do Vento	3
Erro Maximo	0,002

Exterior	
Temperatura	Teste
Humidade Relativa	50%
Radiação	0
Chuva	0
Interior	
Temperatura	Teste
Humidade relativa	50%
Passo	0,05
Partes Iniciais constantes	
Temperatura	20
Humidade	0,2

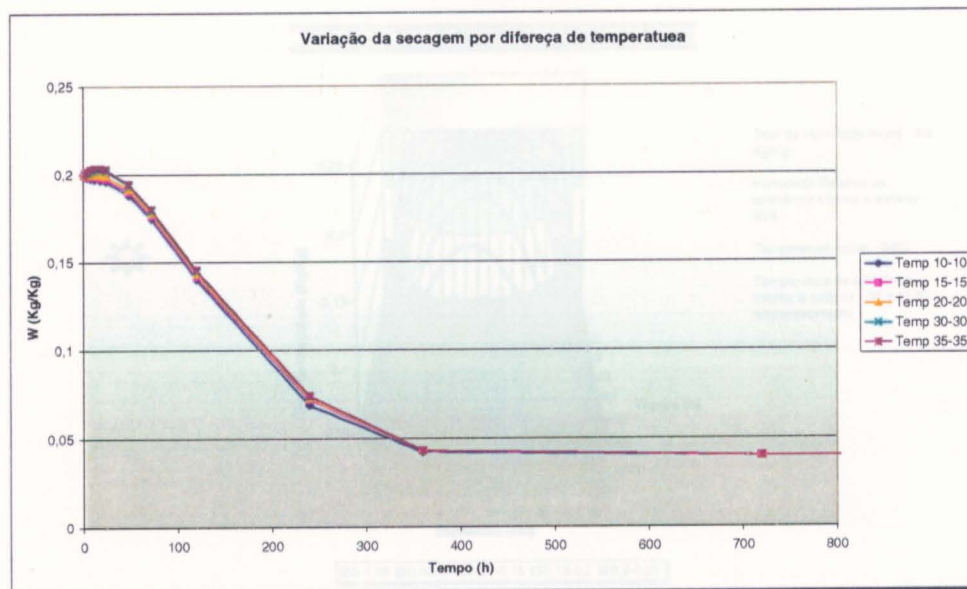


Figura 42 – Variação do teor de humidade em função das temperaturas interiores e exteriores

A temperatura, como motor de secagem do material, tem uma influência diminuta, como podemos ver pelo gráfico da Figura 42, que corresponde ao teor de humidade no meio da amostra. O gradiente de temperaturas não tem, praticamente, influência sobre a secagem. [Figura 43]

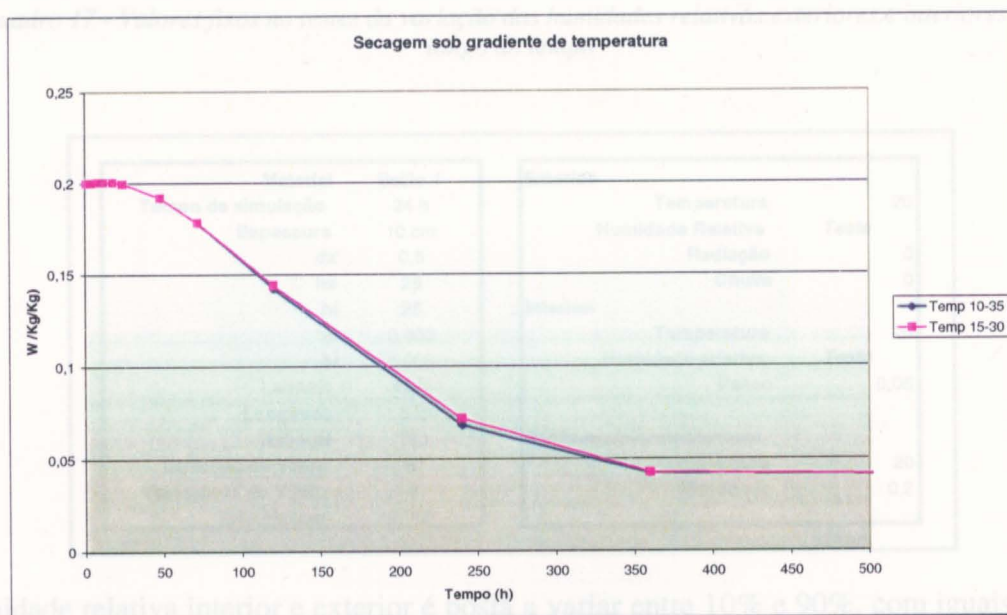


Figura 43 – Variação do teor de humidade em função do gradiente de temperaturas

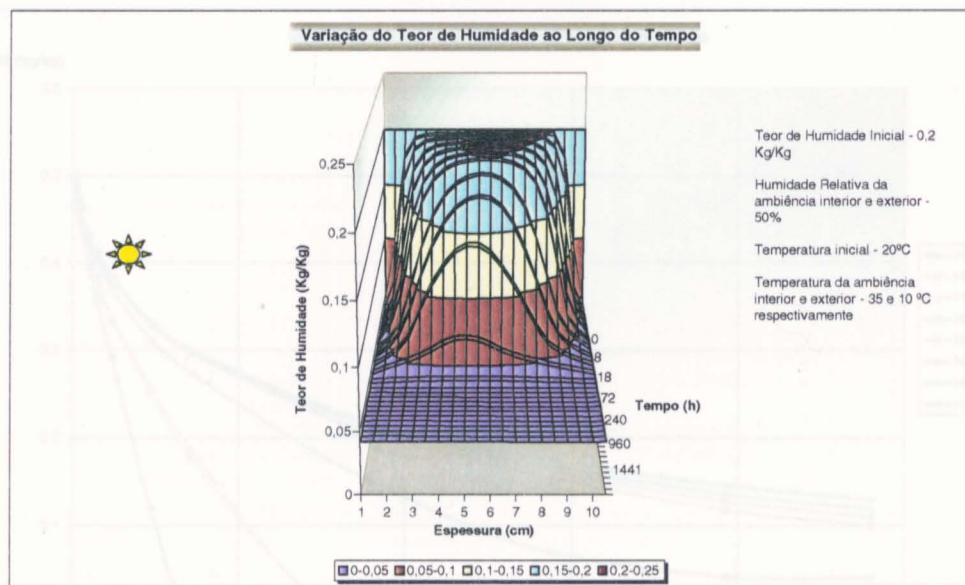


Figura 44 – Secagem por gradiente de temperatura.

Contudo, assiste-se a um deslocamento da curva de teor de humidade máximo, que deixa de estar localizada no ponto médio da amostra.

4.2.2.2 Humidade relativa interior e exterior

Quadro 17 - Valores fixos no testes da variação das humidades relativas exteriores e interiores ao longo do tempo

Material	Betão 1	Exterior-		
Tempo de simulação	24 h	Temperatura		20
Espessura	10 cm	Humidade Relativa	<i>Teste</i>	
dx	0,5	Radiação		0
he	25	Chuva		0
hi	25	Interior-		
be	0,003	Temperatura		20
bi	0,003	Humidade relativa	<i>Teste</i>	
Latitude	42 N	Passo		0,05
Longitude	8 E	Perfis iniciais constantes—		
Azimute	180	Temperatura		20
Direcção do Vento	80	Humidade		0,2
Velocidade do Vento	3			
Erro Maximo	0,002			

A humidade relativa interior e exterior é posta a variar entre 10% e 90%, com iguais valores para interior e exterior, para uma análise mais directa dos resultados. Pretende-se determinar o tempo necessário para colocar a amostra em equilíbrio higroscópico com o meio envolvente.

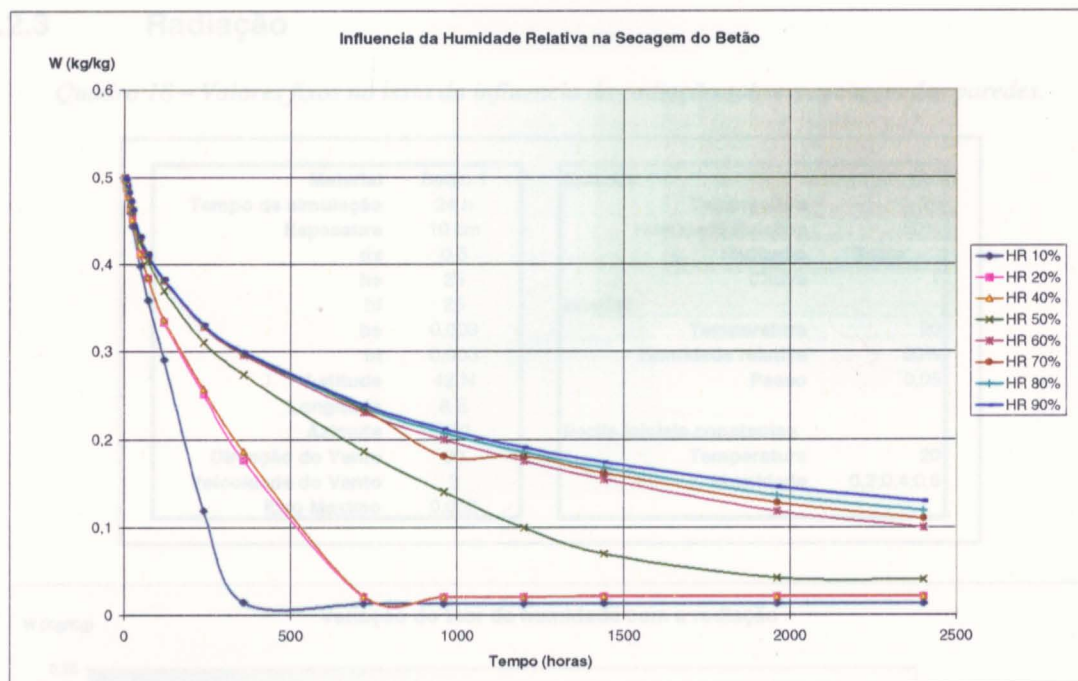


Figura 45 - Influência da Humidade relativa na secagem do betão

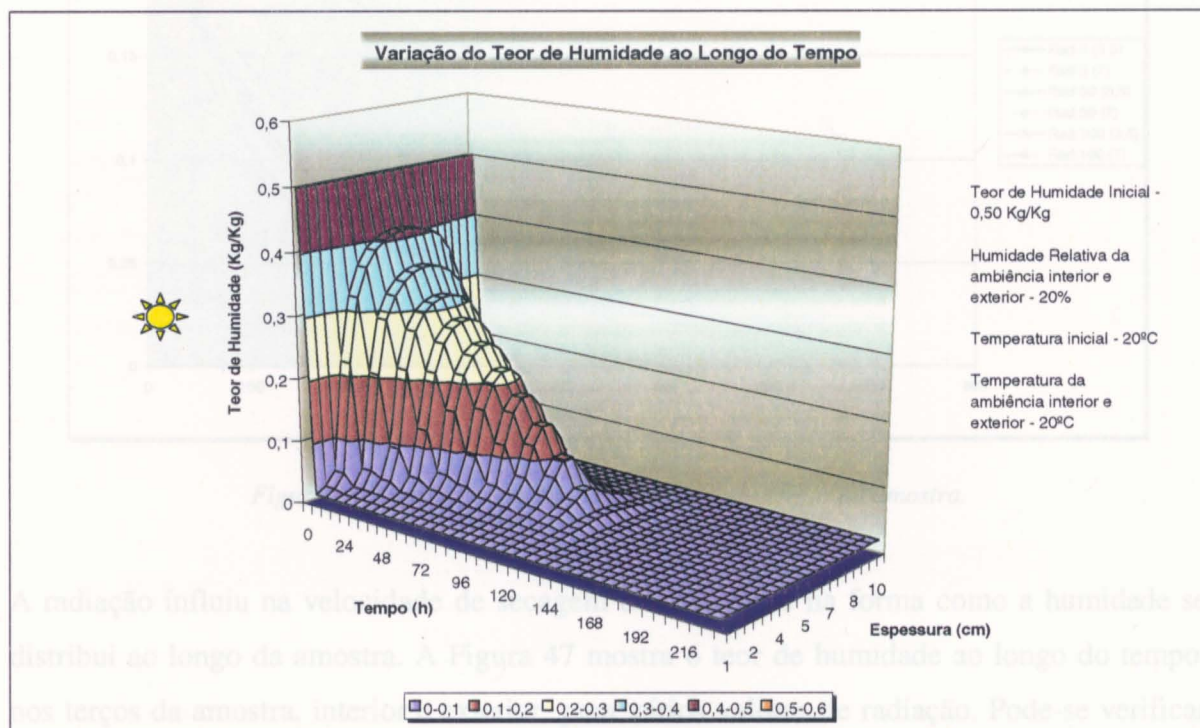


Figura 46- Variação do teor de humidade ao longo do tempo - tempo de colocação da amostra em equilíbrio higroscópico com o ambiente para uma baixa humidade relativa

4.2.2.3 Radiação

Quadro 18 – Valores fixos no teste da influencia da radiação sobre a secagem das paredes.

Material	Betão 1	Exterior	
Tempo de simulação	24 h	Temperatura	20
Espessura	10 cm	Humidade Relativa	50%
dx	0,5	Radiação	Teste
he	25	Chuva	1
hi	25	Interior	
be	0,003	Temperatura	20
bi	0,003	Humidade relativa	50%
Latitude	42 N	Passo	0,05
Longitude	8 E	Perfis Iniciais constantes	
Azimuth	180	Temperatura	20
Direcção do Vento	80	Humidade	0,2;0,4;0,6
Velocidade do Vento	3		
Erro Maximo	0,002		

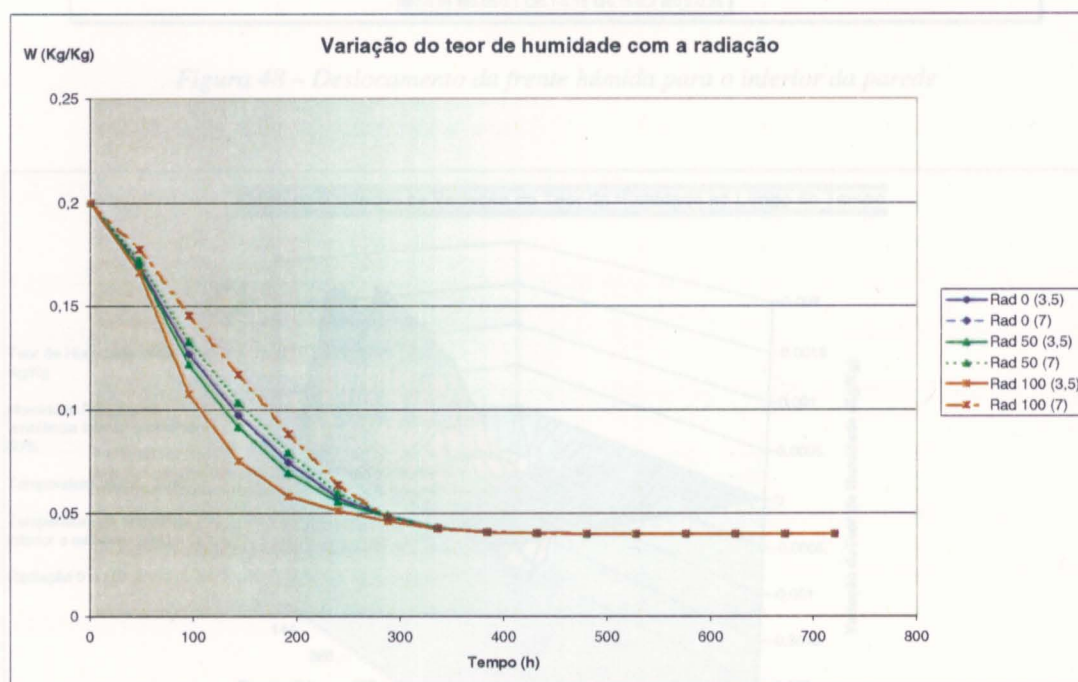


Figura 47 – Variação do teor de humidade nos terços da amostra.

A radiação influenciou na velocidade de secagem do material e na forma como a humidade se distribui ao longo da amostra. A Figura 47 mostra o teor de humidade ao longo do tempo, nos terços da amostra, interior e exterior, para vários valores de radiação. Pode-se verificar que a radiação actua como um motor de secagem, fazendo deslocar o perfil hidrico na direcção do interior.

verificar a radiação é responsável pela diminuição do teor de humidade na metade exterior da amostra, e pelo seu aumento na metade interior.

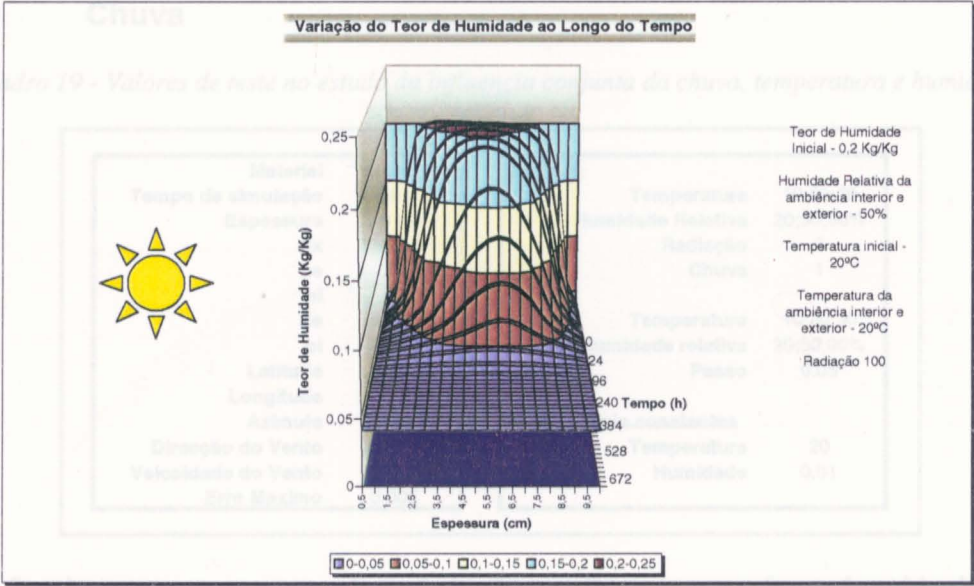


Figura 48 – Deslocamento da frente húmida para o interior da parede

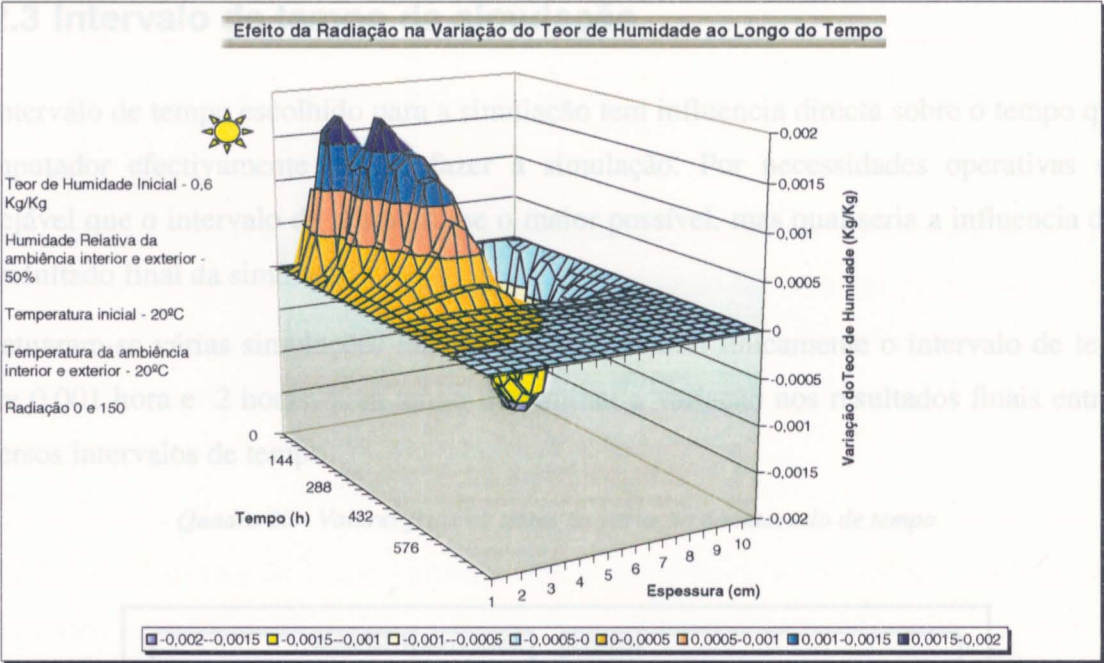


Figura 49 – Diferença de teor de humidade de duas amostras

A Figura 49 corresponde ao gráfico da diferença de teores de humidade de duas amostras, uma não sujeita a radiação e outra sujeita a um nível médio de radiação. Como podemos verificar a radiação é responsável pela diminuição do teor de humidade na metade exterior da amostra, e pelo seu aumento na metade interior.

4.2.2.4 Chuva

Quadro 19 - Valores de teste no estudo da influencia conjunta da chuva, temperatura e humidade relativa

Material	Betão 1	Exterior	
Tempo de simulação	24 h	Temperatura	10;20;30
Espessura	10 cm	Humidade Relativa	20;50;90%
dx	0,5	Radiação	0
he	25	Chuva	1
hi	25	Interior	
be	0,003	Temperatura	10;20;30
bi	0,003	Humidade relativa	20;50;90%
Latitude	42 N	Passo	0,05
Longitude	8 E	Perfis Iniciais constantes	
Azimute	180	Temperatura	20
Direcção do Vento	80	Humidade	0,01
Velocidade do Vento	3		
Erro Maximo	0,002		

A chuva funciona como um motor de embebição que faz avançar a frente humida do exterior para o interior da amostra.

4.2.3 Intervalo de tempo da simulação

O intervalo de tempo escolhido para a simulação tem influencia directa sobre o tempo que o computador efectivamente leva a fazer a simulação. Por necessidades operativas seria desejável que o intervalo de tempo fosse o maior possível, mas qual seria a influencia disso no resultado final da simulação.

Efectuaram-se várias simulações idênticas fazendo variar unicamente o intervalo de tempo entre 0,001 hora e 2 horas, para tentar determinar a variação nos resultados finais entre os diversos intervalos de tempo.

Quadro 20 - Valores fixos no testes da variação do intervalo de tempo

Material	Betão Celular	Exterior	
Tempo de simulação	240 horas	Temperatura	20
Espessura	10 cm	Humidade Relativa	50%
dx	0,5	Radiação	0
he	25	Chuva	0
hi	25	Interior	
be	0,003	Temperatura	20
bi	0,003	Humidade relativa	50%
Latitude	42 N	Passo	Teste
Longitude	8 E	Perfis Iniciais constantes	
Azimute	180	Temperatura	20
Direcção do Vento	80	Humidade	0,2
Velocidade do Vento	3		
Erro Maximo	0,002		

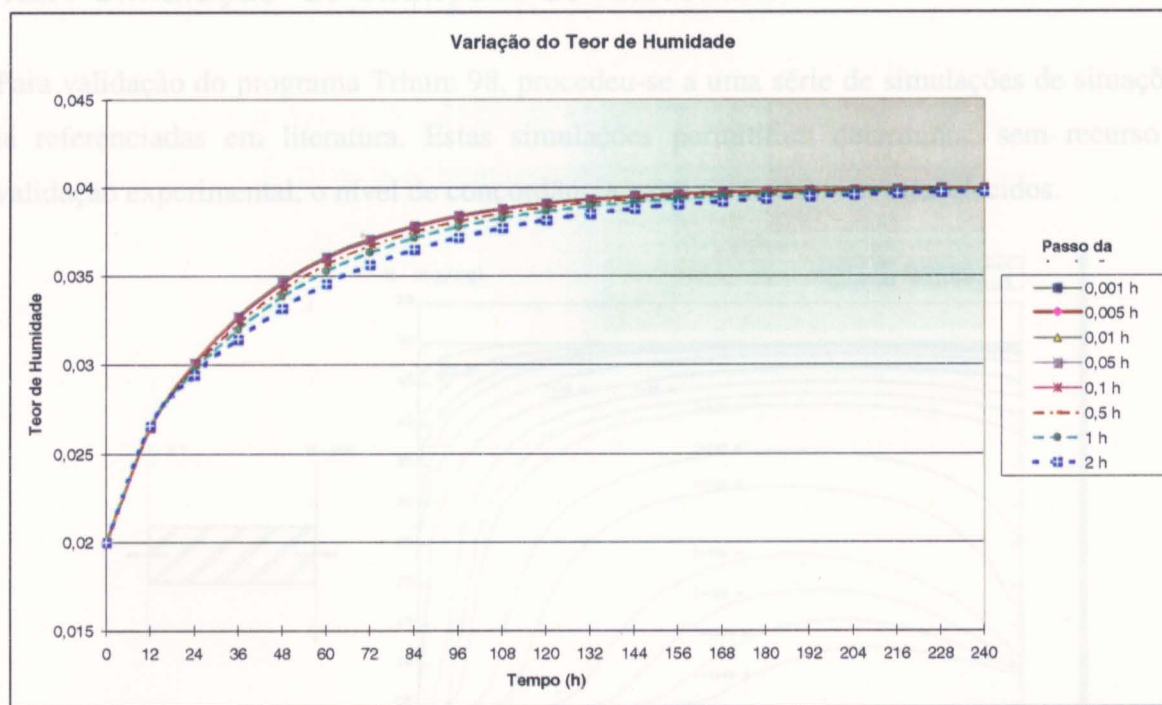


Figura 50 – Variação do teor de humidade da amostra em função do intervalo de tempo escolhido para simulação (perfil efectuado no ponto médio da amostra)

Como podemos observar na Figura 50, a alteração do intervalo de tempo da simulação tem influência na evolução do teor de humidade. Essa variação faz-se sentir predominantemente para passos de simulação já elevados, com valores entre os 30 minutos e as 2 horas. Contudo, para simulações relativamente dilatadas no tempo existe uma tendência para a convergência com os valores das simulações de passo menor.

Assim, aceita-se que em simulações de longa duração, vários meses ou vários anos, se estabeleçam intervalos de tempo variáveis, menores no início da simulação, que irão sendo aumentados no decurso da mesma. Julgamos não ser conveniente usar intervalos superiores a 1 hora.

Da comparação entre os dois softwares (Figura 51 e Figura 52) podemos verificar os que já referenciadas em literatura. Estas simulações permitiram determinar, sem recurso à validação experimental, o nível de concordância com os modelos já estabelecidos.

4.2.4 Simulação de situações de referência

Para validação do programa Trhum 98, procedeu-se a uma série de simulações de situações já referenciadas em literatura. Estas simulações permitiram determinar, sem recurso à validação experimental, o nível de concordância com os modelos já estabelecidos.

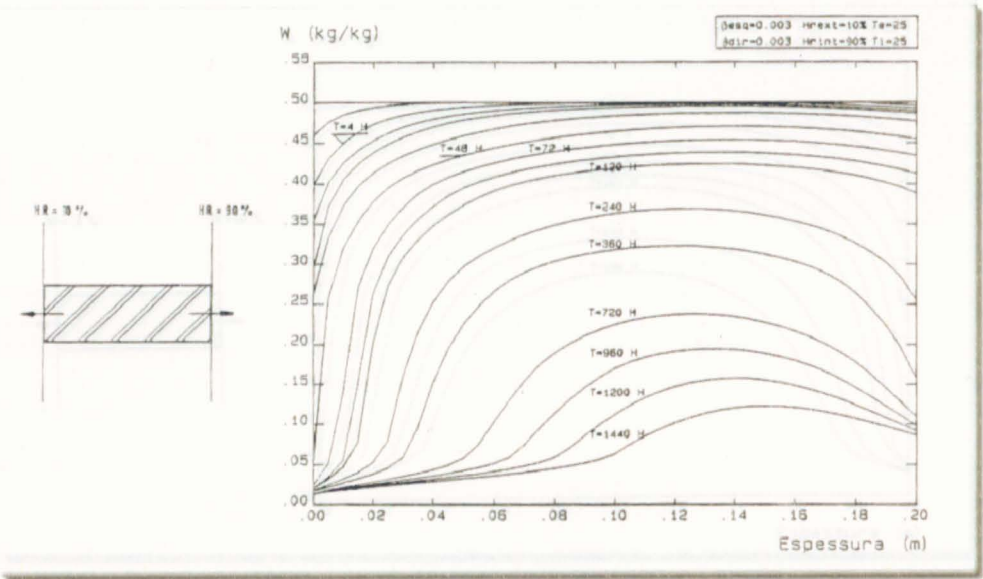


Figura 51 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) – Trhumidade [1]

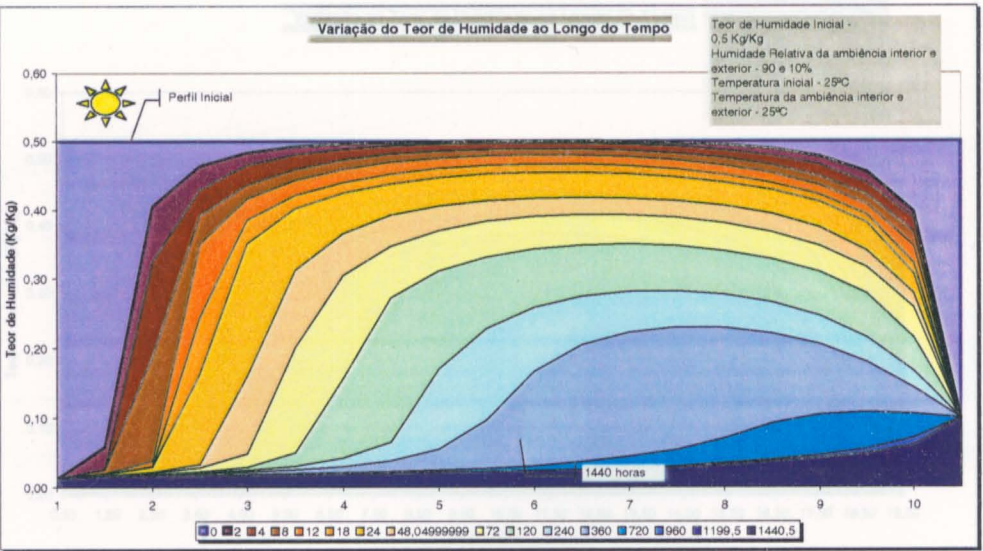


Figura 52 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) – Trhum 98

Da comparação entre os dois gráficos [Figura 51 ; Figura 52] podemos verificar os que existe uma boa concordância, para um periodo dilatado, entre o resultado das duas simulações, contudo existem também diferenças importantes, principalmente ao nível dos perfis das primeiras horas. A simulação efectuada no Trhum 98 converge, ao nível da superfície da amostra, muito mais rapidamente para o teor de humidade higroscópico.

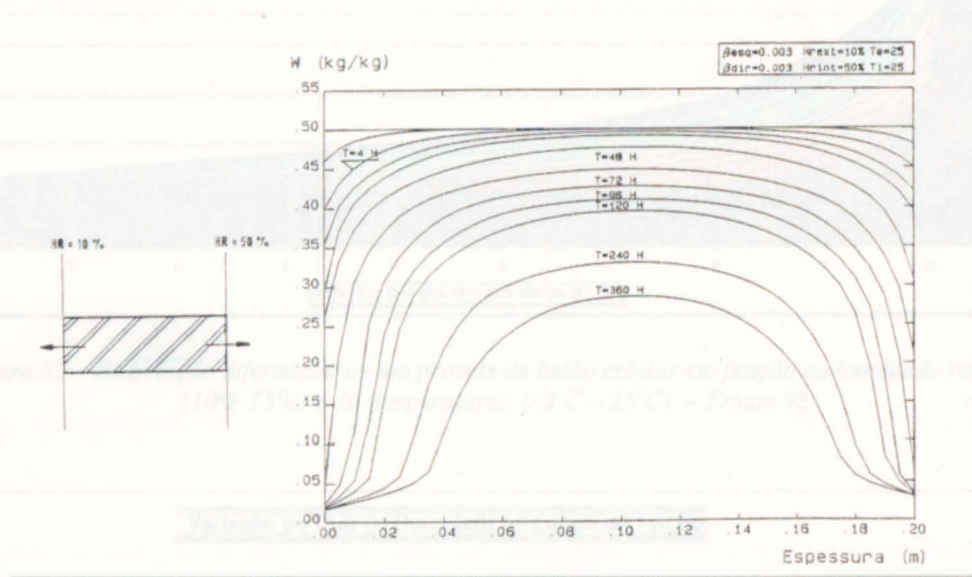


Figura 53 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-50%) – Trhumidade [1]

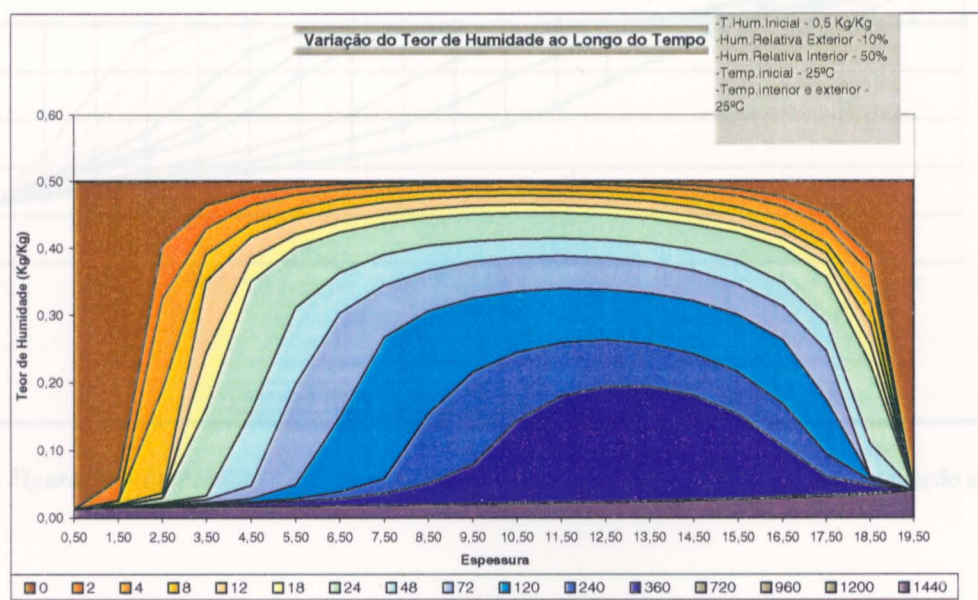


Figura 54 – Secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-50%) – Trhum 98

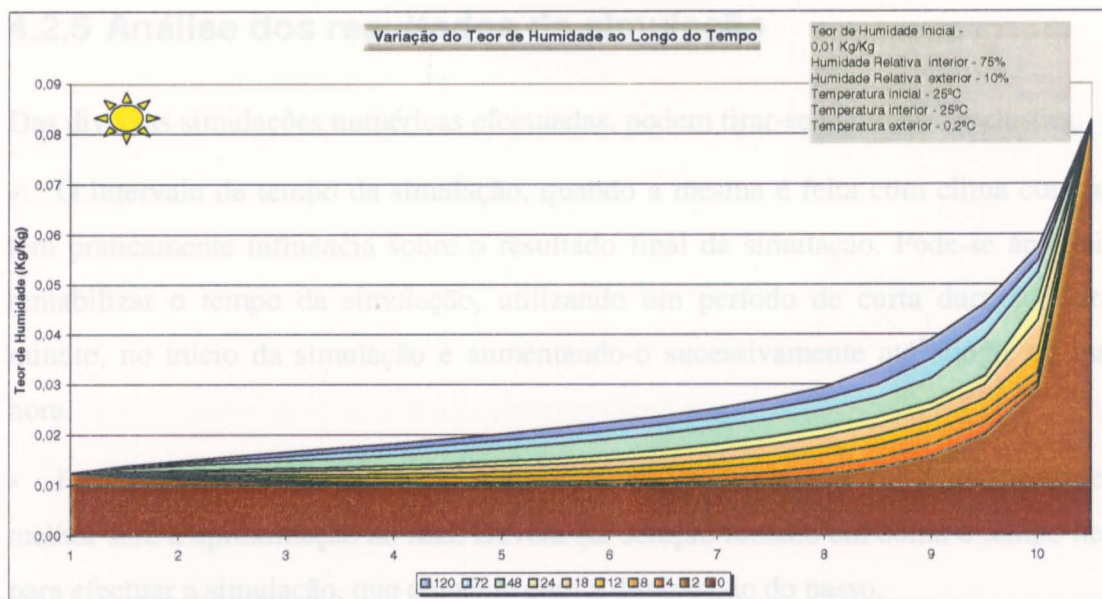


Figura 55 – Embebição diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-75%) e da temperatura (0,2°C – 25°C) – Trhum 98

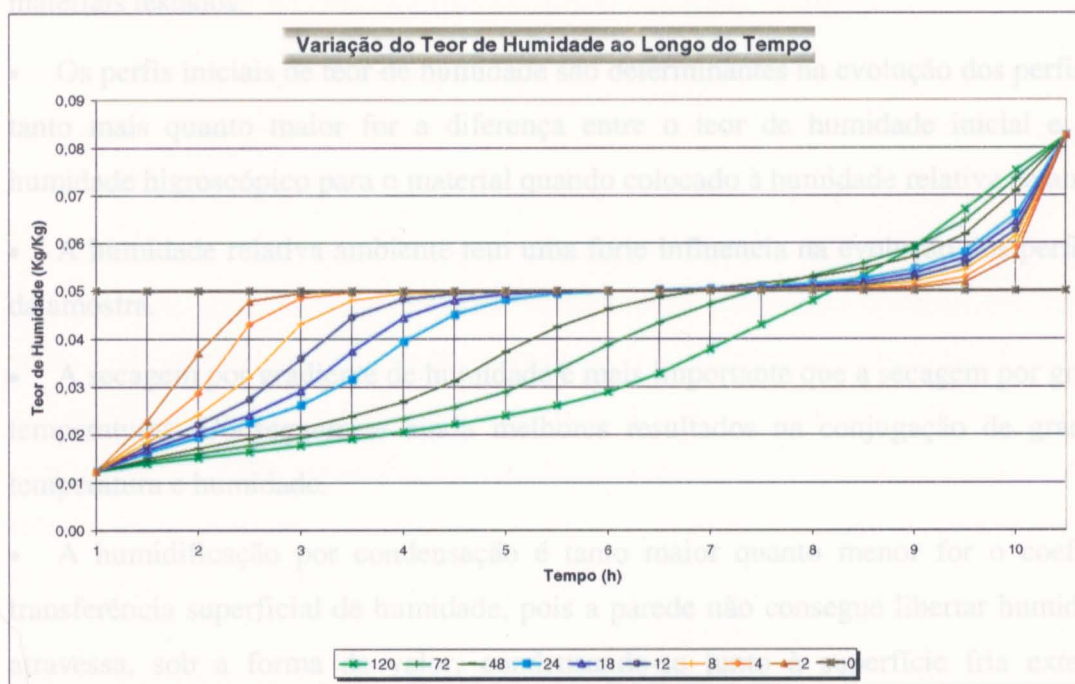


Figura 56 – Embebição e secagem diferencial de um provete de betão celular em função da humidade relativa (10%-90%) e da temperatura (0,2°C – 45°C) – Trhum 98

4.2.5 Análise dos resultados da simulação

Das diversas simulações numéricas efectuadas, podem tirar-se algumas conclusões.

- O intervalo de tempo da simulação, quando a mesma é feita com clima constante, não tem praticamente influência sobre o resultado final da simulação. Pode-se aproveitar para rentabilizar o tempo da simulação, utilizando um período de curta duração, cerca de 1 minuto, no início da simulação e aumentando-o sucessivamente até atingir no máximo 1 hora.
- Para efectuar simulações com clima variável, quanto menor for o intervalo de tempo, melhor será a aproximação ao real. Deverá ser sempre tomado em conta o tempo necessário para efectuar a simulação, que aumenta com a diminuição do passo.
- Os perfis iniciais de temperatura do material, não tem praticamente influência na evolução dos perfis hídricos, para simulações com duração superior a 24 horas, para os materiais testados.
- Os perfis iniciais de teor de humidade são determinantes na evolução dos perfis hídricos, tanto mais quanto maior for a diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade higroscópico para o material quando colocado à humidade relativa da ambiência.
- A humidade relativa ambiente tem uma forte influencia na evolução dos perfis hídricos da amostra.
- A secagem por gradiente de humidade é mais importante que a secagem por gradiente de temperaturas. Conseguem-se ainda melhores resultados na conjugação de gradientes de temperatura e humidade.
- A humificação por condensação é tanto maior quanto menor for o coeficiente de transferência superficial de humidade, pois a parede não consegue libertar humidade que a atravessa, sob a forma de valor, condensando-se junto à superfície fria exterior. Este fenómeno corresponde, por exemplo, à colocação de uma barreira pára-vapor numa parede não isolada.

4.2.6 Interpretação dos resultados - correlação com algumas condicionantes da construção

Da análise das diversas simulações efectuadas, algumas conclusões podem ser tiradas relativamente à concepção e execução de elementos construtivos.

Uma barreira pára-vapor, é, como se costuma dizer, um pau de 2 bicos, pois se bem utilizada pode ser óptima, se mal colocada fará mais mal do que bem.

Um limite à difusão de vapor deve ser sempre colocado numa zona sem grandes variações térmicas, isto é, uma zona em que as pressões de vapor se possam manter sensivelmente constantes, para não existirem condensações.

Assim, uma barreira para-vapor nunca deve ser colocada numa zona fria, porque irá gerar condensações e movimentos a frente húmida em direcção ao interior.

Quando exista a necessidade da colocação de uma barreira pára-vapor na superfície exterior de um elemento, mais fria, esta deverá ser protegida com isolamento térmico que garanta a uniformidade da temperatura do mesmo.

O sentido normal dos fluxos de vapor nas paredes exteriores é geralmente do interior para o exterior, pelo gradiente das pressões normalmente instaladas. Contudo em situações de verão, com a utilização abusiva de sistemas de ar condicionado, desumidificadores, ou a não utilização dos espaços, poderemos assistir a uma inversão dos fluxos que poderão, eventualmente, criar condensações nas faces interiores das paredes. O programa permite simular estas situações e estabelecer limites de humidade relativa e temperatura a serem respeitados pelos ocupantes dos edifícios.

5. CONCLUSÕES

O estudo da transferência de humidade e calor nas paredes dos edifícios tem um profundo interesse com vista a uma maior qualificação do nosso parque edificado. Com este trabalho julgamos que demos mais um pequeno passo no longo caminho que ainda falta percorrer.

Esperamos que o programa Trhum 98 se venha a revelar um auxílio importante na modelização do comportamento de elementos construtivos, e uma ferramenta de ajuda na concepção dos mesmos.

O trabalho realizado assentou fundamentalmente na elaboração do programa Trhum 98, para ambiente Windows, encarado como um programa de fácil utilização e divulgação. Assim foram considerados e ponderados todos os aspectos de relação com o utilizador, entrada de dados, saída de resultados, visualização do cálculo, que nos pareceram ser os mais correctos para facilidade de utilização pretendida, contudo só um uso sistemático por diferentes pessoas, com diferentes formações, poderá testar efectivamente a versatilidade, a facilidade e a eficácia do programa.

Este é um dos trabalhos que se nos afigura como continuação possível do presente estudo, outro será a recolha ou determinação dos diversos parâmetros de caracterização para outros materiais que não os estudados, para o enriquecimento da base de dados do programa e o alargamento do âmbito de simulações possíveis. Ou ainda a caracterização do clima para mais locais portugueses, e talvez europeus, se a aposta na internacionalização do software for efectivamente uma aposta ganha. Mas isso só o tempo o poderá determinar.

Ainda como linha de investigação futura, julgamos oportuno referenciar a revisão do modelo para paredes de múltiplas camadas, com a determinação das condições de continuidade entre os materiais, na sequência do programa inicial Trhumidade.

As simulações efectuadas no âmbito deste trabalho, cobriram uma parte das situações possíveis de simulação numérica e de análise das mesmas, mas muitas outras são possíveis, direccionadas para objectivos específicos do utilizador.

Uma empresa de tintas poderá utilizar o programa por exemplo para a determinação do tempo que deverão deixar passar entre a descofagem de um betão, ou a execução de um

reboco, antes de aplicar uma pintura, para que não surjam problemas com bolhas ou fungos motivadas pelas humidades.

Uma empresa de isolamentos térmicos projectados, poderá utilizar o programa para determinar que tempo deve esperar, após uma parede ter estado sujeita a chuva incidente, até a mesma ter atingido um teor de humidade que lhe permita a aplicação do isolamento.

Uma empresa de revestimentos de madeira poderá usar o programa para prever o tempo que deverá esperar até que o suporte tenha atingido um teor de humidade compatível com o revestimento a aplicar.

Estes são alguns exemplos que nos ocorreram, mas provavelmente muitos outros poderão ser possíveis.

Lista de Referências Bibliográficas

- [1] FREITAS, Vasco Peixoto de - Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios - Análise do Fenómeno de Interface - Tese de Doutoramento - FEUP 1992.
- [2] CRAUSSE, Pierre - Étude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité em milieux poreux non saturé, Thèse d'État, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, Janeiro 1983.
- [3] HENRIQUES, Fernando Manuel Anjos - Acção da Humidade em Paredes - Formas de manifestação, critérios de quantificação e análise de soluções de reparação - Tese de Doutoramento - IST 1992.
- [4] COSTA, J. Almeida; MELO, A. Sampaio e - Dicionário da Língua Portuguesa - Porto Editora - Porto 1982.
- [5] FEDERATION NATIONAL DU BATIMENT - Etudes des Transferts Simultanés de Chaleur et d'Humidité dans les Parois Multicouches.
- [6] HOLM, Andreas H. - Moisture Migration in Building Elements - Analysis of the moisture transmission throughout an interface – Report - FEUP 1995
- [7] VÁRIOS - Dicionário Técnico e Científico Ilustrado - Circulo de Leitores - Lisboa 1982.
- [8] VÁRIOS - Focus, Enciclopédia Internacional - Livraria Sá da Costa Editora - Lisboa 1964.
- [9] VÁRIOS - Humidade em Paredes de Edifícios - International Symposium on Moisture Problems in Building Walls - Porto 1995.
- [10] YAVORSKI, B.M. e DETLAF, A.A. - Prontuário de Física - Editora Mir - Moscovo 1984.
- [11] VÁRIOS - Enquiry on HAMCaT Codes - Report Annex 24, Task 1, Modelling, International Energy Agency

- [12] RCCTE - Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de Fevereiro de 1990.
- [13] VÁRIOS. – Características do Comportamento Térmico dos Edifícios – Manual de apoio à aplicação do regulamento das características do comportamento térmico dos edifícios – INEGI, 1991

5.1 OUTRAS FONTES BIBLIOGRÁFICAS

- [14] FREITAS, Vasco Peixoto de – Transferts d'humidité dans les systemes d'isolation extérieure avec peau étanche en regime stationnaire – Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica – FEUP 1985
- [15] BURCH, D.M.; TSONGAS, G.A.; WALTON, G.N: - Mathematical Analysis of practices to control moisture in the roof cavities of manufactured houses, NIST 1996
- [16] BURCH, D.M.; TSONGAS, G.A.; WALTON, G.N; THORNTON, B.A.: - A computer analysis of the moisture performance of roof constructions in U.S. DOE Moisture Control Handbook – NIST 1996
- [17] BURCH, D.M; ZAR, R.R.; FANNEY, A.H.: - Experimental verification of a moisture and heat transfer model in the hygroscopic regime – Cleawater Beach 1995
- [18] BURCH, D.M.; TSONGAS, G.A.; WALTON, G.N: - An Analysis of moisture accumulation in the roof cavities of manufactured housing, NIST 1995
- [19] PAIVA, J. Vasconcelos – Compilação de dados climáticos directamente ligados aos problemas da humidade – Cap. VI do relatório “Humidade nas Edificações” – LNEC 1970
- [20] FAUCONNIER, R.; FLORENCE, B.; LAUGIER, D. – Le transfert de l'humidité dans les matériaux isolants – Etudes Thermiques et Aérauliques – Junho 1979
- [21] FEDERATION NATIONAL DU BATIMENT – Transport d'humidité isotherme dans les matériaux poreux de construction – Institut de Physic appliquée de la société Fraunhofer - 1976

- [22] UNIVERSIDADE DE KU-LEUVEN -
<http://venus.kulbet.kuleuven.ac.be/bwk/research.htm>
- [23] NIST - <http://www.bfrl.nist.gov/top/activity.html> -
- [24] LUND-GOTHENBURG GROUP FOR COMPUTATIONAL BUILDING PHYSICS
- <http://www ldc.lu.se/buildingphys/lggroup.htm>
- [25] BUILDING ENVELOPE RESEARCH - OAK RIDGE NATIONAL
LABORATORY - <http://www.ornl.gov/roofs+walls/codes>
- [26] CIB - <http://bcn.arch.ufl.edu/cib/info>
- [27] "INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER" -
<http://www.elsevier.co.jp/estoc/publications/store>
- [28] HEAT2 e HEAT3 - <http://www.blocon.se>
- [29] Compilação de dados climáticos mundiais - <http://www.worldclimate.com>
- [30] CSIRO LAND AND WATER - <http://www.clw.criro.au/research>
- [31] INSTITUTE FOR RESEARCH IN CONSTRUCTION - <http://www.nrc.ca/irc>
- [32] FACULTY OF ARCHITECTURE AND BUILDING PHYSICS – EINDHOVEN
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - <http://www.phys.tue.nl/nfcmr>
- [33] FACULTY OF ARCHITECTURE AND BUILDING PHYSICS – EINDHOVEN
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY – Progama movies -
<http://www.phys.tue.nl/nfcmr/movies>
- [34] <http://www.bwk.tue.nl/bwk>

Símbolo:

Unidade(s):

6.ANEXO A

No decurso de todo o trabalho de investigação, fomos confrontados com a dificuldade de encontrar, de uma forma acessível e concisa, os principais conceitos básicos e parâmetros de caracterização relacionados com os fenómenos de transferência de humidade, calor e ar, bem como as diferentes unidades em que geralmente são expressos. Com o tempo fomos compilando uma base de dados de trabalho, e que julgamos oportuno inserir como um apêndice, para auxiliar aqueles que se virem confrontados com as mesmas dificuldades.

O tipo de organização não pretende agrupar conceitos ou características por famílias. Achamos que seria muito mais operativo, para uma procura mais sistemática, organizar as entradas alfabeticamente.

6.1 CONCEITOS, SIMBOLOGIA E UNIDADES

➤ Absorção / Desabsorção	Retenção de um gás ou vapor por um líquido ou sólido.[8] Capacidade dos materiais porosos de fixarem humidade, por sucção capilar, quando colocados em contacto com água líquida.
➤ Aceleração da gravidade	Variação da velocidade na unidade de tempo, de um corpo deixado em queda livre sobre a terra, sem atrito. É variável consoante a latitude, longitude e altitude, isto é, com a distância ao centro da terra. Símbolo: g Unidade(s): m/s²

➤ Ângulo de humidificação	Símbolo: θ_h Unidade(s): grau
--------------------------------------	---

➤ Calor específico	Quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a temperatura da unidade de massa (1g) dessa substância.[7] É uma constante própria de cada substância, decrescendo com o aumento do peso atômico. [8] Capacidade calorífica da unidade de massa da substancia considerada. Símbolo: c Unidade(s): J/Kg.K ; Cal/g °C
---------------------------	--

➤ Calor específico do material seco	Capacidade calorífica do material seco. Símbolo: c_s Unidade(s): J/Kg.K ; Cal/g °C
--	--

➤ Calor específico equivalente	Símbolo: c^* Unidade(s): J/Kg.K ; Cal/g °C
---	---

Modo de Determinação:

$$c^* = \frac{c_s + c_w W}{1 + W}$$

c^* - calor específico equivalente - (J/Kg.K)
 c_s - calor específico do material seco - (J/Kg.K)
 c_w - calor especffico da água - (J/Kg.K)
 W - Teor de humidade ponderal - (Kg/Kg)
[1]

➤ Capacidade calorífica	Grandeza física cujo valor numérico é igual à razão entre a quantidade de calor δQ comunicado ao corpo e a variação dT da temperatura no processo termodinâmico considerado. [10]
-------------------------	---

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

➤ Capilaridade	O fenómeno da capilaridade é uma característica dos líquidos, que quando colocados em certas condições, anulam a força da gravidade, através de forças de atracção moleculares aos sólidos que lhe servem de contentores. Um líquido sobe num tubo tanto mais quanto menor diâmetro tiver o mesmo. A capilaridade resulta das forças de atracção que se desenvolvem entre um corpo no estado sólido e um líquido. A capilaridade em materiais porosos resulta do mesmo fenómeno atrás descrito, funcionando a estrutura porosa como vasos capilares.
----------------	--

➤ Coeficiente de atenuação	Símbolo: μ Unidade(s): m^2/Kg Modo de Determinação:
----------------------------	---

➤ Coeficiente de condutância térmica superficial	Fluxo de calor trocado, por unidade de tempo e unidade de superfície, para a diferença de 1°C, entre a superfície de um elemento e a ambiência que o envolve, fundamentalmente por fenómenos de convecção e radiação. Símbolo: h (he ; hi) Unidade(s): W/m².°C ; W/m² .K Valores de referencia: Interior = 9 W/m².°C Exterior = 17 W/m².°C
➤ Coeficiente de condutibilidade térmica	Quantidade de calor que atravessa um material, perpendicularmente às faces, por unidade de tempo e espessura, quando sujeita à diferença de 1°C nas suas faces. Símbolo: λ Unidade(s): W/m.°C ; W/m.K
➤ Coeficiente de difusividade hídrica	Parâmetro que liga o gradiente médio do teor de humidade ao fluxo médio de humidade, na fase líquida e fase vapor. [1] Símbolo: DW Unidade(s): m²/s
➤ Coeficiente de difusividade higrotérmica	Efeito da termomigração na transferência global de humidade. [1] Símbolo: DT Unidade(s): m²/s.K

➤ **Coefficiente de penetração da humidade**

Símbolo: B

Unidade(s): m.s^{-1/2}

Modo de Determinação:

$$X = \sqrt{\frac{\sigma.r}{2\eta}}.\sqrt{t}$$

$$B = \sqrt{\frac{\sigma.r}{2\eta}}$$

X - Posição da frente húmida - (m)

t - Tempo a partir do início da humedificação - (s)

σ - Tensão superficial da água - (N/m)

η - Coeficiente de viscosidade dinâmica - (N.S/m²)

r - raio do poro - (m)

B - Coeficiente de penetração da humidade - (m.s^{1/2})

➤ **Coefficiente de transferência superficial de humidade**

Símbolo: β

Unidade(s): m/s

➤ **Coefficiente de transmissão térmica**

Quantidade de calor que atravessa determinado elemento, perpendicularmente às suas faces, para uma diferença de temperatura de 1°C, por unidade de tempo e de superfície.

Símbolo: K

Unidade(s): W/m².°C ; W/m² .K

➤ Coefficiente de viscosidade dinâmica	Símbolo: η Unidade(s): $N.s/m^2$
➤ Concentração de humidade	Relação entre a massa de água e o volume do material seco Símbolo: C_h Unidade(s): Kg/m^3
➤ Concentração de vapor	Símbolo: C_v Unidade(s): Kg/m^3
➤ Condensação	Um dos mecanismos de fixação da humidade. A condensação, a passagem de um elemento no estado gasoso ao estado líquido dá-se por duas razões, actuando isoladamente ou em conjunto, a variação da temperatura e a variação da pressão, que fazem com que a pressão de vapor instalada seja igual ou superior à Pressão de Saturação.
➤ Condutibilidade térmica	A condutibilidade térmica dá-se sempre que exista uma diferença de temperaturas, dentro de um corpo numa direcção determinada. O movimento térmico das moléculas originará uma transferência orientada de energia sob a forma de calor. No caso de se tratar da condutibilidade térmica unidimensional, quando a temperatura do gás depende apenas de uma coordenada $T = T(x)$, a transferência de energia sob a forma de calor desenvolve-se ao longo do eixo OX, mantendo-se vigente a lei de Fourier. Símbolo: λ Unidade(s): $W/m^2.^{\circ}C$; $W/m^2 .K$ Modo de Determinação:

$$q_s = K \cdot \frac{dT}{dx}$$

q_s é o fluxo específico de calor, cujo valor numérico é igual à energia que se transfere, sob a forma de calor, na unidade de tempo através de uma superfície plana, de área igual à unidade, situada perpendicularmente à direcção de transferência de energia.

K é o coeficiente de condutibilidade térmica, e o seu valor é igual ao fluxo específico de calor com o gradiente de temperatura dT/dx igual à unidade. [10]

➤ Condutibilidade térmica aparente	A condutibilidade térmica aparente resulta da conjugação de dois fenómenos, a condução pura, e o efeito da migração de moléculas de água, em forma de vapor, fazendo o transporte de energia. A variação da condutibilidade térmica em função dos teores de humidade pode ser importante .
---	--

Símbolo: λ^*

Unidade(s): $W/m^2 \cdot ^\circ C$; $W/m^2 \cdot K$

➤ Densidade de um material, ou densidade relativa	Razão entre a massa de determinado volume de um material, em determinadas condições de temperatura e pressão, e a massa de igual volume da substancia tomada como termo de comparação - a água pura a 4°C e 1 atm. É um numero abstracto e tem o mesmo valor que o Peso Volúmico. [7] Também se chama densidade à massa específica ou à massa volúmica de uma substância. [8]
--	--

Símbolo: ρ

Unidade(s): -

Modo de Determinação: Norma DIN 51 065

➤ Difusão

O fenómeno da difusão consiste na penetração mutua e espontânea e, também, na mistura das partículas constituintes de dois gases, líquidos ou sólidos posto em contacto. Nos gases quimicamente puros, a uma temperatura de valor permanente, a difusão dá-se por causa da desigualdade da densidade em diferentes partes do volume de gás. No caso de se tratar de das misturas de gases, a difusão produz-se à custa da diferença de densidade que os gases constituintes da mistura possuem em diferentes partes do volume da mistura.

Num gás quimicamente homogéneo o fenómeno de difusão consiste na transferência duma massa de gás de densidade de valor superior para as partes onde a densidade é de valor inferior, obedecendo à lei de Fick:

$$m_s = -D \cdot \frac{d\rho}{dx}$$

m_s - Fluxo específico de massa

ρ - densidade do gás

D - Coeficiente de difusão

A derivada dp / dx tem valor numérico idêntico ao gradiente de densidade, ou seja, à variação da densidade pela unidade de comprimento. O valor numérico do coeficiente de difusão é igual ao fluxo específico de massa, sendo unitário o gradiente de densidade. O sinal menos indica que a transferência de massa se dá no sentido da diminuição de densidade.[10]

➤ Domínio Higroscópio	Entende-se por domínio higroscópico de um material, o período de fixação de humidade no interior do mesmo, sob a acção da humidade da ambiência. Pode ser dividido em três fases. - Monomolecular - uma camada de moléculas de água fixa-se no interior dos poros - Multimolecular - várias camadas de moléculas de água fixam-se no interior dos poros - Condensação capilar - com o aumento da humidade relativa, verifica-se um aumento da absorção, pois o material chupa a água até atingir o patamar de livre saturação.
➤ Entalpia	Função característica da termodinâmica que, nas transformações, a pressão P, constante, desempenha uma função análoga à energia interna U, nas transformações a volume constante, representada ordinariamente pelo símbolo H. [8] Calor Total [4] Símbolo: H Unidade(s): Modo de Determinação: $H = U + P.V$ U - Energia interna de um sistema P - Pressão V - Volume

➤ **Equação térmica de estado**

$$P = f(V,T)$$

P - Pressão
V - Volume
T - Temperatura
[10]

➤ Grau de saturação	Símbolo:	S
	Unidade(s):	%, Kg/Kg

➤ **Higrometria** Parâmetro de caracterização da ambiência interior dos edifícios, que traduz o aumento da humidade interior relativamente ao exterior, motivada pela ocupação humana dos espaços, pela produção de vapor de água e número de renovações por hora.

$$\frac{W}{n.V}$$

É possível relacionar humidade interior e exterior pela fórmula.

$$U_i = \frac{W}{n.V} \cdot \frac{R_v.T_i}{P_i} \cdot \left(U_e + \frac{R_a}{R_v} \right)$$

em que
U_i - Teor de humidade do ar interior
U_e - Teor de humidade do ar exterior
W - Produção de vapor de ar no interior

n - Taxa horária de renovação de ar

V - Volume interior

P_i - Pressão atmosférica

R_a - Constante gasosa do ar seco

R_v - Constante gasosa do vapor de água.

2

➤ **Histerese**

Fenómeno físico que consiste em os pares de valores correspondentes de duas grandezas que são função uma da outra, não se repetirem do mesmo modo quando variam num sentido ou em sentido contrario. (do grego *hystéresis*) [4]
Fenómeno que define o comportamento diferencial em embebição e secagem dos materiais, isto é, as curvas correspondentes ao teor de humidade em função da humidade relativa do ar circundante são diferentes se o material se encontra em fase de absorção de humidade ou em fase de desabsorção. Comportamento compreensível e que corresponde, por exemplo, na cinética, aos movimentos de inércia.

➤ **Humidade Absoluta**

Massa de vapor de água existente, num dado instante, em cada unidade de volume da atmosfera. [4]

Símbolo: W

Unidade(s): Kg/m³

Modo de Determinação:

$$W = \frac{m_v}{V}$$

² NIT 002 - LFC 1998 - Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção

	Em que
	Mv - massa de vapor
	V - Volume do ar húmido
➤ Humidade relativa	Razão entre a pressão de vapor no instante e a pressão de vapor de saturação. Razão entre a massa de vapor contida no ar e a quantidade de saturação. Varia com a temperatura, tal como a pressão de vapor. Símbolo: φ; HR Unidade(s): % Modo de Determinação: $\varphi = \frac{P_v}{P_s}$ Pv - Pressão de vapor no momento Ps - Pressão de saturação
➤ Massa volúmica	Quantidade de massa por unidade de volume Símbolo: ρ Unidade(s): Kg/m³
➤ Massa volúmica equivalente	Símbolo: ρ^* Unidade(s): Kg/m³ Modo de Determinação: $\rho^* = \rho_s + W\rho_s$ ρ^* - massa volúmica equivalente - (Kg/m³) ρ_s - massa volúmica seca - (Kg/m³) W - Teor de Humidade ponderal - (Kg/Kg) [1]

➤ Massa volúmica seca	Símbolo: ρ_s
	Unidade(s): Kg/m^3
	Modo de Determinação:

➤ Materiais Higroscópios	Materiais cujo teor de humidade varia em função da humidade relativa do ar circundante, isto é, cuja quantidade de humidade fixada por absorção é relativamente importante.
--------------------------	---

➤ Materiais não higroscópios	Materiais cujo teor de humidade praticamente não varia em função da humidade relativa do ar circundante, isto é, quando a massa é sensivelmente constante e independente da humidade relativa da ambiência onde se encontram.
------------------------------	---

➤ Permeabilidade ao vapor	Símbolo: π
	Unidade(s): kg/m.s.Pa ; g/m.h.mmHg

➤ Permeância	Densidade de fluxo de vapor de água, que atravessa um elemento para a diferença efectiva de pressão entre as suas faces.
	Símbolo: P
	Unidade(s): $\text{g/m}^2.\text{h.mmHg}$; $\text{Kg/m}^2.\text{s.Pa}$
	Modo de Determinação:

$$Pe = \frac{g}{\Delta P}$$

Para materiais homogêneos,

$$Pe = \frac{\pi}{e}$$

Em que π é a permeabilidade e e a espessura

➤ **Peso Volúmico**

Símbolo: P_v

Unidade(s): Kg/m^3

Modo de Determinação:

$$P_v = \frac{P}{V}$$

P - Peso - (Kg)

V - Volume - (m^3)

➤ **Porosidade**

Relação entre o volume de vazios e o volume total do sólido.

Símbolo: ε

Unidade(s): %

Modo de Determinação:

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$

ε - Porosidade - (%)

V_a - Volume da fase gasosa - (m^3)

V_w - Volume da fase líquida - (m^3)

V_s - Volume da fase sólida . (m^3)

[1]

➤ **Pressão** É a força exercida, por unidade de superfície, de um corpo no sentido a coincidir com a normal externa a tal superfície. [10]

Símbolo: P

Unidade(s): atm ; mmHg ; mb; Pa; N/m²

Modo de Determinação:

$$P = \frac{F}{S}$$

F - Força - (N)

S - Superfície - (m²)

➤ **Pressão Atmosférica** É a força exercida, por unidade de superfície, pela coluna de ar da atmosfera.

Símbolo: P

Unidade(s): atm ; mmHg ; mb

➤ **Pressão capilar** Gradiente de Pressões que se desenvolve na interface líquido - gás.

Símbolo: Pc

Unidade(s): Pa ; N/m²

Modo de Determinação:

$$Pc = \sigma . \cos \theta . (\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2})$$

Pc - Pressão Capilar (Pa)

σ - Tensão Interfacial (N/m)

R - raio capilar (m)

θ - ângulo de humedecimento (°C)

[1]

➤ Pressão de saturação	Valor limite da pressão de um líquido em fase vapor, num gás, a partir do qual se verifica a condensação do mesmo. Por definição é a pressão máxima que o vapor teria se ocupasse sozinho a totalidade do volume da massa de ar.[3] Símbolo: Ps Unidade(s): N/m² ; Pa Modo de Determinação: Regra expedita: $P_{vs} = a \cdot (b + T/100^{\circ}\text{C})^n$ T - Temperatura (°C) a,b,n - parâmetros em função da temperatura
➤ Pressão de vapor ou pressão parcial de um gás	A pressão de vapor de água no ar é definida como a pressão que esse vapor teria se ocupasse sozinho a totalidade do volume da massa de ar.[3] Símbolo: Pv Unidade(s): N/m² ; Pa
➤ Raio do poro	Símbolo: r Unidade(s): m Modo de Determinação: $r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{P}$ r - raio do Poro - (m) σ - Tensão superficial - (N/m) α - Angulo de contacto - (grau) P - Pressão - (N/m²)

➤ Resistência térmica	Resistência que um elemento oferece à passagem de calor, na perpendicular às suas faces, por unidade de tempo e superfície, para a diferença unitárias de temperatura. Inverso da transmissão térmica.
------------------------------	--

Símbolo: R_{term}

Unidade(s): $m^2 \cdot ^\circ C/W$; $m^2 \cdot K/W$

➤ Sucção capilar	Pressão capilar do material, em função do teor de humidade e temperatura
-------------------------	--

Símbolo: ψ

Unidade(s): Pa ; m H₂O; N/m²

Modo de Determinação:

$$\psi = - \frac{P_c}{\rho_w \cdot g}$$

ψ - Sucção capilar - (m H₂O)

P_c - Pressão capilar - (Pa)

ρ_w - Massa volúmica da água - (Kg/m³)

g - aceleração da gravidade - (m/s²)

[1]

$$\frac{\psi}{\sigma} = Cte$$

$$\sigma = [128 - 0.185(T + 273)] 10^{-3}$$

σ - Tensão superficial - (N/m)

T - Temperatura - (°C)

➤ Temperatura	Símbolo: T
	Unidade(s): °C ; K
➤ Tempo	Símbolo: t
	Unidade(s): s
➤ Tensão interfacial ou superficial	Símbolo: σ
	Unidade(s): N/m
	Modo de Determinação:
	$\sigma = [128 - 0.185 (T+273)].10^{-3}$
➤ Teor de humidade (mássico)	A razão entre a massa de água contida no material e a massa do mesmo material seco.
	Símbolo: W _m ; W
	Unidade(s): Kg/Kg
	Modo de Determinação:
	$W_m = \frac{m_w}{m_s}$
	Esta definição é relacionável com o teor de humidade volúmico através das densidades dos materiais envolvidos
	$W_m = \frac{\rho_w}{\rho_m} W_v$
	ρ _w - densidade da água
	ρ _m - Densidade do material seco
	Norma Din 52 620 (7)

➤ **Teor de humidade (volumico)** A razão entre o volume de água contido e o volume do material seco.

Símbolo: θ ; W_v ; W

Unidade(s): m^3/m^3

Modo de Determinação:

$$W_v = \frac{V_w}{V_s}$$

As duas definições são relacionáveis através das densidades dos materiais envolvidos

$$W_v = \frac{\rho_m}{\rho_w} W_m$$

ρ_w - densidade da água

ρ_m - Densidade do material seco

➤ **Teor de Humidade (massa por unidade de volume)** A razão entre a massa de água contida e o volume do material seco.

Símbolo: U

Unidade(s): Kg/m^3

➤ **Teor de humidade crítico** Atinge-se quando o material se encontra em contacto com uma ambiência saturada. Abaixo deste valor o transporte de água por capilaridade é praticamente impossível.³

Símbolo: W_{cr}

Unidade(s): Kg/Kg ; m^3/m^3

³ NIT 002

➤ Teor de Humidade higroscópico	Teor de humidade higroscópico (W_h) - Varia entre zero e o teor de humidade crítico (W_{cr}). Obtém-se quando o material se encontra em ambiente com humidade variável, mas sem contacto com água líquida, após ser atingido o equilíbrio para determinada humidade relativa. Símbolo: W_h Unidade(s): Kg/Kg ; m³/m³
➤ Teor de humidade livre	Obtém-se quando se mergulha o material, por um período determinado, em água líquida Símbolo: W_l Unidade(s): Kg/Kg ; m³/m³
➤ Teor de Humidade máxima	Símbolo: W_{max} Unidade(s): Kg/Kg ; m³/m³
➤ Teor de Humidade saturação	Humidade de saturação (W_{sat}) - Teor de humidade atingido quando toda a estrutura porosa do material está cheia de água. Símbolo: W_{sat} Unidade(s): Kg/Kg; m³/m³
➤ Volume	Símbolo: V Unidade(s): m³

-
- **Volume específico** É a grandeza cujo valor numérico é inversamente proporcional à densidade do corpo considerado. Para um corpo homogêneo o volume específico é igual ao volume do corpo, cuja massa é igual à unidade. [10]

Símbolo: v

Unidade(s): m^3

Modo de Determinação:

$$V = 1/\rho$$

-
- **Volume fase gasosa** **Símbolo:** V_a

Unidade(s): m^3

6.2 CONVERSÕES DE UNIDADES

O ramo científico do estudo das transferências conjuntas de calor e umidade, ainda não se encontra completamente instituído, com o estabelecimento formal de um corpo de saber. Ainda está dividido em vários núcleos, cada um funcionando autonomamente, com recurso, por exemplo, a sistemas de unidades diferentes, o que pode dificultar um pouco a comparação entre os diversos modelos. Com o intuito de facilitar uma rápida comparação entre resultados, resolvemos elaborar uma tabela de conversão de unidades. Esta tabela deu origem a um pequeno programa de computador, um utilitário para Windows 95, que nos faz a conversão entre diversas unidades de grandezas físicas.

Unidades de Pressão

Descrição:

Atm - atmosfera

mmHg - mm de Mercúrio

mb - milibar

Pa - Pascal

Bar - Bar

m H₂O - metros de coluna de água**Conversão:**

$$1 \text{ mH}_2\text{O} = 9.806 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1013.25 \text{ mb}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1.33322 \text{ mb} = 1.333 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mb} = 100 \text{ Pa} = 100 \text{ N/m}^2 = 0.75 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ bar}$$

Unidades de Energia

Descrição:

Cal - calorias

J - Joules

Conversão:

Unidades de Temperatura

Descrição:

°C (t) - grau centígrado ou celsius

K (T)- grau Kelvin - escala termodinâmica de temperaturas

Conversão:

$$T = 273.15 + t$$

7. ANEXO B - LISTAGEM PARCIAL DO PROGRAMA

O programa Trhum 98 é bastante extenso, pelo que optamos por unicamente fazer a listagem de dois dos módulos, onde estão definidas as funções mais importantes.

```
Attribute VB_Name = "globaledit"

Option Explicit
'*****
' User-defined type to store information about child forms
Type FormState
    Deleted As Integer
    Dirty As Integer
    Color As Long
End Type

Public FState As FormState           ' Array of user-defined types
Public gFindString As String         ' Holds the search text.
Public gFindCase As Integer          ' Key for case sensitive search
Public gFindDirection As Integer     ' Key for search direction.
Public gCurPos As Integer            ' Holds the cursor location.
Public gFirstTime As Integer         ' Key for start position.
Public Const ThisApp = "MDINote"    ' Registry App constant.
Public Const ThisKey = "Recent Files" ' Registry Key constant.

'*****
'edit functions
'*****
'*****

Sub EditCopyProc()
    ' Copy the selected text onto the Clipboard.
    Clipboard.SetText frmmainn.txtNote.SelText
End Sub
'*****

Sub EditCutProc()
    ' Copy the selected text onto the Clipboard.
    Clipboard.SetText frmmainn.txtNote.SelText
    ' Delete the selected text.
    frmmainn.txtNote.SelText = ""
End Sub
'*****

Sub EditPasteProc()
    ' Place the text from the Clipboard into the active control.
    frmmainn.txtNote.SelText = Clipboard.GetText()
End Sub
'*****

Sub FindIt()
    Dim intStart As Integer
    Dim intPos As Integer
    Dim strFindString As String
    Dim strSourceString As String
    Dim strMsg As String
```

```

Dim intResponse As Integer
Dim intOffset As Integer

' Set offset variable based on cursor position.
If (gCurPos = frmmainn.txtNote.SelStart) Then
    intOffset = 1
Else
    intOffset = 0
End If

' Read the public variable for start position.
If gFirstTime Then intOffset = 0
' Assign a value to the start value.
intStart = frmmainn.txtNote.SelStart + intOffset

' If not case sensitive, convert the string to upper case
If gFindCase Then
    strFindString = gFindString
    strSourceString = frmmainn.txtNote.Text
Else
    strFindString = UCase(gFindString)
    strSourceString = UCase(frmmainn.txtNote.Text)
End If

' Search for the string.
If gFindDirection = 1 Then
    intPos = InStr(intStart + 1, strSourceString, strFindString)
Else
    For intPos = intStart - 1 To 0 Step -1
        If intPos = 0 Then Exit For
        If Mid(strSourceString, intPos, Len(strFindString)) =
strFindString Then Exit For
    Next
End If

' If the string is found...
If intPos Then
    frmmainn.txtNote.SelStart = intPos - 1
    frmmainn.txtNote.SelLength = Len(strFindString)
Else
    strMsg = "Cannot find " & Chr(34) & gFindString & Chr(34)
    intResponse = MsgBox(strMsg, 0, App.Title)
End If

' Reset the public variables
gCurPos = frmmainn.txtNote.SelStart
gFirstTime = False
End Sub
' *****
Sub ResizeNote()
' Expand text box to fill the form's internal area.
If frmmainn.picToolbar.Visible Then
    frmmainn.txtNote.Height = frmmainn.ScaleHeight -
frmmainn.picToolbar.Height
    frmmainn.txtNote.Width = frmmainn.ScaleWidth
    frmmainn.txtNote.Top = frmmainn.picToolbar.Height
Else
    frmmainn.txtNote.Height = frmmainn.ScaleHeight

```

```

        frmmainn.txtNote.Width = frmmainn.ScaleWidth
        frmmainn.txtNote.Top = 0
    End If
End Sub

'file Functions
'*****

Sub FileNew()
    Dim intResponse As Integer

    ' If the file has changed, save it
    If FState.Dirty = True Then
        intResponse = FileSave
        If intResponse = False Then Exit Sub
    End If
    ' Clear the textbox and update the caption.
    frmmainn.txtNote.Text = ""
    frmmainn.Caption = "TRHum.98 - Untitled"
End Sub
'*****

Function FileSave() As Integer
    Dim strFilename As String

    If frmmainn.Caption = "TRHum.98 - Untitled" Then
        ' The file hasn't been saved yet.
        ' Get the filename, and then call the save procedure, GetFileName.
        strFilename = GetFileName(strFilename)
    Else
        ' The form's Caption contains the name of the open file.
        strFilename = Right(frmmainn.Caption, Len(frmmainn.Caption) - 14)
    End If
    ' Call the save procedure. If Filename = Empty, then
    ' the user chose Cancel in the Save As dialog box; otherwise,
    ' save the file.
    If strFilename <> "" Then
        SaveFileAs strFilename
        FileSave = True
    Else
        FileSave = False
    End If
End Function
'*****

Sub FileOpenProc()
    Dim intRetVal
    Dim intResponse As Integer
    Dim strOpenFileName As String

    'prompts for saving the file with a m-box

    ' If the file has changed, save it
    If FState.Dirty = True Then
        intResponse = FileSave
        If intResponse = False Then Exit Sub
    End If

```

```

On Error Resume Next

frmmainn.CMDialog1.FileName = ""
frmmainn.CMDialog1.ShowOpen
If Err <> 32755 Then ' User chose Cancel.
    strOpenFileName = frmmainn.CMDialog1.FileName
    ' If the file is larger than 65K, it can't
    ' be opened, so cancel the operation.
    If FileLen(strOpenFileName) > 65000 Then
        MsgBox "The file is too large to open."
        Exit Sub
    End If

    OpenFile (strOpenFileName)
    UpdateFileMenu (strOpenFileName)
End If
End Sub
'*****
Function GetFileName(FileName As Variant)
    ' Display a Save As dialog box and return a filename.
    ' If the user chooses Cancel, return an empty string.
    On Error Resume Next
    frmmainn.CMDialog1.FileName = FileName
    frmmainn.CMDialog1.ShowSave
    If Err <> 32755 Then ' User chose Cancel.
        GetFileName = frmmainn.CMDialog1.FileName
    Else
        GetFileName = ""
    End If
End Function
'*****
Sub OpenFile(FileName)
    Dim fIndex As Integer

    On Error Resume Next
    ' Open the selected file.
    Open FileName For Input As #1
    If Err Then
        MsgBox "Can't open file: " + FileName
        Exit Sub
    End If
    ' Change the mouse pointer to an hourglass.
    Screen.MousePointer = 11

    ' Change the form's caption and display the new text.
    frmmainn.Caption = "TRHum.98 - " & UCase(FileName)

    '   frmmainn.txtNote.Text = Input(LOF(1), 1)

    FState.Dirty = False
    Close #1
    ' Reset the mouse pointer.
    Screen.MousePointer = 0
End Sub
'*****
Sub SaveFileAs(FileName)
    On Error Resume Next

```



```

Dim strContents As String

' Open the file.
Open Filename For Output As #1
' Place the contents of the notepad into a variable.
strContents = frmmainn.txtNote.Text
' Display the hourglass mouse pointer.
Screen.MousePointer = 11

' Write the variable contents to a saved file.

Close #1
' Reset the mouse pointer.
Screen.MousePointer = 0
' Set the form's caption.
If Err Then
    MsgBox Error, 48, App.Title
Else
    frmmainn.Caption = "TRHum.98 - " & Filename
    ' Reset the dirty flag.
    FState.Dirty = False
End If
End Sub

' *****
Sub GetRecentFiles()
' This procedure demonstrates the use of the GetAllSettings function,
' which returns an array of values from the Windows registry. In this
' case, the registry contains the files most recently opened. Use the
' SaveSetting statement to write the names of the most recent files.
' That statement is used in the WriteRecentFiles procedure.
Dim i As Integer
Dim varFiles As Variant ' Variable to store the returned array.

' Get recent files from the registry using the GetAllSettings
statement.
' ThisApp and ThisKey are constants defined in this module.
If GetSetting(ThisApp, ThisKey, "RecentFile1") = Empty Then Exit Sub

varFiles = GetAllSettings(ThisApp, ThisKey)

For i = 0 To UBound(varFiles, 1)
    frmmainn.mnuRecentFile(0).Visible = True
    frmmainn.mnuRecentFile(i + 1).Caption = varFiles(i, 1)
    frmmainn.mnuRecentFile(i + 1).Visible = True
Next i
End Sub

' *****
Sub WriteRecentFiles(OpenFileName)
' This procedure uses the SaveSettings statement to write the names of
' recently opened files to the System registry. The SaveSetting
' statement requires three parameters. Two of the parameters are
' stored as constants and are defined in this module. The
GetAllSettings
' function is used in the GetRecentFiles procedure to retrieve the
' file names stored in this procedure.

Dim i As Integer

```

```

Dim strFile As String
Dim strKey As String

' Copy RecentFile1 to RecentFile2, and so on.
For i = 3 To 1 Step -1
    strKey = "RecentFile" & i
    strFile = GetSetting(ThisApp, ThisKey, strKey)
    If strFile <> "" Then
        strKey = "RecentFile" & (i + 1)
        SaveSetting ThisApp, ThisKey, strKey, strFile
    End If
Next i

OnRecentFilesList (Filename)

' Write the open file to first recent file.
SaveSetting ThisApp, ThisKey, "RecentFile1", OpenFileName
End Sub
'*****
Function OnRecentFilesList(Filename) As Integer
    Dim i          ' Counter variable.

    For i = 1 To 4
        If frmmainnn.mnuRecentFile(i).Caption = Filename Then
            OnRecentFilesList = True
            Exit Function
        End If
    Next i
    OnRecentFilesList = False
End Function
'*****

Sub UpdateFileMenu(Filename)
    Dim intRetVal As Integer
    ' Check if the open filename is already in the File menu control
    array.
    intRetVal = OnRecentFilesList(Filename)
    If Not intRetVal Then
        ' Write open filename to the registry.
        WriteRecentFiles (Filename)
    End If
    ' Update the list of the most recently opened files in the File
    menu control array.
    GetRecentFiles
End Sub

'*****
'
'          WORKING FUNCTIONS
'*****

'*****
'
'          Function CleanValues()
'*****

'*****
'Sets all Variables to 0
'*****

```

```

'time variables
'-----
TotalTime = 0 'Project Total Time
DateS = 0     'Date Start
DateF = 0     'Date Finish
YearsS = 0    'Starting Year
DaysS = 0     'Starting Day of the Year
HoursS = 0    'Starting Hour
TotalWeather = 0 'Total time of the Weather File
TotalSteps = 0 'Number of Time Intervals

'weather variables
'-----
N = 0          'number of steps in weather file

Dim aux1 As Integer
For aux1 = 1 To 1000

    number(aux1) = 0
    Rain(aux1) = 0      'Weather rain yes or no
    TempIn(aux1) = 0    'indoor temperature
    TempOut(aux1) = 0   'outdoor temperature
    RHIn(aux1) = 0      'indoor relative humidity
    RHOut(aux1) = 0     'outdoor relative humidity
    Rad(aux1) = 0       'radiation
    TimeStep(aux1) = 0  'time step in hours

Next aux1

'initial conditions variables
'-----
HE = 0          'outdoor heat resistance
HI = 0          'indoor heat resistance
BetaI = 0       'indoor moisture resistance
BetaE = 0       'outdoor moisture resistance
ErrorMax = 0    'maximum error
Latitude = 0
Longitude = 0
NorS = 0        'latitude North or South
EorW = 0        'longitude east or west
WindDirection = 0
WindSpeed = 0
Azimut = 0
City = "Porto"
Country = "PORTUGAL"

'initial Profiles variables
'-----

TempStart(1) = 0    'initial Temperature
TempStart(2) = 0    'initial Temperature
TempStart(3) = 0    'initial Temperature
RHStart(1) = 0      'initial relative humidity
RHStart(2) = 0      'initial relative humidity
RHStart(3) = 0      'initial relative humidity

'object definition variables

```

```

'-----
ObjName = ""
ObjDescription = ""
ObjNotes = ""

NumberOfLayers = 1 ' total number of layers
LayerNumber(1) = 0 ' presente layer number
Tickness(1) = 1 ' tickness os presente layer
SStep(1) = 1 ' number of steps in present layer
dx(1) = 1 ' dx used in present layer
LayerNumber(2) = 2 ' presente layer number
Tickness(2) = 1 ' tickness os presente layer
SStep(2) = 1 ' number of steps in present layer
dx(2) = 1 ' dx used in present layer
LayerNumber(3) = 3 ' presente layer number
Tickness(3) = 1 ' tickness os presente layer
SStep(3) = 1 ' number of steps in present layer
dx(3) = 1 ' dx used in present layer

MaterialName = "" ' material name of present layer
materialcode = 0 'code for identify the material
ttickness = 0 'material total tickness

'material data bank variables
'-----

DT = 0
DW = 0

'project variables
'-----

End Function

*****
Function Change()
*****
'changes Variables (to Test)
*****
'time variables
'-----

TotalTime = 20 'Project Total Time
DateS = 2 - 2 - 98 'Date Start
DateF = 22 - 2 - 98 'Date Finish
YearS = 0 'Starting Year
DayS = 0 'Starting Day of the Year
HourS = 0 'Starting Hour
TotalWeather = 0 'Total time of the Weather File
TotalSteps = 0 'Number of Time Intervals

'weather variables
'-----
N = 0 'number of steps in weather file

Dim aux1 As Integer

```

```

For aux1 = 1 To 1000

    number(aux1) = 1
    Rain(aux1) = 1      'Weather rain yes or no
    TempIn(aux1) = 20   'indoor temperature
    TempOut(aux1) = 10  'outdoor temperature
    RHIn(aux1) = 50     'indoor relative humidity
    RHOut(aux1) = 60    'outdoor relative humidity
    Rad(aux1) = 0       'radiation
    TimeStep(aux1) = 1  'time step in hours

Next aux1

'initial conditions variables
'-----
HE = 2      'outdoor heat resistance
HI = 1      'indoor heat resistance
BetaI = 3   'indoor moisture resistance
BetaE = 2   'outdoor moisture resistance
ErrorMax = 0 'maximum error
Latitude = 0
Longitude = 0
NorS = 0    'latitude North or South
EorW = 0    'longitude east or west
WindDirection = 0
WindSpeed = 0
Azimut = 0
City = "Porto"
Country = "PORTUGAL"

'initial Profiles variables
'-----

TempStart(1) = 0      'initial Temperature
TempStart(2) = 0      'initial Temperature
TempStart(3) = 0      'initial Temperature
RHStart(1) = 0        'initial relative humidity
RHStart(2) = 0        'initial relative humidity
RHStart(3) = 0        'initial relative humidity

'object definition variables
'-----
ObjName = "testel"
ObjDescription = "isto é um teste"
ObjNotes = "vamos ver se funciona"

NumberOfLayers = 3    ' total number of layers
LayerNumber(1) = 1    ' presente layer number
Tickness(1) = 10      ' tickness os presente layer
SStep(1) = 5          ' number of steps in present layer
dx(1) = 2             ' dx used in present layer
LayerNumber(2) = 2    ' presente layer number
Tickness(2) = 1       ' tickness os presente layer
SStep(2) = 1          ' number of steps in present layer
dx(2) = 1             ' dx used in present layer
LayerNumber(3) = 3    ' presente layer number
Tickness(3) = 5       ' tickness os presente layer

```

```

SStep(3) = 5          ' number of steps in present layer
dx(3) = 1             ' dx used in present layer

MaterialName = "teste" ' material name of present layer
materialcode = 0 'code for identify the material
ttickness = 0         'material total tickness

'material data bank variables
' -----

DT = 0
DW = 0

'project variables
' -----

End Function

*****
                Function Open_File()
*****

Open "filename.hum" For Input As #1

'project definitions variables
' -----

Dim offset(500) As Long

i = 1
Do
    offset(i) = Seek(1)
    Print offset(i)
    Line Input #1, a$
    i = i + 1
Loop Until EOF(1)
offset(0) = i - 1

For i = 1 To offset(0)
    Seek #1, offset(i)
    Line Input #1, a$
Next

For i = offset(0) To 1 Step -1
    Seek #1, offset(i)
    Line Input #1, a$
Next

Seek #1, offset(2)
    Line Input #1, ObjName

Seek #1, offset(4)
    Line Input #1, ObjDescription

Seek #1, offset(6)
    Line Input #1, ObjNotes

```

```
Seek #1, offset(8)
    Line Input #1, MaterialName

Seek #1, offset(10)
    Line Input #1, a$
    materialcode = Val(a$)

Seek #1, offset(12)
    Line Input #1, a$
    ttickness = Val(a$)

Seek #1, offset(14)
    Line Input #1, a$
    NumberOFLayers = Val(a$)

Seek #1, offset(16)
    Line Input #1, a$
    LayerNumber(1) = Val(a$)

Seek #1, offset(18)
    Line Input #1, a$
    Tickness(1) = Val(a$)

Seek #1, offset(20)
    Line Input #1, a$
    SStep(1) = Val(a$)

Seek #1, offset(22)
    Line Input #1, a$
    dx(1) = Val(a$)

Seek #1, offset(24)
    Line Input #1, a$
    LayerNumber(2) = Val(a$)

Seek #1, offset(26)
    Line Input #1, a$
    LayerNumber(1) = Val(a$)

Seek #1, offset(28)
    Line Input #1, a$
    SStep(2) = Val(a$)

Seek #1, offset(30)
    Line Input #1, a$
    dx(2) = Val(a$)

Seek #1, offset(32)
    Line Input #1, a$
    LayerNumber(3) = Val(a$)

Seek #1, offset(34)
    Line Input #1, a$
    Tickness(3) = Val(a$)

Seek #1, offset(36)
    Line Input #1, a$
    SStep(3) = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(38)
    Line Input #1, a$
    dx(3) = Val(a$)
```

```
'time variables
```

```
-----
Seek #1, offset(40)
    Line Input #1, a$
    datas = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(42)
    Line Input #1, a$
    dataf = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(44)
    Line Input #1, a$
    YearS = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(46)
    Line Input #1, a$
    DayS = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(48)
    Line Input #1, a$
    HourS = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(50)
    Line Input #1, a$
    TotalWeather = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(52)
    Line Input #1, a$
    TotalSteps = Val(a$)
```

```
'Initial conditions variables
```

```
-----
Seek #1, offset(54)
    Line Input #1, a$
    HI = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(56)
    Line Input #1, a$
    HE = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(58)
    Line Input #1, a$
    BetaI = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(60)
    Line Input #1, a$
    BetaE = Val(a$)
```

```
Seek #1, offset(62)
    Line Input #1, a$
    ErrorMax = Val(a$)
```

```

Seek #1, offset(64)
    Line Input #1, a$
    City = a$

Seek #1, offset(66)
    Line Input #1, a$
    Country = a$

Seek #1, offset(68)
    Line Input #1, a$
    TotalSteps = Val(a$)

Seek #1, offset(70)
    Line Input #1, a$
    NorS = Val(a$)

Seek #1, offset(72)
    Line Input #1, a$
    Longitude = Val(a$)

Seek #1, offset(74)
    Line Input #1, a$
    EorW = Val(a$)

Seek #1, offset(76)
    Line Input #1, a$
    WindDirection = Val(a$)

Seek #1, offset(78)
    Line Input #1, a$
    WindSpeed = Val(a$)

Seek #1, offset(80)
    Line Input #1, a$
    Azimut = Val(a$)

'initial profiles
'-----

Seek #1, offset(82)
    Line Input #1, a$
'-----
    Fields$ = a$
    Dim extract(20, 2) As Integer

    For i = 1 To Len(Fields$)
        If Mid$(Fields$, i, 1) = "," Then Mid$(Fields$, i, 1) = "."
    Next
    ps = 1
    f = 0
    extract(1, 1) = 1
    Do
        f = f + 1
        extract(f, 1) = ps
        ps = InStr(ps, Fields$, ";")
        extract(f, 2) = ps - extract(f, 1)
        ps = ps + 1
    Loop While ps <> 1

```

```

        extract(f, 2) = Len(Fields$) + 1 - extract(f, 1)
        nfields = f

        For i = 1 To nfields
            TempStart(i) = Val(Mid$(Fields$, extract(i, 1), extract(i, 2)))
        Next
'-----

Seek #1, offset(84)
    Line Input #1, a$
'-----
    Fields$ = a$

    For i = 1 To Len(Fields$)
        If Mid$(Fields$, i, 1) = "," Then Mid$(Fields$, i, 1) = "."
    Next
    ps = 1
    f = 0
    extract(1, 1) = 1
    Do
        f = f + 1
        extract(f, 1) = ps
        ps = InStr(ps, Fields$, ";")
        extract(f, 2) = ps - extract(f, 1)
        ps = ps + 1
    Loop While ps <> 1
    extract(f, 2) = Len(Fields$) + 1 - extract(f, 1)
    nfields = f

    For i = 1 To nfields
        RHStart(i) = Val(Mid$(Fields$, extract(i, 1), extract(i, 2)))
    Next
'-----

Close #1

End Function

'*****
'               Sub save_file()
'*****

'SHELL "new Filename.hum"
'SHELL "del filename.bak"
'NAME "filename.hum" AS "filename.bak"

Open "filename.hum" For Output As #1

'project definitions variables
'-----
Print #1, "Project Name"
Print #1, ObjName
Print #1, "Project Description"
Print #1, ObjDescription
Print #1, "Project Notes"

```

```
Print #1, ObjNotes
Print #1, "Material Name"
Print #1, MaterialName
Print #1, "Material Code"
Print #1, materialcode
Print #1, "Total Tickness"
Print #1, ttickness
Print #1, "Number of Layers"
Print #1, NumberOFLayers
Print #1, "Layer Number 1"
Print #1, LayerNumber(1)
Print #1, "Tickness layer 1"
Print #1, Tickness(1)
Print #1, "Number of Steps layer 1"
Print #1, SStep(1)
Print #1, "Delta x Layer 1"
Print #1, dx(1)
Print #1, "Layer Number 2"
Print #1, LayerNumber(2)
Print #1, "Tickness layer 2"
Print #1, Tickness(2)
Print #1, "Number of Steps layer 2"
Print #1, SStep(2)
Print #1, "Delta x Layer 2"
Print #1, dx(2)
Print #1, "Layer Number 3"
Print #1, LayerNumber(3)
Print #1, "Tickness layer 3"
Print #1, Tickness(3)
Print #1, "Number of Steps layer 3"
Print #1, SStep(3)
Print #1, "Delta x Layer 3"
Print #1, dx(2)
```

'time variables

```
-----
Print #1, "Project start "
Print #1, datas
Print #1, "Project Finish"
Print #1, dataf
Print #1, "Starting Year"
Print #1, Years
Print #1, "Day of the Year"
Print #1, Days
Print #1, "Hour of the day"
Print #1, Hours
Print #1, "Total Calculation Time"
Print #1, TotalWeather
Print #1, "Number of time intervals"
Print #1, TotalSteps
```

'Initial conditions variables

```
-----
Print #1, "Indoor heat resistance"
Print #1, HI
Print #1, "outdoor heat resistance"
Print #1, HE
```

```

Print #1, "Indoor moisture resistance"
Print #1, BetaI
Print #1, "outdoor moisture resistance"
Print #1, BetaE
Print #1, "Maximum error"
Print #1, ErrorMax
Print #1, "City"
Print #1, City
Print #1, "country"
Print #1, contry
Print #1, "latitude"
Print #1, Latitude
Print #1, "North or South"
Print #1, NorS
Print #1, "longitude"
Print #1, Longitude
Print #1, "East or West"
Print #1, EorW
Print #1, "wind direction"
Print #1, WindDirection
Print #1, "wind speed"
Print #1, WindSpeed
Print #1, "Azimut of the perpendicular plane to the surface"
Print #1, Azimut

```

```
'initial profiles
```

```

'-----
Print #1, "Initial Profile of temperature"
Print #1, TempStart(1); ";"; TempStart(2); ";"; TempStart(3)
Print #1, "Initial profile of moisture"
Print #1, RHStart(1); ";"; RHStart(2); ";"; RHStart(3)

```

```
Close #1
```

```
End Function
```

```

'*****
'*****
Attribute VB_Name = "functions"
Public fMainForm As frmMain

```

```

'*****
'modulo de funções de cálculo
'*****

```

```

'*****
Sub Main()
    frmSplash.Show
    frmSplash.Refresh
    Set fMainForm = New frmmainn
    Load fMainForm
    Unload frmSplash
    fMainForm.Show
End Sub

```

```

'*****
Static Function Log10(x)
    Log10 = Log(x) / Log(10#)

```

```

End Function
'*****
Static Function PSATURA(Temp)

'-----
'CÁLCULO DA PRESSAO SE SATURACAO A PARTIR DA TEMPERATURA
'PRESSAO=Kg/m3
'-----

Dim aux
Dim aux1
Dim ak
Dim akk

TT = 273.16

If Temp < 0 Then
    ak = -9.09685 * (TT / (TT + Temp) - 1) - 3.56654 * Log10(TT / (TT +
Temp)) + 0.87682 * (1 - (TT + Temp) / TT) + 0.78614
    PVS = (10 ^ ak * 100) / (461.5 * (Temp + 273))
ElseIf Temp > 0 Then
    aux = Log10((TT + Temp) / TT)
    aux1 = (1 - TT / (TT + Temp))
    akk = 10.79574 * aux1 - 5.028 * aux + 1.50475 * (10 ^ (-4)) * (1 - 10
^ (-8.2969 * ((TT + Temp) / TT - 1))) + 0.42873 * (10 ^ (-3)) * (10 ^
(4.76955 * aux1) - 1) + 0.78614
    PVS = (10 ^ akk * 100) / (461.5 * (Temp + 273))
Else
    PVS = (10 ^ 0.78614 * 100) / (461.5 * (Temp + 273))
End If

PSATURA = PVS

End Function

'*****
Static Function cv_Atm_mmHg(invalue)
    cv_Atm_mmHg = invalue * 760
End Function
'*****
Static Function cv_Atm_mb(invalue)
    cv_Atm_mb = invalue * 1013.25
End Function
'*****
Static Function cv_Atm_PA(invalue)
    cv_Atm_PA = invalue * 101325
End Function
'*****
Static Function cv_Atm_mH2o(invalue)
    cv_Atm_mH2o = invalue * 101325 / 9806
End Function
'*****
Static Function cv_Atm_nm2(invalue)
    cv_Atm_nm2 = invalue * 101325
End Function
'*****
Static Function cv_Atm_bar(invalue)

```

```

    cv_Atm_bar = invalue * 1.01325
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_pa(invalue)
    cv_mmhg_pa = invalue * 1.333 * 10 ^ (-2)
End Function
'*****
Static Function cv_mb_pa(invalue)
    cv_mb_pa = invalue * 100
End Function
'*****
Static Function cv_mb_bar(invalue)
    cv_mb_bar = invalue * 10 ^ (-3)
End Function
'*****
Static Function cv_mb_mh2o(invalue)
    cv_mb_mh2o = invalue * 100 / 9806
End Function
'*****
Static Function cv_bar_pa(invalue)
    cv_bar_pa = invalue * 10 ^ 5
End Function
'*****
Static Function cv_bar_mb(invalue)
    cv_bar_mb = invalue * 10 ^ 3
End Function
'*****
Static Function cv_bar_atm(invalue)
    cv_bar_atm = invalue * (10 ^ 5) / 101325
End Function
'*****
Static Function cv_bar_mh2o(invalue)
    cv_bar_mh2o = invalue * (10 ^ 5) / 9806
End Function
'*****
Static Function cv_bar_nm2(invalue)
    cv_bar_nm2 = invalue * 10 ^ 5
End Function
'*****
Static Function cv_bar_mmhg(invalue)
    cv_bar_mmhg = invalue * (10 ^ 2) / 1.333 * 9806
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_pa(invalue)
    cv_nm2_pa = invalue
End Function
'*****
Static Function cv_pa_atm(invalue)
    cv_pa_atm = invalue * 1 / 101325
End Function
'*****
Static Function cv_pa_mmhg(invalue)
    cv_pa_mmhg = invalue * 10 ^ 2 / 1.333
End Function
'*****
Static Function cv_pa_mb(invalue)
    cv_pa_mb = invalue * 0.01
End Function

```

```

'*****
Static Function cv_pa_bar(invalue)
    cv_pa_bar = invalue * 10 ^ (-5)
End Function
'*****
Static Function cv_pa_mh2o(invalue)
    cv_pa_mh2o = invalue * (1 / 9806)
End Function
'*****
Static Function cv_pa_nm2(invalue)
    cv_pa_nm2 = invalue
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_pa(invalue)
    cv_mh2o_pa = invalue * 9806
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_atm(invalue)
    cv_mh2o_atm = invalue * 9806 / 101325
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_mb(invalue)
    cv_mh2o_mb = invalue * 9806 * 100
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_mmhg(invalue)
    cv_mh2o_mmhg = invalue * (9806 * 10 ^ 2) / 1.333
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_nm2(invalue)
    cv_mh2o_nm2 = invalue * 9806
End Function
'*****
Static Function cv_mh2o_bar(invalue)
    cv_mh2o_bar = invalue * 9806 * 10 ^ 5
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_atm(invalue)
    cv_mmhg_atm = invalue * 1 / 760
End Function
'*****
Static Function cv_mb_atm(invalue)
    cv_mb_atm = invalue * 1 / 1013.25
End Function
'*****
Static Function cv_mb_mmhg(invalue)
    cv_mb_mmhg = invalue * 1 / 1.33322
End Function
'*****
Static Function cv_mb_nm2(invalue)
    cv_mb_nm2 = invalue * 100
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_mb(invalue)
    cv_mmhg_mb = invalue * 1.33322
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_bar(invalue)

```

```

    cv_mmhg_bar = invalúe * 1.33322 * 10 ^ 3
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_nm2(invalúe)
    cv_mmhg_nm2 = invalúe * 1.33322 * 10 ^ (-2)
End Function
'*****
Static Function cv_mmhg_mh2o(invalúe)
    cv_mmhg_mh2o = invalúe * 1.33322 / 9806 * 10 ^ 2
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_atm(invalúe)
    cv_nm2_atm = invalúe * 1 / 101325
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_mmhg(invalúe)
    cv_nm2_mmhg = invalúe * 10 ^ 2 / 1.333
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_mb(invalúe)
    cv_nm2_mb = invalúe * 0.01
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_bar(invalúe)
    cv_nm2_bar = invalúe * 10 ^ (-5)
End Function
'*****
Static Function cv_nm2_mh2o(invalúe)
    cv_nm2_mh2o = invalúe * (1 / 9806)
End Function
'*****
Static Function SOL(T_EXT, RADH, V, XLA, XLO, LMESI, RHORAI, ALPHM, LDIAI,
RTEMPO, AZM, DIR_)

'-----
'A SUBROUTINA SOL PERMITE CALCULAR TSOL
'TSOL= TEMPERATURA FICTICIA AR SOL DE UMA PAREDE VERTICAL
'-----
'Variable declarations
'-----

Dim sc
Dim rdc
Dim pi
Dim rtq
Dim lu
Dim rhora
Dim ldia
Dim i
Dim sig
Dim tamb
Dim decl
Dim ecc
Dim dstar
Dim et
Dim tandec
Dim tanlat
Dim hrang
Dim x1

```

```

Dim wsmax
Dim costz
Dim ho
Dim xkt
Dim hd
Dim hb
Dim x
Dim vl
Dim ctc
Dim azml
Dim rd
Dim rr
Dim rb
Dim costt
Dim htt
'-----
      sc = 1353
      rdc = 0.0174533
      pi = 3.1415927
'nota - cálculos de tempo
'      rtq = (RHORAI + RTEMPO) / 24
'      If (rtq <= 1) Then
'          lu = 0
'      End If
'      For i = 1 To 365
'          If (rtq >= i And rtq < i + 1) Then
'              lu = i
'          End If
'      Next i
'      ldia = LDIAI + LMESI * 30 - 30 + lu
'
'      If (ldia > 365) Then
'          ldia = ldia - 365
'      End If
'      rhora = (rtq - lu) * 24
' nota - fim dos cálculos de tempo
      sig = 0.000000056698
      tamb = T_EXT + 273.16
'nota- entrada do dia
      decl = 23.45 * Sin((284 + ldia) / 365 * 2 * pi)
      ecc = 1 + 0.033 * Cos(2 * pi * ldia / 365)
      dstar = (2 * pi) / 365.242 * (ldia - 1)
      et = -(0.1236 * Sin(dstar) - 0.004289 * Cos(dstar) + 0.1539 *
Sin(2 * dstar) + 0.06078 * Cos(2 * dstar))
      tandec = Sin(decl * rdc) / Cos(decl * rdc)
      tanlat = Sin(XLA * rdc) / Cos(XLA * rdc)
'nota- entrada da hora
      hrang = (12 - rhora + et - (XLO / 15)) * 15 * rdc
      x1 = -tandec * tanlat
      wsmax = Atn(Abs(Sqr(1 - (x1 * x1)) / x1)) - 7.5 * rdc
      If (Abs(hrang) > wsmax) Then
          hrang = Sgn(wsmax)
      End If

```

```

costz = Cos(XLA * rdc) * Cos(decl * rdc) * Cos(hrang) + Sin(XLA *
rdc) * Sin(decl * rdc)

If (costz > 0) Then
    ho = sc * ecc * costz
    xkt = RADH / ho
    hd = RADH * (1.0045 + 2.6313 * xkt ^ 3 - 3.5227 * xkt ^ 2
+ 0.04349 * xkt)
    If (hd <= 0) Then
        hd = 0
    End If
    hb = RADH - hd
'-----
'CÁLCULO DE TSOL SOBRE SUPERFICIES VERTICAIS-PAREDES
'-----
    x = Abs(DIR_ - AZM)
    If (x >= 90 Or x <= 270) Then
        v1 = 0.3 * 0.05 * V
    ElseIf (x < 90 Or x > 270) Then
        v1 = 0.25 * V
        If (v1 < 0.5) Then
            v1 = 0.5
        End If
    End If
    ctc = 11.4 + 4.2 * v1
    azml = AZM
    azml = 180 - azml

    rd = 0.5
    rr = 0.1
    rb = 0
    costt = -Sin(decl * rdc) * Cos(XLA * rdc) * Cos(azml *
rdc) + Cos(decl * rdc) * Sin(XLA * rdc) * Cos(azml * rdc) * Cos(hrang) +
Cos(decl * rdc) * Sin(azml * rdc) * Sin(hrang)
    If (costt > 0) Then
        rb = costt / costz
    End If
    htt = (hb * rb) + (hd * rd + rr * RADH)
    tsol = T_EXT + ALPHM * htt / ctc
'-----
ElseIf (costz <= 0) Then
    tsol = T_EXT
End If

SOL = tsol
End Function
'*****
Static Function tempfict(tsol, tint, rterm, HE)
    tempfict = 1 / HE * (tsol - tint) / rterm + tsol
End Function
'*****

```



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000060138