

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

***Transferência de Calor e Umidade em Telhas :  
Simulação e Análise Experimental***

Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina Para a  
Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

**André Duarte Bueno**

**Florianópolis, agosto de 1994.**

***Transferência de Calor e Umidade em Telhas :  
Simulação e Análise Experimental***

**André Duarte Bueno**

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, especialidade Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Banca Examinadora:

---

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D., Coordenador

---

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D. (Orientador)

---

Prof. Paulo César Philippi, Dr. Ing (Co-orientador)

---

Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr.

---

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D.

---

Prof. Miguel Aloysio Sattler, Ph.D.

*Transferência de Calor e Umidade em Telhas :  
Simulação e Análise Experimental*

*" O esforço e a dedicação são corpo e alma para o desenvolvimento de trabalhos que superam as nossas expectativas e as nossas próprias capacidades. Desenvolvendo o raciocínio, o espírito científico, e a capacidade de evoluir com o trabalho em equipe e o companheirismo dos que nos auxiliam e nos ensinam. "*

*André D. Bueno.*

*Pela Educação Pública Gratuita e de Qualidade*



*Fátima pelo carinho e amor que me tem dedicado.  
Júlia e Ó Sofia pela felicidade que trouxeram às nossas vidas.*

## ***AGRADECIMENTOS***

A arte de agradecer é a arte de admitir que temos amigos, que nos auxiliam e nos ajudam a desenvolver os nossos trabalhos. A todos o meu sincero agradecimento.

- À Minha mãe Alice e ao meu pai Bernardo Bueno<sup>†</sup> por terem me ensinado o valor do esforço e a viver com dignidade.
- Ao Adriano Duarte Bueno, que me ajuda constantemente e com quem posso contar sempre. E aos meus irmãos Álvaro, Anselmo<sup>†</sup>, Alcioni, Bernardo, pela constante amizade, pelo carinho que tem por mim e minha família.
- À minha irmã Aladi e ao meu amigo Rogério Becker, pelo empréstimo de sua casa de campo nas temporadas de verão.
- A todos os professores do Curso de Engenharia Civil, especialmente ao Professor Victor Hugo Teixeira e à Professora Helena Stemmer, por terem me ensinado com dedicação a ser Engenheiro Civil.
- A Janete por ter fornecido a serra-copo para obtenção das amostras do ensaio de permeabilidade, e a Rodrigo, Solange, Sonia, Nilton, Silvio e Orlando, por terem sido colegas incansáveis na realização dos trabalhos das disciplinas do mestrado.
- Aos professores do curso de mestrado, Samir N.Y. Gerges, Luiz F. Heineck, Plínio Stange, Ivo Padaratz e Daniel Loríggio, pelos conhecimentos transmitidos.
- Para Francisco Perucchi e Júlio César Perucchi pela competência com que me auxiliaram na realização de todos os ensaios.
- Para Luiz Mauro e Ricardo Veríssimo por me terem auxiliado no ensaio de campo, programação HP.
- Aos colegas do LMPT, Gilmar, Henor, Romeu, Gilberto, Gustavo, Victor, Luiz, Diego, Hans, Paulo, Michel, Aldomar, e Saulo com quem se pode contar sempre, seja para a realização dos trabalhos, seja para churrascadas ou um bom jogo de futebol.
- Aos amigos Nathan Mendes, Lyang Zhirong, e Fabio Santana Magnani pela presença na defesa, e pela constante e sincera amizade.
- Ao Luiz, do Laboratório de Materiais de Construção Civil, pelo auxílio na confecção das amostras de argamassa para realização do ensaio de campo.

- Ao Milton Miguel e ao Edevaldo Reinaldo, do laboratório de Ciências Térmicas da Engenharia Mecânica, pelo fornecimento de material e auxílio no uso de equipamentos, necessários à confecção das amostras dos ensaios.
- Ao Celso Peres Fernandes, pelo fornecimento de material relativo a sua dissertação de mestrado, pela amizade descontráida.
- Ao professor Sérgio Colle do Laboratório Solar, por ter permitido a utilização de bancada para realização de ensaio de campo e fornecido os dados climáticos.
- Ao professor Humberto Ramos Roman, pelo fornecimento de material relacionado à Cerâmica Vermelha.
- Ao professor José Antonio Bellini da Cunha Neto, pelos esclarecimentos e discussões a respeito dos ensaios, sempre com uma boa opinião. Pela amizade compartilhada e pela participação na banca.
- Ao professor Miguel Aloysio Sattler, pela participação na banca.
- Ao professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira , pela participação na banca.
- Roberto Lamberts e Paulo Cesar Philippi, que foram *orientadores, professores, amigos*, em todos os momentos, com extrema *dedicação* e *carinho* pelo trabalho que exercem e pelas pessoas que os acompanham nesta jornada, que é a busca de pesquisa científica de qualidade.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo.



SUMÁRIO
---------

1. INTRODUÇÃO .....	2
2.MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA TELHA DE CERÂMICA .....	10
2.1. ENSAIO DE DENSIDADE E POROSIDADE .....	10
2.2. ENSAIO DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO.....	11
2.3 ENSAIO DE POROSIMETRIA A MERCÚRIO.....	16
2.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO VAPOR .....	19
2.4.1 Determinação da difusividade isotérmica de umidade, através do ensaio de permeabilidade e do ensaio de adsorção.....	22
2.5 CONCLUSÃO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	25
3. ENSAIO DE CAMPO: DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA E DO CONTEÚDO MÁSSICO DE UMIDADE DE TELHAS EXPOSTAS AO MEIO AMBIENTE.....	27
3.1. MEDIÇÃO 1: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA E CONTEÚDO MÁSSICO DE UMIDADE DAS DIFERENTES TELHAS ENSAIADAS .....	30
3.1.1. Dados climáticos da medição 1 .....	31
3.1.2. Valores de temperatura e conteúdo mássico de umidade para todas as telhas .....	32
3.2. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DA TELHA CERÂMICA PERMEÁVEL EM RELAÇÃO AS TELHAS DE ARGAMASSA, CIMENTO AMIANTO, FRANCESA E TERMOPLAN.....	36
3.2.1. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação as de argamassa.....	36
3.2.2. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação as de cimento amianto .....	38
3.2.3. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação a francesa e a termoplan .....	39
3.3. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DA TELHA CERÂMICA PERMEÁVEL EM RELAÇÃO ÀS IMPERMEÁVEIS NAS CORES NATURAL, VERMELHA E PRETA.....	42
3.3.1. Comparação dos perfis de temperatura de todas as telhas cerâmicas permeáveis .....	42
3.3.2. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável Padrão 1 versus Padrão 2.....	45
3.3.3. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável e impermeável preta .....	46
3.3.5. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável e impermeável vermelha.....	48

3.4. MEDIÇÃO 2: EFEITOS DA CHUVA .....	50
3.5. CONCLUSÕES DO ENSAIO DE CAMPO .....	52
4. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA A TELHA EXPOSTA AO MEIO AMBIENTE .....	55
4.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	55
4.2. HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS.....	56
4.3. OS MECANISMOS ENVOLVIDOS NA TRANSFERÊNCIA DE MASSA E ENERGIA EM TELHAS EXPOSTAS AO MEIO AMBIENTE .....	59
4.3.1. Transferência de Massa.....	59
4.3.2. Transferência de Energia.....	59
4.4. ALGORITMO NUMÉRICO .....	60
4.5. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	62
4.5.1. Condições de contorno para o volume de controle em contato com o ambiente externo.....	62
4.5.2. Equações discretizadas para os volumes internos .....	73
4.5.3. Condições de contorno para o volume de controle em contato com o ambiente interno.....	75
4.6. Seqüência de Cálculo.....	78
5. SIMULAÇÕES .....	80
5.1. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA TELHA DE ARGAMASSA .....	80
5.1.1. Dados padrões para telha de argamassa.....	80
5.1.2. Resultados da simulação para telha de argamassa com umidade externa e interna constante.....	82
5.1.3. Resultados simulação da telha de argamassa com amostras inicialmente saturadas .....	87
5.1.4. Simulação para a telha de argamassa com umidade externa e interna variando.....	89
5.2. SECAGEM DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA EM ESTUFA.....	94
5.3. CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES E DO ENSAIO DE SECAGEM DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA EM ESTUFA.....	98
6. CONCLUSÃO .....	100
6.1. sugestões para trabalhos futuros.....	102

<b><i>Simbologia</i></b>
--------------------------

$I$	Condutividade térmica aparente do material	[W/m.°C ]
$r_t$	Densidade volumétrica do material	[kg/m <sup>3</sup> ]
$r_l$	Densidade volumétrica da água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_t$	Calor específico do material	[J/kg.°C ]
$c_l$	Calor específico da água	[J/kg.°C ]
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> .°C ]
$t$	Tempo	[s]
$Dt$	Intervalo de tempo	[s]
$x$	Posição	[m]
$Dx$	Intervalo de espaço	[m]
$T$	Temperatura do material	[°C ].
$L$	Espessura do material	[m]
$e$	Emissividade do material	[]
$a$	Absortividade do material	[]
$R_{oc}$	Fluxo de calor por radiação em onda curta	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_{ol}$	Balanço das trocas de calor por radiação em ondas longas	[W/m <sup>2</sup> ]
$h$	Umidade Relativa do ar	[]
$J$	Fluxo de massa na escala macroscópica	[kg/m <sup>2</sup> .s]
$K$	Condutividade hidráulica função de $q$	[m/s]
$q$	Conteúdo volumétrico de umidade	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$w$	Conteúdo mássico de umidade	[kg/kg]
$h$	Porosidade	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$D_q$	Coefficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade	[m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	Coefficiente de transporte de massa associado a um gradiente de temperatura	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{q,v}$	Coefficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade na fase vapor	[m <sup>2</sup> /s]
$r_{v,ext}$	Concentração do vapor no ambiente externo	[kg/m <sup>3</sup> ]
$r_{v,int}$	Concentração do vapor no ambiente interno	[kg/m <sup>3</sup> ]
$h_{m,ext}$	Coefficiente de troca de massa no ambiente externo	[m/s]
$h_{m,int}$	Coefficiente de troca de massa no ambiente interno	[m/s]
$l_v$	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]

$esp$	Espessura do filme de líquido condensado sobre a telha	[m]
$M$	Massa molecular do gás	[g/Mol]
$P_v$	Pressão de vapor do gás	[N/m <sup>2</sup> ]
$m$	Massa	[kg]
$r$	Raio do poro	[m]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$n$	Número de moles	[Mol]
$R$	Constante universal dos gases perfeitos	[J/Mol K]
$a, b, c, d, P, Q$	Coeficientes do método numérico	

<i>Sub-índice:</i>	Se refere a:
$X_{sat}$	Saturado
$X_{seco}$	Seco
$X_v$	Vapor
$X_l$	Líquido
$X_t$	Telha
$X_{ext}$	Externo
$X_{int}$	Interno
$X^0$	Instante anterior
$X_x$	Posição x
$X_{v,ext}$	Vapor externo
$X_{v,int}$	Vapor interno
$X_{v,sat}$	Vapor saturado
$X_p$	Poro
$X_m$	Massa

<i><b>Lista de Figuras</b></i>
--------------------------------

Figura 1.1: Com a perda de calor por radiação em ondas longas, a telha se resfria. A pressão de vapor na superfície da telha, fica menor que a do ar, passando a telha a ganhar umidade. ....	4
Figura 1.2: Com a radiação solar, a temperatura da telha sobe passando a perder umidade. ....	5
Figura 2.1: Amostras de cerâmica dentro do dessecador. ....	12
Figura 2.2 : Evolução do conteúdo mássico de umidade, para o 2º ensaio de adsorção.....	13
Figura 2.3: Comparação da curva de adsorção para telha de cerâmica nos dois ensaios com a curva de adsorção para argamassa 8:2:1 [36] ambas obtidas a 30 °C, e argamassa 8:2:1 [10] obtida a 25°C. ....	15
Figura 2.4: Curva do diâmetro pelo volume acumulado para o ensaio de porosimetria a mercúrio. ....	17
Figura 2.5: Curva do diâmetro pela variação do volume acumulado. ....	18
Figura 2.6: Diagrama da montagem das amostras para ensaio de permeabilidade ao vapor. O conjunto de PVC foi usinado para ter sua massa reduzida para menos de 160g.....	20
Figura 2.7: Evolução da vazão em gramas/dia, do ensaio de permeabilidade ao vapor. ....	21
Figura 2.8 : Difusividade isotérmica de umidade da telha de cerâmica, calculada a partir do ensaio de permeabilidade ao vapor e do ensaio de adsorção.....	23
Figura 2.9: Dessecadores dentro da estufa. Em cima dessecadores utilizados nos ensaios de adsorção/dessorção, e embaixo dessecadores usados no ensaio de permeabilidade.....	24
Figura 3.0: Esboço da montagem do ensaio de campo. ....	28
Figura 3.1: As telhas de argamassa e cimento amianto utilizadas no ensaio de campo.....	29
Figura 3.2: As telhas de cerâmica utilizadas no ensaio de campo.....	29
Figura 3.3: Dados climáticos, radiação onda curta e onda longa para medição 1 .....	31
Figura 3.4: Temperatura do ar para medição 1. Observe uma atípica elevação da temperatura noturna entre 20h e 23h. ....	32

Figura 3.5: Evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 1 .....	33
Figura 3.6: Evolução da temperatura para a medição 1, todas as telhas. ....	35
Figura 3.7: Evolução da temperatura para telhas de argamassa.....	37
Figura 3.8: Diferença de temperatura para telhas de argamassa em relação a P1.....	37
Figura 3.9: Evolução da temperatura para telhas de cimento amianto .....	38
Figura 3.10: Diferença de temperatura para telhas de cimento amianto em relação a P1.....	39
Figura 3.11: A telha termoplan é extrudada enquanto as demais são prensadas, o que permite a presença de furos para ventilação. Observe onde foi colocado o termopar. ....	40
Figura 3.12: Evolução da temperatura para telhas francesa e termoplan.....	41
Figura 3.13: Diferença de temperatura para telhas francesa e termoplan em relação a P1.....	42
Figura 3.14: Evolução da temperatura para todas as telhas tipo plan, permeáveis e impermeáveis, nas cores branca, vermelha e preta.....	44
Figura 3.15: Evolução da temperatura para telha padrão 1 e padrão 2.....	45
Figura 3.16: Evolução da temperatura para telha plan preta permeável e impermeável.....	46
Figura 3.17: Diferença de temperatura para telha plan preta em relação a P1.....	47
Figura 3.18: Evolução da temperatura para telha plan branca permeável e impermeável. ....	47
Figura 3.19: Diferença de temperatura para telha plan branca em relação a P1.....	48
Figura 3.20: Evolução da temperatura para telha plan vermelha permeável e impermeável.....	49
Figura 3.21: Diferença de temperatura para telha plan vermelha permeável e impermeável. ..	49
Figura 3.22: Evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 2. ....	51
Figura 3.23: Evolução da temperatura para a medição 2.....	51
Figura 4.1: Discretização da telha em vol. finitos e os mecanismos de troca de .....	60
Figura 4.2: Balanço de massa para o volume de controle 1 .....	62
Figura 4.3: Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de umidade em função do conteúdo volumétrico de umidade, para argamassa [10].....	66
Figura 4.4: Balanço de energia no volume de controle 1.....	67

Figura 4.5 : Condutividade térmica aparente em função do conteúdo mássico de umidade para a argamassa, a temperatura de 25°C. [10].....	69
Figura 4.6: Balanço de massa no volume de controle i.....	73
Figura 4.7: Balanço de energia no volume de controle i.....	74
Figura 4.8: Balanço de massa no volume de controle n.....	75
Figura 4.9: Balanço de energia no volume de controle n.....	76
Figura 5.1: Dados climáticos utilizados nas simulações para a argamassa. ....	82
Figura 5.2: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade (umidade externa constante a 95% e interna constante a 75%) .....	83
Figura 5.3: Valores de temperatura para telha permeável e impermeável .....	84
Figura 5.4: Evolução das trocas de energia nas interfaces externa e interna da telha de argamassa, dada em $W/m^2$ . ....	85
Figura 5.5: Perfil de temperatura para telha permeável e impermeável , às 24hs, usando recorrência=2.....	86
Figura 5.6: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade $\theta$ , para simulação com início saturado (depois de uma chuva) .....	87
Figura 5.7: Temperatura , para simulação com início saturado.....	88
Figura 5.8: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade $q$ , considerando umidade variando entre $h=50\%$ de dia e $h=99\%$ a noite. ....	89
Figura 5.9: Evolução da temperatura, para simulação com umidade variável. ....	90
Figura 5.10: Evolução da temperatura para o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa, amostra seca e amostra saturada. (1º ensaio).....	94
Figura 5.11: Evolução da temperatura para amostra de argamassa inicialmente saturada versus amostra seca, e evolução do conteúdo volumétrico de umidade para a 2º medição .....	95
Figura 5.12: Simulação da evolução da temperatura e conteúdo volumétrico de umidade de uma amostra de argamassa para comparação com o ensaio da estufa. ....	96

<i>Lista de Tabelas</i>
-------------------------

Tabela 3.1: Resultados ensaio de adsorção.....	30
Tabela 4.1: Amostras ensaio de campo.....	38
Tabela 5.1: Valores de entrada do programa de simulação, para simulação padrão. ....	59



**RESUMO**

Apresenta-se um estudo numérico e experimental, com o objetivo de avaliar o desempenho higrotérmico de telhas permeáveis e impermeáveis.

As propriedades físicas necessárias à realização das simulações numéricas foram determinadas em laboratório. Para as telhas de cerâmica foram realizados ensaios de densidade, porosidade, conteúdo de umidade na saturação, adsorção, dessorção, porosimetria a mercúrio e permeabilidade ao vapor.

Um ensaio de campo foi realizado para verificar os fenômenos estudados. Neste ensaio determina-se a evolução do conteúdo mássico de umidade e temperatura de um grupo de telhas permeáveis e impermeáveis de diferentes materiais (cimento amianto, argamassa e cerâmica) em diferentes cores (natural, branca e preta). Apresenta-se uma comparação dos resultados.

A partir de modelo matemático da teoria dos meios porosos, desenvolveu-se as equações discretizadas para a solução do problema da transferência de umidade em telhas porosas. Foi desenvolvido ainda um programa de simulação do processo, usando programação orientada a objeto em C++. As simulações realizadas mostram que a telha permeável tem maior temperatura noturna devido a absorção de umidade, e menor temperatura diurna pela perda de umidade. Também foi verificada a presença de patamar na evolução da temperatura das telhas permeáveis.

Finalmente, realiza-se o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa, com o objetivo de confirmar a presença de patamar na evolução da temperatura, durante o processo de secagem.

Os resultados deste trabalho abrem a possibilidade do desenvolvimento de novas telhas com melhor desempenho térmico.

<i><b>ABSTRACT</b></i>
------------------------

A numerical and experimental study of the higo-thermal behaviour of permeable and non permeable roof tiles is presented.

The physical properties needed for the simulation were determined in laboratory. For the clay tiles, the density, porosity, moisture content on saturation, adsorption, dessorption and vapor permeability where measured.

A field study was carried on to verify the phenomena. The evolution of the moisture content of a group of permeable and non permeable materials (asbestos cement, mortar, and clay) in various colors (natural, white, black) was measured.

A matematical model based on porous media theory was developed to solve the heat and moisture transfer in the tiles. Simulations where performed and show a higher temperature for permeable tiles during the night due to moisture adsorption and lower temperature during the day due to moisture loss. A level on the temperature evolution was observed during simulation.

Mortar samples were dried in an oven to confirm the level on the temperature evolution during the drying process.

The results open new possibilities for the development of tiles with a better higo-thermal behaviour.

# Capítulo 1

## Introdução

## ***1. INTRODUÇÃO***

A cobertura é o elemento que mais contribui para o desconforto dos usuários de edificações térreas em climas quentes, com alta incidência da radiação solar. Em função da absorção da radiação solar a temperatura das telhas se eleva, aumentando o fluxo de calor para o forro, e causando desconforto aos usuários pelo aquecimento do ar interior, bem como pela alta temperatura atingida pelo forro. Para resolver os problemas de transferência de calor nas coberturas muitos trabalhos tem sido desenvolvidos, e foram desenvolvidas técnicas de solução do problema como a ventilação natural, o uso de materiais isolantes, o uso da barreira a radiação e o uso da capacidade térmica da cobertura; Os estudos desenvolvidos não consideram entretanto a transferência de umidade na cobertura. O presente trabalho centra seus esforços na compreensão dos processos de transferência de umidade num elemento fundamental das coberturas, as telhas.

Os estudos objetivando melhorar o conforto térmico dos usuários das edificações estão ligados a dois princípios:

O primeiro princípio consiste na utilização de equipamentos de refrigeração; Normalmente é uma solução adotada a posteriori, quando os usuários constatarem o problema de desconforto e resolvem instalar equipamentos de refrigeração. Tem como inconveniente o alto consumo de energia, refletindo em custos elevados para o usuário. Em muitos casos esta solução já é adotada em projeto, isto ocorre quando o engenheiro responsável não tem conhecimento das técnicas naturais de redução da transferência de calor nas edificações.

O segundo princípio envolve a utilização de técnicas naturais. A *ventilação natural* no ático das edificações, objetiva reduzir o fluxo de calor para o forro, pelo mecanismo da convecção que retira calor das telhas, reduzindo sua temperatura [12,16,34]. A utilização de *materiais isolantes* como o isopor e a lã de vidro, tem o objetivo de reduzir o fluxo de calor por condução. A *barreira a radiação*, consiste de uma película de metal polido colocada abaixo das telhas, o metal polido tem baixa emissividade, reduzindo a transferência de calor por radiação para o forro. Em coberturas pesadas pode-se utilizar a *capacidade térmica* da cobertura para controlar, através do retardo térmico, o fluxo de calor para o interior da edificação [19].

Um engenheiro ou arquiteto deve estar atento a utilização das técnicas naturais de redução da transferência de calor nas edificações pois as mesmas tem um custo menor ao longo da vida útil da edificação, por não consumirem energia. O governo deveria estar atento as técnicas naturais; pois é mais interessante investir em pesquisa de materiais e equipamentos que reduzam o consumo de energia das edificações, do que investir na geração de energia.

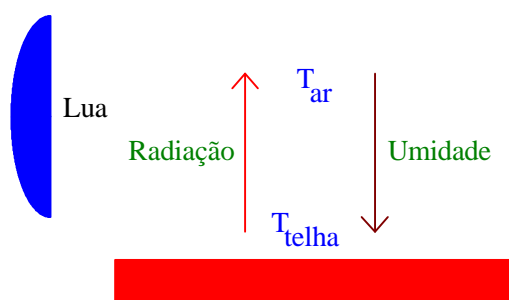
A maioria dos estudos desenvolvidos nesta área consideram somente a transferência de calor nas coberturas, desconsiderando as transferências de umidade. O presente trabalho inclui a transferência de umidade nas coberturas, fazendo um estudo numérico e experimental da transferência de calor e umidade em telhas.

As telhas são elementos fundamentais no desempenho térmico das coberturas. E no Brasil, são muito utilizadas as de fibrocimento e de cerâmica. Compreender o comportamento das telhas no processo de transferência de calor e umidade é um importante passo na solução do problema da transferência de calor nas coberturas.

A primeira técnica utilizada para melhorar o comportamento térmico de uma telha é a pintura com tinta de baixa absorvidade (tintas claras). Mas existem outros efeitos físicos que podem ser utilizados para a melhoria das características térmicas das telhas. Admite-se, ainda, como senso comum, que as telhas cerâmicas apresentam um desempenho térmico superior em relação às de fibrocimento, mas por quê?

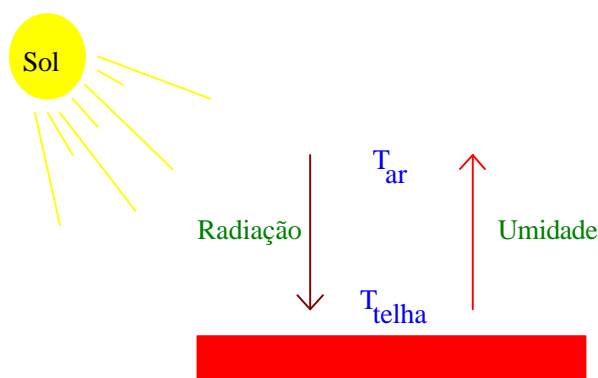
Considera-se que a troca de umidade entre a telha de cerâmica e o ar externo e interno, explica o melhor desempenho térmico deste material. As trocas de umidade seriam então uma técnica natural utilizada para reduzir o fluxo de calor nas coberturas e o desconforto do usuário da edificação.

Durante a noite as telhas perdem energia por radiação em ondas longas para o céu (*Figura 1.1*). Com a perda de energia por radiação, a temperatura da telha fica mais baixa que a temperatura do ar, acarretando uma redução na pressão de saturação do vapor junto à superfície da telha; passa então a existir um gradiente de pressão de vapor entre a telha e o ar; e a telha passa a ganhar umidade por condensação. As telhas de cerâmica são porosas, permitindo a migração desta umidade para o seu interior.



*Figura 1.1: Com a perda de calor por radiação em ondas longas, a telha se resfria. A pressão de vapor na superfície da telha, fica menor que a do ar, passando a telha a ganhar umidade.*

Pela manhã, a telha está com concentração de umidade alta em seu interior e, com a incidência da radiação solar, o processo se inverte. A telha ganha energia e eleva a sua temperatura. Conseqüentemente, ocorre aumento da pressão de vapor do ar na superfície da telha, passando ela a perder umidade. Como a energia do sol está sendo utilizada para evaporar a umidade incorporada na noite anterior, a temperatura da telha de cerâmica fica menor ao longo do dia (*Figura 1.2*). Observe que este processo é menor em telhas pouco permeáveis, como as de fibrocimento.



*Figura 1.2: Com a radiação solar, a temperatura da telha sobe passando a perder umidade.*

O que explica o melhor desempenho térmico da telha permeável (como a telha de cerâmica) em relação as impermeáveis é, então, o processo de interação da estrutura porosa da telha com a umidade do ar. O objetivo deste trabalho é estudar este processo que envolve a transferência de calor e umidade em telhas cerâmicas.

Deve-se considerar ainda a chuva, que é a precipitação de água líquida diretamente sobre a telha, sem que ocorra mudança de fase. Com as chuvas, as telhas ganham uma massa de líquido maior que as decorrentes do processo de condensação. Mas no processo de evaporação ocorre troca de calor latente (ou seja, parte da energia solar será convertida em energia de evaporação, não aquecendo a telha), de forma que o ganho de desempenho térmico decorrente da porosidade das telhas será maior com as chuvas.

Lamberts [19] identifica a importância da transferência de umidade em telhas de cerâmica. Realiza medições em Porto Alegre com uma telha francesa, durante um dia e verifica a variação no conteúdo mássico de umidade<sup>1</sup> da telha.

---

<sup>1</sup>O conteúdo mássico de umidade ( $w$ ) é definido como a relação entre a massa seca e a massa úmida

da amostra dada por: 
$$w = \frac{m_{\text{umidade}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}}$$

O conteúdo volumétrico de umidade é relacionado com o conteúdo mássico pela expressão:

$$\theta = w \frac{\rho_t}{\rho_l}$$

O conteúdo mássico de umidade na telha chegou a variar de 19,5% às 6 horas para 11,5% às 17 horas. Através de cálculos simplificados quantificou que a energia gasta para evaporar a umidade incorporada à noite equivale a 20% da radiação sola incidente. A telha francesa utilizada tinha densidade de  $1542 \text{ kg/m}^3$  e porosidade de 37,14%.

A utilização dos efeitos de troca de calor latente é discutida por Gonzales [42]. Gonzales cita Givoni, que através de ensaios realizados em Israel determinou através de medições, que a utilização de uma piscina d'água de pequena espessura no telhado da edificação, pode diminuir a temperatura até  $5^\circ\text{C}$  em relação à alcançada em um telhado a sombra. Gonzales afirma ainda que outra forma de reduzir a temperatura do telhado é o gotejamento de água no mesmo.

Dihlmann [41] utiliza técnicas de gotejamento sobre uma cobertura de telhas de cerâmica vermelha na cidade de Lauro Muller (SC), com o objetivo de reduzir a carga térmica sobre um galpão de criação de *Chinchilas*, e realiza medidas experimentais com termômetro de máximos e mínimos quando conseguiu reduções nas temperaturas da ordem de  $7^\circ\text{C}$ .

Para a compreensão dos processos higroscópicos que se desenvolvem na telha de cerâmica (meio poroso) parte-se dos trabalhos de Fernandes [10] e Yunes [36], que desenvolveram estudos para uma argamassa de cal e cimento na proporção 8:2:1 (areia fina, cal e cimento respectivamente) adicionando 20% de água em massa. De fato, as propriedades de retenção e transporte desse material foram determinadas, enquanto que para a cerâmica não se dispõe de dados que permitam a modelagem dos processos, Philippi et al [29].

Através da isoterma de adsorção, do ensaio de porosimetria a mercúrio e de modelo teórico para a condensação, Fernandes [10] determina a distribuição volumétrica dos poros da argamassa. O mesmo autor utiliza o método da sonda térmica para determinar a relação entre o conteúdo mássico de umidade ( $w$ ) e a condutividade do material ( $\lambda$ ). A curva de difusividade da argamassa foi determinada através de ensaio de migração de água por embebição de uma coluna de argamassa.



Yunes [36] realiza estudos de adsorção e dessorção para argamassa com diferentes processos de secagem e determina a estrutura porosa do material a partir do ensaio de adsorção e de modelo de preenchimento capilar dos poros. Desenvolveu ainda procedimento de polimento das amostras de argamassa para a obtenção de micrografias e, a partir delas, e de processo de análise manual de verificação, determinar a estrutura porosa para poros de 200Å a 13µm.

Philippi et al [29] definem os elementos de fixação e transferência de vapor e líquido na estrutura porosa e o processo de higroscopicidade pelos ensaios de adsorção e dessorção.

Os trabalhos de Philippi et al [29], Fernandes [10], e Yunes [36] servem como bibliografia complementar para compreensão dos fenômenos físicos da interação do meio poroso com a umidade.

Em trabalho preliminar, Bueno et al [2] discutem o fenômeno da transferência de calor e umidade em telhas de argamassa, utilizando processo simplificado, em que se considera as trocas de umidade entre a telha e o meio ambiente, mas se desconsidera a resistência hidráulica da telha.

O presente trabalho tem como objetivo principal a compreensão do processo físico que ocorre na estrutura porosa da telha. Faz parte de uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida conjuntamente pelo LMPT e pelo NPC; Esta linha de pesquisa estuda o comportamento térmico de materiais de construção, e os trabalhos são normalmente desenvolvidos usando três abordagens:

- 1- Ensaios de laboratório, visando determinar as propriedades físicas dos materiais.
- 2- Ensaios de campo, visando determinar o comportamento do material em condições de uso.
- 3- Desenvolvimento de modelos matemáticos, algoritmos numéricos e programas com o objetivo de simular os processos de transferência de calor e umidade.

Este trabalho explora estas três abordagens, sendo assim dividido:

No capítulo 2, a determinação das propriedades físicas das telhas cerâmicas, relacionadas a transferência de calor e umidade (ensaios de densidade, porosidade, adsorção, dessorção, porosimetria a mercúrio e permeabilidade).

No capítulo 3, apresenta-se os resultados de ensaios de campo (medição de temperatura e massa das telhas), idealizados para permitir a comparação do desempenho térmico real, entre telhas permeáveis e impermeáveis, de diferentes cores.

No capítulo 4, apresenta-se o modelo matemático, as equações discretizadas (balanço de massa e energia), e o programa de simulação.

No capítulo 5, apresenta-se algumas simulações numéricas da transferência de calor e umidade para uma argamassa de cal e cimento. Considerando dados climáticos de um dia de verão (em Florianópolis-SC) e as propriedades físicas da argamassa de cal e cimento obtidos por Fernandes [10]; as simulações foram realizadas para a argamassa, pois ainda não existem todos os dados físicos para a telha cerâmica. Apresenta-se ainda o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa, com o objetivo de verificar a presença de patamar na evolução da temperatura durante o processo de secagem.

Finalmente, no capítulo 6 apresenta-se a *Conclusão* do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Medição das Propriedades

Físicas da

Telha de Cerâmica

## **2. MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA TELHA DE CERÂMICA**

Este capítulo descreve os ensaios de determinação das propriedades físicas da telha de cerâmica utilizada nos ensaios de campo. O ensaio de densidade e porosidade, o ensaio de adsorção, o ensaio de porosimetria a mercúrio e o ensaio de permeabilidade.

As telhas utilizadas nos ensaios são telhas cerâmicas do tipo plan, que apresentam capa e canal e foram obtidas em uma olaria da região da Grande Florianópolis.

### **2.1. ENSAIO DE DENSIDADE E POROSIDADE**

A densidade é definida como a relação entre a massa seca pelo volume do material.

$$r = \frac{m_{\text{seca}}}{V_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

O conteúdo mássico de umidade do material é definido pela relação.

$$w = \frac{m_{\text{úmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}} \quad (2.2)$$

A porosidade é definida como a relação do volume de vazios da amostra pelo volume total da amostra. Pode ser determinada ainda a partir do conteúdo mássico de umidade.

$$h = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} = w_{\text{sat}} \cdot \frac{r_t}{r_l} \quad (2.3)$$

Para obtenção da massa das amostras foi utilizada uma balança analítica marca Sartorius, de resolução 0.0005g, com faixa de operação para até 160g; uma estufa com faixa de operação até 100°C para secagem das amostras; e uma bureta graduada (escala 50 ml) para medição de volume. As amostras foram impermeabilizadas com tinta impermeabilizante marca comercial Hidronorte, e seu volume determinado conjuntamente na bureta graduada por imersão.

Os resultados encontrados para 10 amostras (selecionadas aleatoriamente) de telha de cerâmica do tipo plan foram:

- **Densidade = 1 880 +/- 80 [kg/m<sup>3</sup>];**
- **w<sub>sat</sub> = 0.17647 +/- 0.00003 [kg/kg];**
- **porosidade = 0.331 +/- 0.014 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].**

Para as simulações numéricas foram utilizados os dados da argamassa de cal e cimento [10]. As simulações foram realizadas com os dados de argamassa porque para a argamassa temos os dados de difusividade para a região de vapor e líquido, enquanto para a cerâmica somente para a região de vapor. A *Tabela 2.1* apresenta uma comparação dos valores de densidade e porosidade para a telha de cerâmica e a argamassa, observa-se uma diferença de 8.7% na densidade, e de 6.8% para a porosidade, como as diferenças são pequenas, justifica-se o uso dos dados da argamassa para a simulação.

*Tabela 2.1 Comparação da densidade e porosidade da telha e da argamassa.*

Material	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Telha de cerâmica	1 880 +/- 80	0.331 +/- 0.014
Argamassa de cal e cimento [10].	1 730 +/- 50	0.31 +/- 0.03

## 2.2. ENSAIO DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO

O ensaio de adsorção consiste em se determinar a relação entre a umidade relativa do ar e o conteúdo mássico de umidade do material a uma determinada temperatura, veja Fernandes [10] e Yunes [36].

Para a realização deste experimento utiliza-se um conjunto de PVC (foram confeccionados 20 conjuntos de PVC), que serve de suporte para as amostras dentro do dessecador. Este conjunto de PVC é furado e fixo com fios de nylon que permitem se obter a massa do conjunto sem retirar as amostras do dessecador. O dessecador usado consiste de um vidro de conserva da 'Cristal Santa Marina'. Estes vidros são vedados com uma borracha e têm tamanho adequado (0.5 litros) para a realização da experiência.

Para se criar uma atmosfera controlada, com umidade e temperatura constante, coloca-se dentro do dessecador uma solução de água e sal (descritos no apêndice). O conjunto todo é levado para estufa que mantém a temperatura controlada em 30°C. Esta solução mantém a umidade relativa do ar constante dentro do dessecador.

As amostras foram deixadas expostas as intempéries por um período de 5 meses. Após este período as mesmas foram levadas para o laboratório. Separou-se 10 telhas aleatoriamente, e quebrou-se as mesmas em pequenos corpos de prova de aproximadamente 1-2 cm<sup>3</sup>. Separou-se dez pequenas amostras de cada telha e colocou-se em uma pequena forma de metal. Desta forma temos dentro de cada dessecador amostras de diferentes telhas. Depois as amostras foram secas em estufa, obtidas as massas secas; colocadas dentro dos dessecadores e levadas para estufa previamente a 30°C. A determinados períodos obtêm-se a massa das amostras. A *Figura 2.1* mostra as amostras dentro do dessecador.



*Figura 2.1: Amostras de cerâmica dentro do dessecador.*

Para que se possa determinar o fim do ensaio é comparada a evolução da massa dos copos de PVC+amostras, a cada semana, o ensaio termina quando não existe mais variação de massa.

O ensaio foi realizado duas vezes, para verificar a variação dos resultados. No primeiro ensaio realizado, o tempo do ensaio foi de 174 dias para  $h=96\%$ . Com base neste resultado, para o segundo ensaio, não foi necessário realizar medições no período intermediário.

A Figura 2.2 mostra a evolução do conteúdo mássico de umidade para o 2º ensaio.

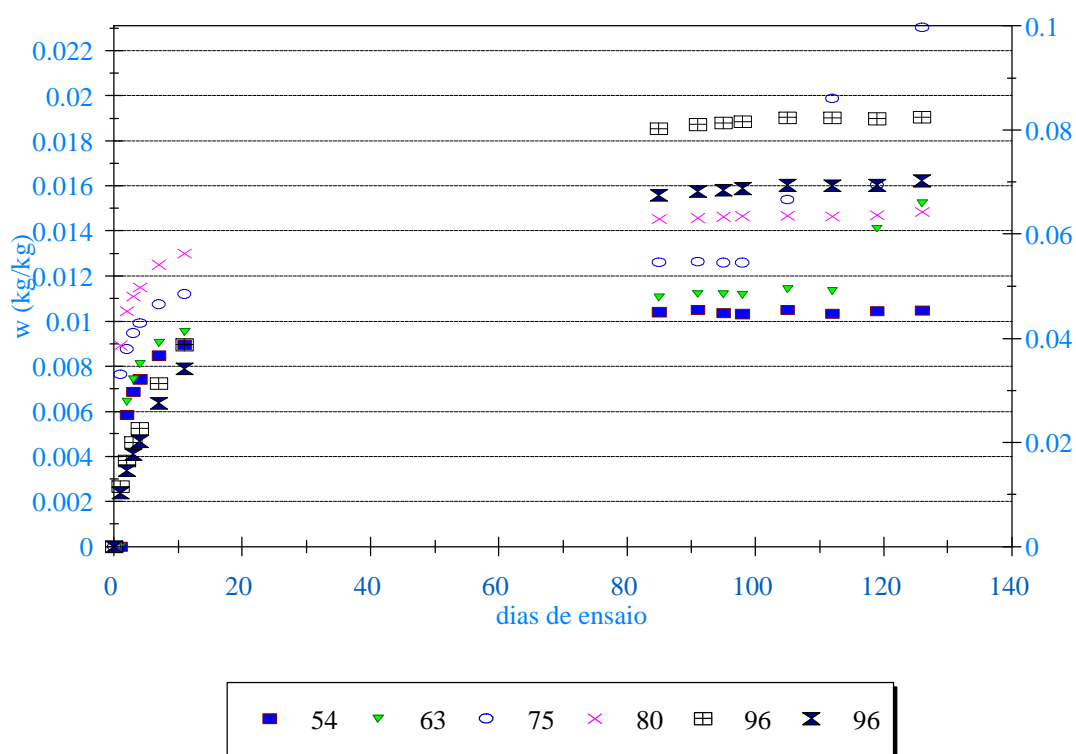


Figura 2.2 : Evolução do conteúdo mássico de umidade, para o 2º ensaio de adsorção.

O tempo necessário para que o ensaio chegue ao fim é diferente para as diferentes umidades relativas. O 2º ensaio de adsorção para  $h=54\%$  demorou um total de 90 dias, enquanto para  $h=96\%$  um total de 124 dias. De fato os equilíbrios não se estabeleceram para o tempo em que foram deixados na estufa. BELLINI [43] em sua tese de doutorado, teve corpos de prova que não atingiram o equilíbrio após um período de 2 anos (BELLINI usou material com porosidade de 35%, exposto a uma umidade de 96% na dessorção).

A *Tabela 2.2* apresenta os resultados finais do ensaio de adsorção para a primeira medição e para a segunda medição.

Ocorre grande variação no resultado para  $h=22\%$  no primeiro ensaio  $w=0.0146$  e  $w=0.01025$ , atribui-se esta variação a um provável erro na determinação da massa seca da amostra no início do ensaio, ou a algum problema com a solução salina.

O resultado para  $h=75\%$  também está errado, acredita-se que este erro esteja associado a utilização no ensaio de uma solução não P.A. Observando a *Figura 2.2*, verifica-se que o resultado para  $h=75\%$  apresenta-se coerente até os 100 dias de ensaio, depois passa a sofrer variações que podem ser justificadas pelo fato da solução não ser P.A. Na *Tabela 2.2* adotou-se para o 2º ensaio a  $h=75\%$  o resultado a 100 dias de ensaio.

*Tabela 2.2: Resultados do ensaio de adsorção.*

SOLUÇÃO	h %	w[kg/kg]	w[kg/kg]	w[kg/kg]	w[kg/kg]
		1º ensaio	Pontos repetidos	2º ensaio	Pontos repetidos
KOH	7	0,0019			
KCH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	22	0,0146	0,01025		
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	33	0,0096			
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O	43	0,0102			
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 2H <sub>2</sub> O	52	0,0138		0,0105	
NaNO <sub>2</sub>	63	0,0163		0,0114	
NaCl	75	0,0253	0,0086	0,0126	
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80	0,0173	0,0194	0,0149	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	96	0,0778	0,0843	0,0826	0,0703



A Figura 2.3 apresenta a comparação da curva de adsorção para a telha de cerâmica, primeiro e segundo ensaios, e para a argamassa obtida por Yunes [69] e Fernandes [21]. A telha apresenta valores de conteúdo mássico de umidade, acima dos observados para a argamassa, o que significa ser a telha mais higroscópica que a argamassa.

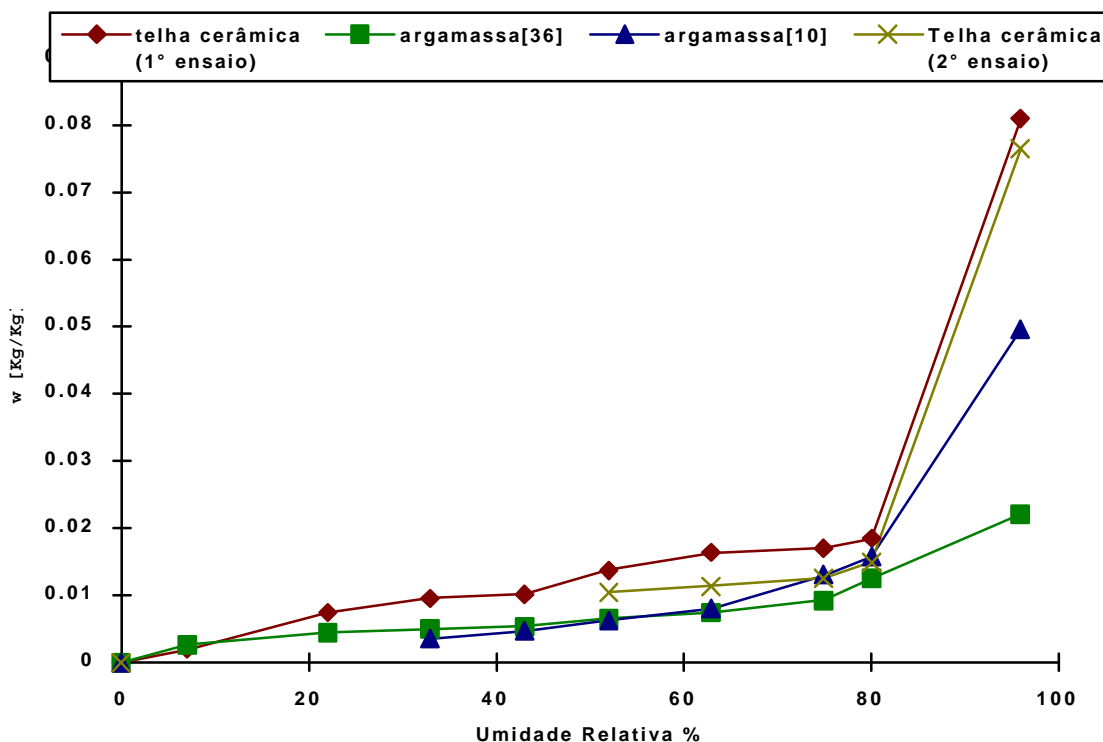


Figura 2.3: Comparação da curva de adsorção para telha de cerâmica nos dois ensaios com a curva de adsorção para argamassa 8:2:1 [36] ambas obtidas a 30 °C, e argamassa 8:2:1 [10] obtida a 25°C.

As diferenças entre a curva de adsorção da telha e da argamassa são mais acentuadas para  $h=96\%$ , o que significa que a telha de cerâmica tem um grande número de poros que são preenchidos para  $h=96\%$ .

O ensaio de dessorção difere do ensaio de adsorção por iniciar com os corpos-de-prova saturados. Os corpos-de-prova ficaram saturando por um período de 30 dias, até que ocorre-se a estabilidade de massa saturada. Durante a realização do experimento ocorreu uma brusca variação da temperatura da estufa que invalidou os resultados deste ensaio.

## 2.3 ENSAIO DE POROSIMETRIA A MERCÚRIO

Outro ensaio que foi realizado com o objetivo de determinar a distribuição de poros da telha de cerâmica, foi o ensaio de porosimetria a mercúrio. Para compreensão do funcionamento da porosimetria a mercúrio veja J. Van Brakel [49].

O equipamento utilizado foi um PORESIZER 9320 V2.05, da Micromeritz.

A amostra utilizada tinha uma massa seca inicial de 1.1840g. A amostra foi colocada dentro de uma campanula de vidro e transferida para o porosímetro.

O mercúrio apresenta um angulo de contacto de  $130^\circ$  tanto para intrusão quanto para retração do mercúrio, uma tensão superficial de 485 dyn/cm, e uma densidade de 13.5291 g/ml.

A realização do ensaio é totalmente automatizada, um software que acompanha o equipamento controla o processo de intrusão e retração de mercúrio. O software comanda a aplicação de um passo de pressão a cada 180s, (considera-se que o mercúrio entre em equilíbrio com a amostra neste intervalo de tempo) determinando a variação do volume retido pela amostra.

Os valores de pressão aplicados na intrusão estão na faixa de 0.0019Mpa a 201.0538Mpa. Para a retração os valores foram 175.5592Mpa e 0.5001Mpa. Estes valores de pressão permitiram identificar poros de  $660\mu\text{m}$  a  $0.0062\mu\text{m}$ . Os principais resultados encontrados estão listados na *Tabela 2.3*. A tabela com todos os dados de intrusão e retração de mercúrio estão no Apêndice.

*Tabela 2.3: Principais resultados do ensaio de porosimetria a mercúrio*

Volume máximo de mercúrio retido pela amostra na intrusão	0.1702 ml/g.
Área total dos poros	14.791 m <sup>2</sup> /g.
Diâmetro médio do poro (volume)	0.0579 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio do poro (área)	0.0385 $\mu\text{m}$
Densidade	1.8298 g/ml
Densidade aparente	2.6573 g/ml
Porosidade	31.14 %

A Figura 2.4 mostra a curva do diâmetro dos poros ( $\mu\text{m}$ ) pelo volume acumulado ( $\text{ml/g}$ ). Pode-se observar a histerese entre as curvas de injeção e retração do mercúrio. Notar que a histerese é acentuada, para diâmetro de poro de  $1.2\mu\text{m}$  o volume acumulado é de  $0.0059\text{ ml/g}$  na injeção contra  $0.06\text{ ml/g}$  na retração, uma diferença de  $0.0541\text{ ml/g}$ . A maior histerese ocorre para poros da ordem de  $0.1\mu\text{m}$  onde temos volumes de  $0.0247\text{ ml/g}$  para injeção contra  $0.145\text{ ml/g}$  na retração.

Observa-se ainda um aumento considerável do volume acumulado na injeção para diâmetro de poro acima de  $0.1\mu\text{m}$ , atingindo um volume acumulado de  $0.1667\text{ ml/g}$  para diâmetro de poro de  $0.01\mu\text{m}$ . Ou seja a grande maioria dos poros esta compreendida de  $0.1\mu\text{m}$  a  $0.01\mu\text{m}$ .

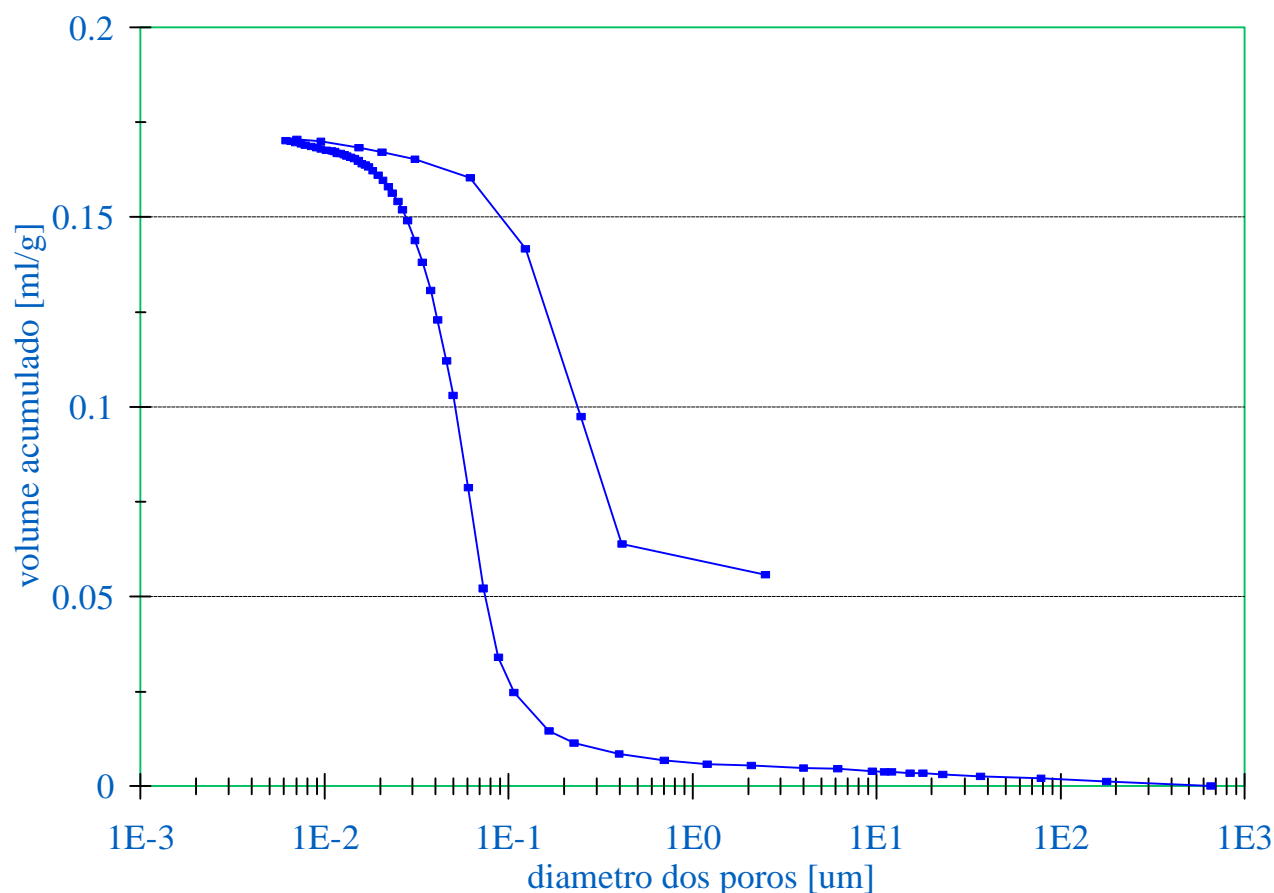


Figura 2.4: Curva do diâmetro pelo volume acumulado para o ensaio de porosimetria a mercúrio.



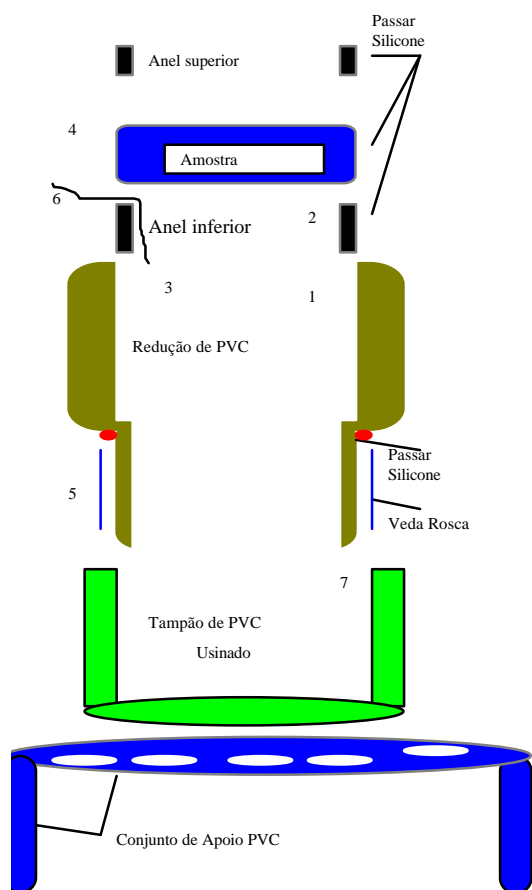
## 2.4. ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO VAPOR

O objetivo deste ensaio é determinar a permeabilidade ao vapor da telha de cerâmica vermelha. Através da permeabilidade ao vapor juntamente com a curva de adsorção pode-se determinar os valores de difusividade do material ( $D$ ).

A *Figura 2.6* mostra um esboço do conjunto de PVC utilizado no ensaio de permeabilidade ao vapor e a sequência de montagem. Como este ensaio foi realizado utilizando-se um novo sistema de montagem, descreve-se os materiais utilizados e sua montagem.

*Material:* Como dessecador é utilizado uma compota de vidro de 1.5 litros, o apoio consiste de um pedaço de cano de PVC de 100mm, e uma placa de PVC cortada em formato circular e onde foram feitos inúmeros furos com broca de 8mm. Uma luva de redução de 50mm para roscável 1'', e tampão inferior roscável de 1''. A luva e a redução foram usinadas para redução de sua massa (todo o conjunto deve ter massa inferior a 160g, que é o limite da balança utilizada). Uma serra copo diamantada de 1'' para obtenção das amostras cilíndricas de cerâmica. Silicone comercial para vedação do conjunto e fita veda rosca.

*Sequência de Montagem:* As telhas eram levadas para uma bancada onde com a serra copo diamantada e uma furadeira de bancada as amostras cilíndricas de cerâmica eram obtidas. Foi utilizado um sistema de lubrificação com água, o que permitiu obter amostras mais perfeitas. Depois as amostras tinham suas laterais lixadas e sua massa seca determinada. A *Figura 2.6* mostra a sequência de montagem.



1- Passa-se silicone na parte interna da redução de PVC. E no anel inferior.

2- Coloca-se o anel inferior de PVC.

3- Coloca-se um pedaço de fio de nylon aderido a parede da redução.

4- A amostra é então impermeabilizada em suas laterais e colocada dentro da redução de PVC.

5- Passa-se fita veda rosca na redução.

6- Retira-se o fio de nylon criando um pequeno orifício para a passagem de ar.

7- Encaixa-se a redução de PVC já com a solução salina; com cuidado para não romper a vedação e contaminar a amostra.

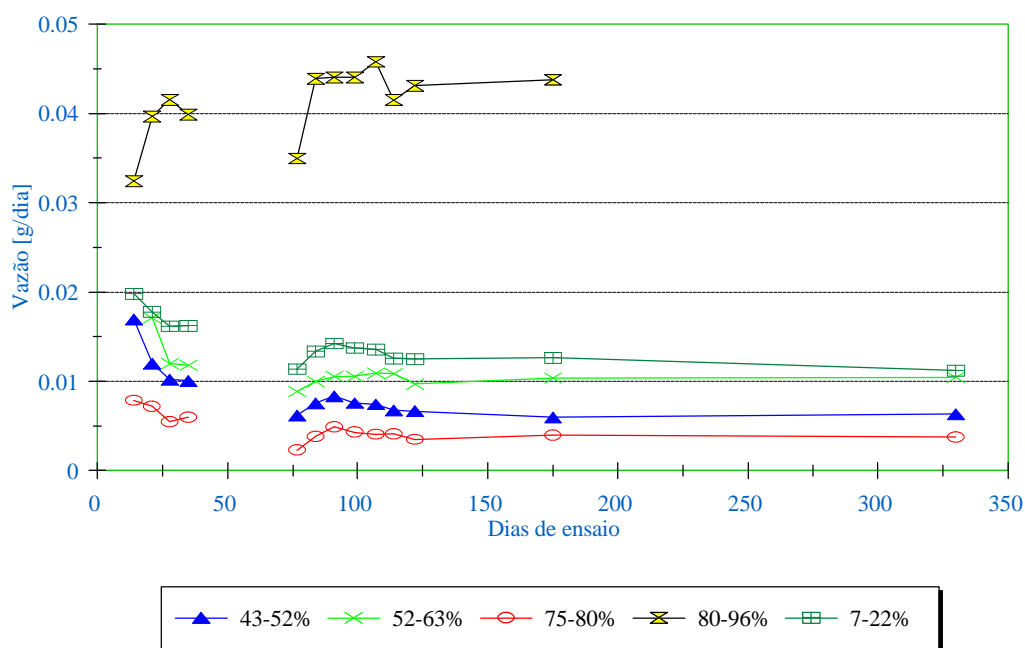
8- Passa-se silicone no anel superior e coloca-se o mesmo.

9- Todo o conjunto é então pesado, colocado dentro do dessecador, e levado para a estufa previamente a 30°C.

*Figura 2.6: Diagrama da montagem das amostras para ensaio de permeabilidade ao vapor. O conjunto de PVC foi usinado para ter sua massa reduzida para menos de 160g.*

Existem grandes dificuldades na realização deste experimento, a obtenção da amostra, obtenção de uma vedação perfeita, e o processo de pesagem. Deve-se considerar ainda o problema da grande espessura da amostra 11mm, o que faz com que o ensaio seja muito lento. Poder-se-ia diminuir a espessura da amostra através de lixamento da mesma, mas neste processo certamente a amostra apresentaria um fissuramento em face da fragilidade das cerâmicas quando expostas a vibrações e elevação de temperatura. O processo de lixamento descaracterizaria ainda a amostra, pois as superfícies da cerâmica apresentam uma estrutura porosa diferente de seu interior, em função do processo de prensagem e secagem das cerâmicas.

A *Figura 2.7* mostra a evolução da vazão em gramas/dia para o ensaio de permeabilidade. Foi descartada a região em que houve variação da temperatura da estufa. No período entre 120 dias de ensaio e 340 dias de ensaio, devem ter ocorrido pequenas variações na temperatura da estufa ora para cima, ora para baixo, de forma que considera-se que a temperatura média se manteve em 30°C.



*Figura 2.7: Evolução da vazão em gramas/dia, do ensaio de permeabilidade ao vapor.*

### 2.4.1 Determinação da difusividade isotérmica de umidade, através do ensaio de permeabilidade e do ensaio de adsorção

Com a curva de vazão e a curva de adsorção pode-se determinar a difusividade isotérmica de umidade da telha. Este processo é descrito abaixo:

O fluxo de líquido pelo material é dado pela lei de Darcy:

$$j = -\rho_l \cdot K(\theta) \cdot \frac{d\psi}{dx} \quad (2.4)$$

sendo:

$j(x) =$  Fluxo de líquido [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$K =$  Condutividade hidráulica [ $\text{m/s}$ ].

Função do conteúdo volumétrico de umidade ( $\theta$ ).

$\frac{d\psi}{dx} =$  Gradiente de potencial matricial ao longo da espessura da telha

A umidade relativa  $h$ , é relacionada com o potencial matricial pela expressão:

$$\psi = R \cdot T \cdot \ln h \quad (2.5)$$

Aplicando a regra da cadeia ao gradiente de potencial matricial,

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{d\psi}{dq} \cdot \frac{dq}{dx} \quad (2.6)$$

E substituindo em 2.4

$$j = -\rho_l \cdot K(\theta) \cdot \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial x} \quad (2.7)$$

Definindo o termo  $-K(\theta) \cdot \frac{\partial\psi}{\partial\theta}$  como a difusividade do material ( $D$ ),

$$j = \rho_l \cdot D \cdot \frac{dq}{dx} \quad (2.8)$$

Isolando a difusividade

$$D = \frac{j}{\rho_l \left[ \frac{dq}{dx} \right]} \quad (2.9)$$

Aplicando para a telha de espessura  $l$  e densidade  $\rho_t$ .



$$D = \frac{j}{r_l} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta q} = \frac{j}{r_l} \cdot \frac{(l-0)}{(w_2 - w_1) \cdot \frac{r_t}{r_l}} \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (2.10)$$

O ensaio de permeabilidade fornece o fluxo de líquido em gramas por segundo por metro quadrado. As superfícies da amostra estão em equilíbrio com a umidade mantida pelas soluções interna e externa, de forma que  $\Delta\theta = \theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}} = (w_{\text{int}} - w_{\text{ext}}) \cdot \rho_t / \rho_l$ . Os valores de  $w_{\text{int}}$  e  $w_{\text{ext}}$  são obtidos a partir do ensaio de adsorção,  $l$  é a espessura da amostra do ensaio de permeabilidade,  $\rho_l$  é a densidade do líquido a 30°C, e  $\rho_t$  a densidade da telha.

A Figura 2.8 apresenta a variação da difusividade com o conteúdo volumétrico de umidade da telha e da argamassa. Como a curva de adsorção apresenta resultado para  $h=22\%$  acima do observado para  $h=33\%$  e os resultados para  $h=22\%$  e  $h=75\%$  necessitam ser repetidos, adotou-se uma reta para estimar a curva de adsorção na região entre  $h=22\%$  a  $54\%$ . Esta reta está muito próxima dos valores do ensaio de adsorção, e serve melhor para o cálculo da difusividade.

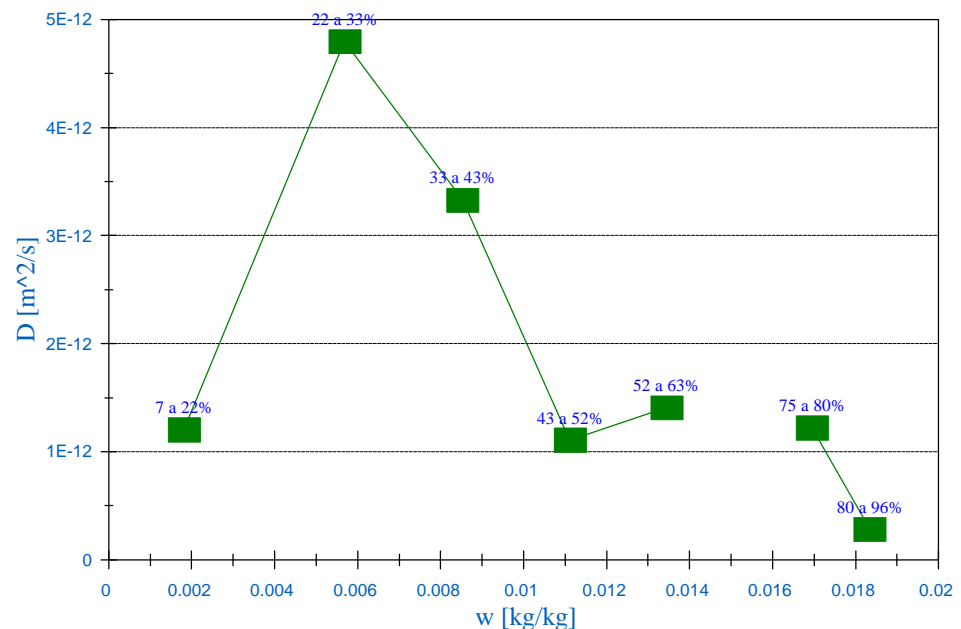


Figura 2.8 : Difusividade isotérmica de umidade da telha de cerâmica, calculada a partir do ensaio de permeabilidade ao vapor e do ensaio de adsorção.

Os valores de difusividade apresentados por esta figura são parciais, visto que há necessidade de se repetir o ensaio de adsorção para se ter uma idéia da variação dos resultados, e deve-se repetir o ensaio de permeabilidade com melhor controle da temperatura da estufa. De fato a determinação da difusividade é extremamente complexa, pois tanto o ensaio de adsorção como o de permeabilidade são demorados, e a obtenção das amostras e manuseio para o ensaio de permeabilidade são elementos que dificultam os ensaios.

A *Figura 2.9* mostra os dessecadores dentro da estufa.



*Figura 2.9: Dessecadores dentro da estufa. Em cima dessecadores utilizados nos ensaios de adsorção/dessorção, e embaixo dessecadores usados no ensaio de permeabilidade.*

## 2.5 CONCLUSÃO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Observe que o maior número de informações foi obtido com o ensaio de porosimetria a mercúrio, isto se deve a alta capacidade dos porosímetros atuais, que chegam a atingir uma pressão de injeção de 200Mpa atingindo poros de  $0.0062\mu\text{m}$ . Cobrindo a faixa de poros atingida pelas curvas de adsorção e dessorção.

Deve-se considerar entretanto que os ensaios de adsorção e dessorção estão mais próximos ao fenômeno de interação da telha de cerâmica com a umidade relativa do ar.

As curvas de adsorção mostram que o volume de líquido retido por capilaridade começa a ser importante para umidades acima de 80%.

Os resultados mostram que a telha de cerâmica tem os poros concentrados entre  $0.1\mu\text{m}$  e  $0.01\mu\text{m}$ .

A porosidade encontrada no ensaio comum foi de  $\eta = 0.331 \pm 0.014 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$  contra uma porosidade de  $\eta = 0.3114 \text{ [cm}^3/\text{cm}^3]$  no ensaio de porosimetria. Considera-se o valor de  $\eta = 0.331$  como mais representativo por ter sido obtido a partir de 10 amostras, enquanto o ensaio de porosimetria utilizou apenas uma amostra e de dimensões reduzidas.

A densidade encontrada no ensaio comum foi de  $\rho = 1.880 \pm 0.80 \text{ [g/cm}^3]$  contra uma densidade de  $\rho = 1.8298 \text{ [g/cm}^3]$  no ensaio de porosimetria. Novamente considera-se a densidade de  $\rho = 1.880$  como mais representativa. O ensaio de porosimetria serviu para consolidar estes resultados.

## Capítulo 3

# Ensaio de Campo: Determinação da Temperatura e do Conteúdo Mássico de Umidade de Telhas Expostas ao Meio Ambiente

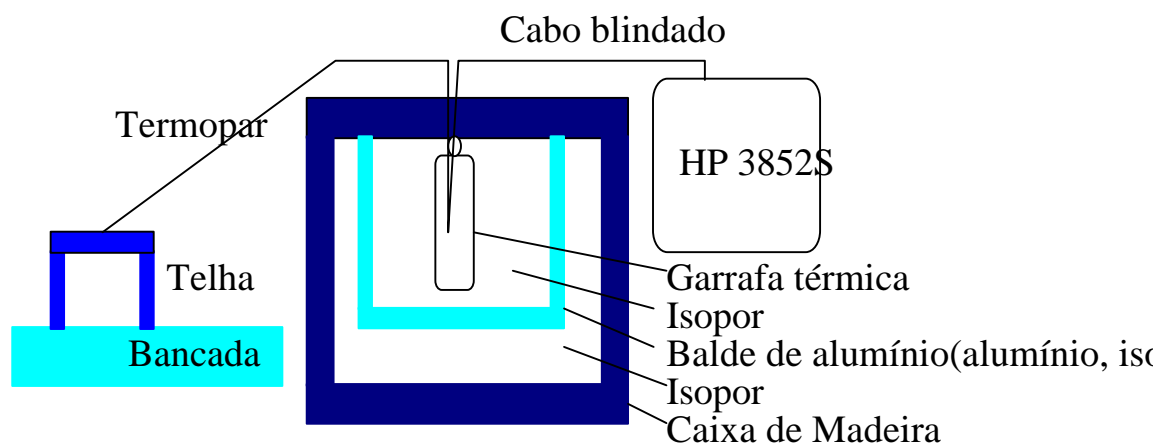
### ***3. ENSAIO DE CAMPO: DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA E DO CONTEÚDO MÁSSICO DE UMIDADE DE TELHAS EXPOSTAS AO MEIO AMBIENTE.***

O ensaio de campo consiste na determinação da temperatura e massa de um grupo de telhas expostas ao meio ambiente (com a determinação da massa das telhas pode-se determinar a variação do conteúdo de umidade das mesmas). Foram testados diferentes tipos de telhas; uma telha francesa, uma termoplan, telhas de argamassa, de cimento amianto e telhas de cerâmica tipo plan nas cores branca, vermelha e preta, sendo estas permeáveis ou impermeáveis. O objetivo principal é comparar o comportamento das telhas permeáveis versus impermeáveis, depois verificar a influência da cor das telhas e finalmente comparar a telha padrão com outros tipos de telhas.

As medições foram realizadas na cobertura do prédio antigo da Engenharia Mecânica na UFSC, ao lado dos equipamentos de medição climática do LABSOLAR.

Os termopares foram fixados no meio das telhas, numa profundidade de 8 mm, com cola do tipo cascorez e pó da própria telha. Não foram utilizados termopares com fixação superficial, pois os mesmos sofrem os efeitos radiativos, mascarando os resultados de temperatura. Os termopares usados são do tipo T (cobre-constantan). Os termopares são soldados em cabos blindados e mergulhados numa junta de referência, sendo a ponta dos cabos blindados conectadas ao sistema de aquisição de dados HP Data Acquisition 3852S. A incerteza na determinação das temperaturas é de 0.5°C. Para revisão do uso de termopares veja [31].

A Figura 3.0 mostra a montagem do ensaio de campo. A junta de referência mantinha a temperatura interna em 0°C por um período de 24 horas, após 24 horas trocava-se o gelo da junta de referência. A determinação da massa das telhas foi realizada com balança de resolução de 0.05g.



Junta de referência de temperatura.

*Figura 3.0: Esboço da montagem do ensaio de campo.*

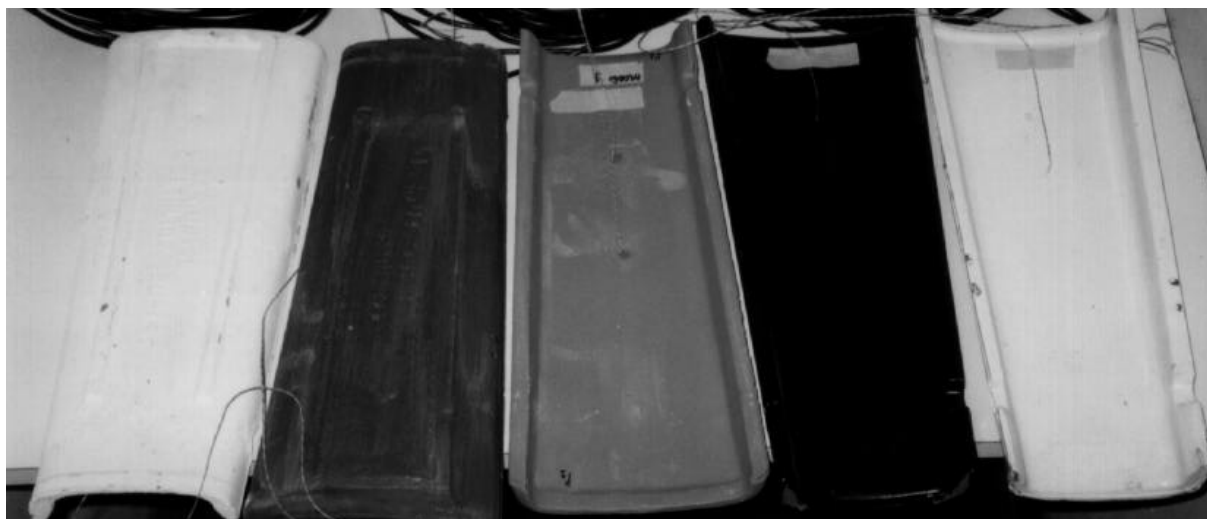
As telhas ficaram apoiadas numa bancada voltada para o norte, com uma inclinação de 5%, esta inclinação objetiva evitar o empoçamento de água nas telhas devido às suas saliências. Não existia qualquer proteção às telhas, as mesmas foram simplesmente apoiadas sobre um ripamento de madeira. A distância entre as telhas (bancada) e a cobertura do edifício é de aproximadamente 3m, e não existia qualquer mecanismo de controle das trocas de calor por radiação de onda longa entre as telhas e a cobertura do edifício.

A Figura 3.1 apresenta as telhas de argamassa e cimento amianto utilizadas no ensaio de campo. Observe que para as telhas de argamassa colocou-se um isolamento para reduzir as perdas de calor laterais. Observe ainda que os termopares eram fixados no centro das amostras. Foram utilizadas amostras de argamassa neste ensaio, porque já existem dados físicos deste material disponíveis; de forma que pode-se realizar simulações numéricas para comparação com os resultados do ensaio de campo.



*Figura 3.1: As telhas de argamassa e cimento amianto utilizadas no ensaio de campo.*

A Figura 3.2 apresenta as telhas cerâmicas do tipo plan nas diferentes cores. A telha P1 teve dois termopares. As três telhas à esquerda são permeáveis e as duas à direita impermeáveis.



*Figura 3.2: As telhas de cerâmica utilizadas no ensaio de campo.*

### 3.1. MEDIÇÃO 1: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA E CONTEÚDO MÁSSICO DE UMIDADE DAS DIFERENTES TELHAS ENSAIADAS

As medições foram realizadas no período de 1 a 15 de setembro de 1993. A medição 1 iniciou dia 04/09/93 às 15 horas e terminou dia 05/09/93 às 19 horas.

O programa de aquisição fazia a leitura das temperaturas das telhas a cada 5 minutos, eram feitas 10 medições de temperatura para cada telha e tirada e média.

A *Tabela 3.1* mostra a codificação das diferentes telhas utilizadas neste ensaio. Esta codificação é utilizada nas legendas das figuras com os resultados dos ensaios de campo.

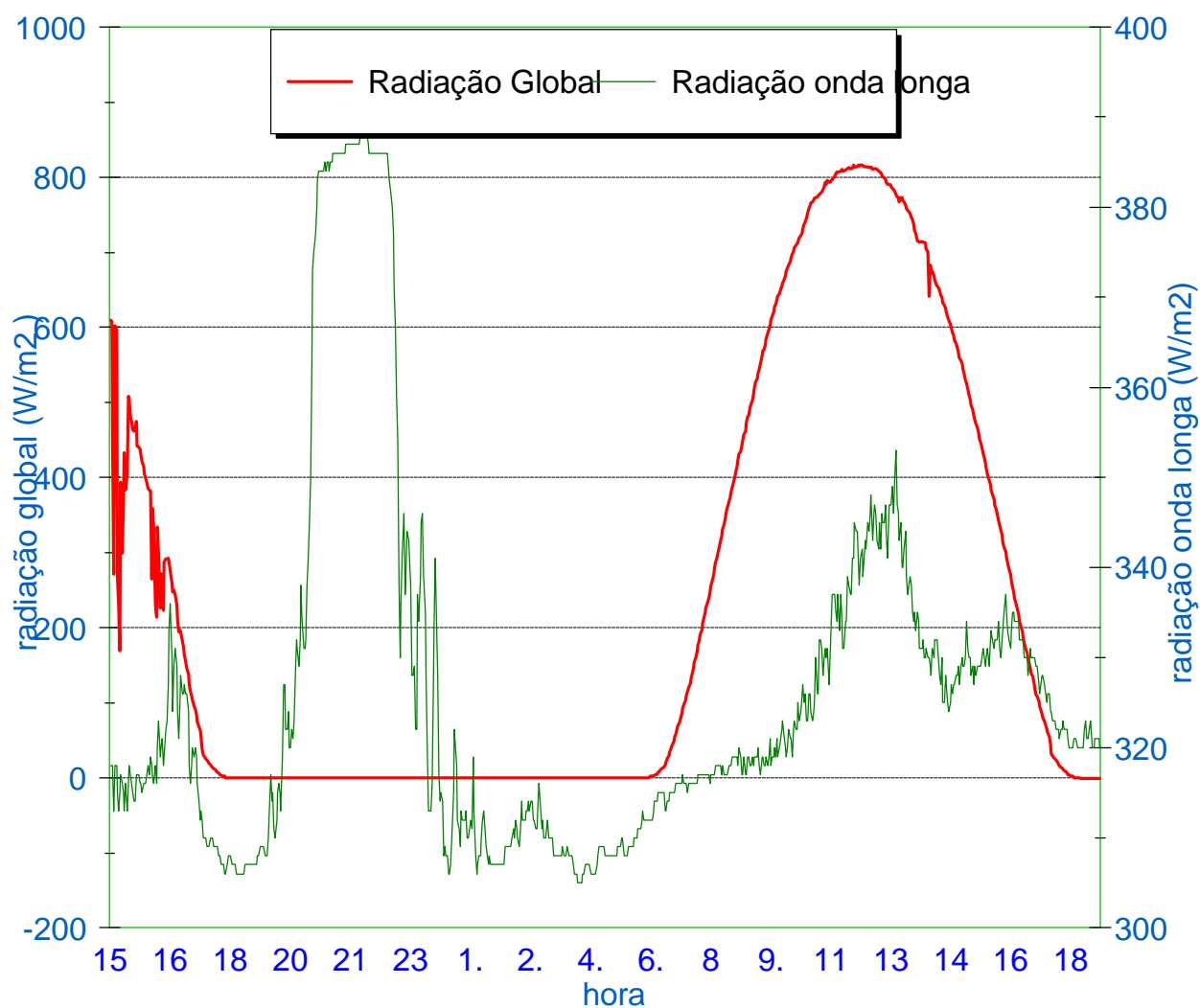
*Tabela 3.1: Amostras do ensaio de campo*

tipo de telha	cor com que foi pintada	permeável/ impermeável	código
tipo Plan	Natural (vermelha)	Permeável	P1 e P2
	Branca (cal)	Permeável	PBP
	Preta (cal+ pó xadrez)	Permeável	PPP
tipo Plan	Natural (vermelha)	Impermeável	PNI
	Branca (cal)	Impermeável	PBI
	Preta (cal com pó-xadrez )	Impermeável	PPI
Francesa	Natural (vermelha)	Permeável	FNP
Termoplan	Natural (vermelha)	Permeável	TNP
ARGamassa	Natural (cinza) Fina	Permeável	ARGNFP
	Branca (cal)	Permeável	ARGBP
	Natural (cinza)	Permeável	ARGNP
cimento AMianto	Branca (cal)	Impermeável	AMB
	Natural	Impermeável	AMN



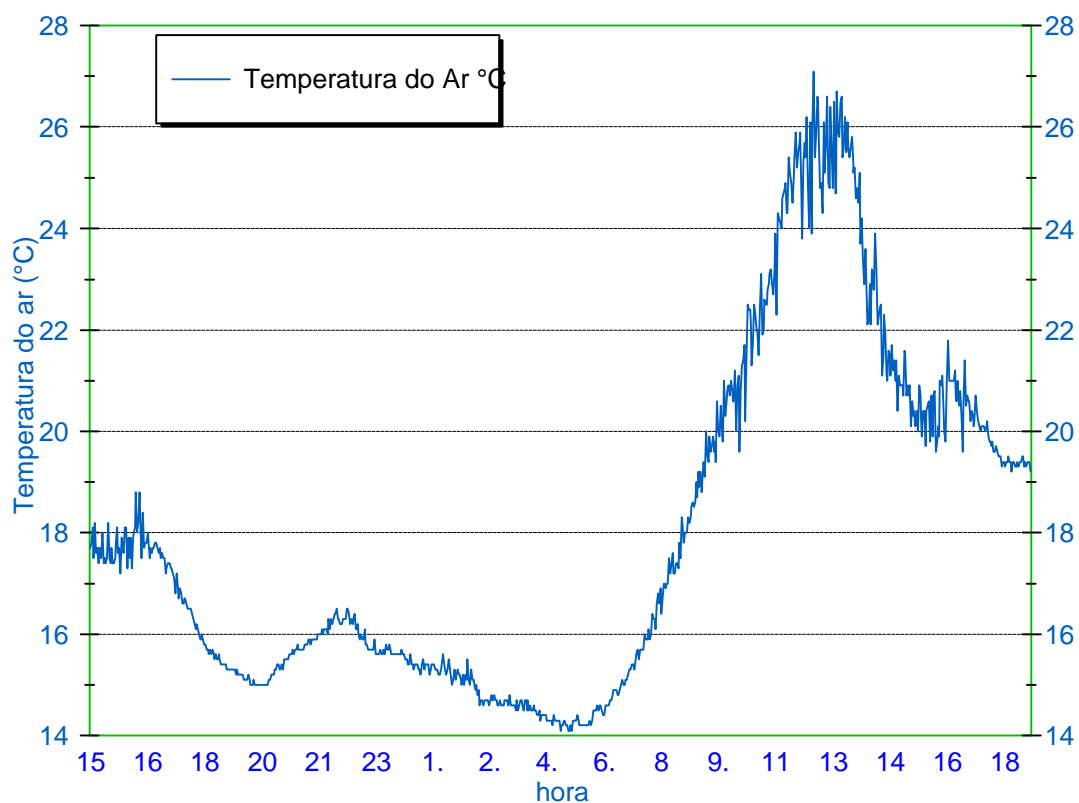
### 3.1.1. Dados climáticos da medição 1

Os dados climáticos foram obtidos junto ao LABSOLAR (Laboratório Solar) da UFSC. A *Figura 3.3* apresenta os dados de radiação de onda curta e onda longa, para o intervalo da medição 1. Pode-se observar que entre 20h e 23h ocorreu um aumento da energia radiante emitida do céu para a telha.



*Figura 3.3: Dados climáticos, radiação onda curta e onda longa para medição 1*

A Figura 3.4 apresenta os dados de temperatura do ar, observe a atípica elevação da temperatura entre 20h e 23h. Com a redução da perda de calor por radiação pela telha, e com o aumento da temperatura do ar, a telha tem sua temperatura elevada; e consequentemente a sua concentração de vapor, reduzindo o ganho de umidade pela telha neste período.

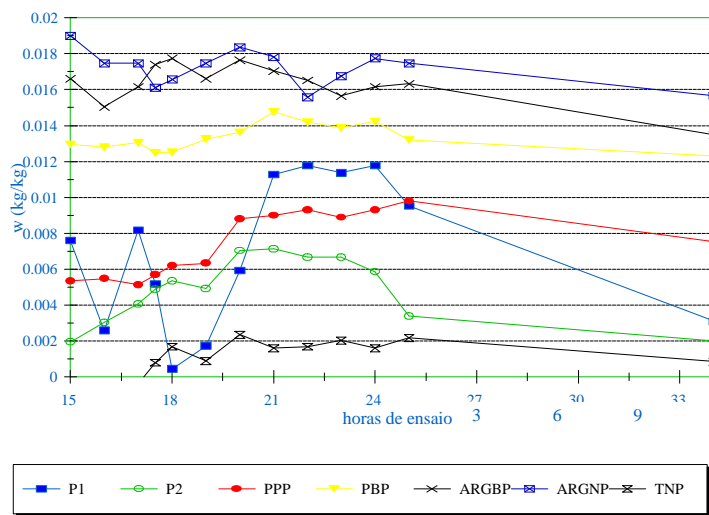


*Figura 3.4: Temperatura do ar para medição 1.  
Observe uma atípica elevação da temperatura noturna entre 20h e 23h.*

### 3.1.2. Valores de temperatura e conteúdo mássico de umidade para todas as telhas

A medição 1 iniciou no sábado às 15hs e terminou no domingo às 19hs.

A *Figura 3.5* apresenta os valores de conteúdo mássico de umidade, para todas as telhas permeáveis, a direita estão os valores de variação do conteúdo mássico de umidade. A principal observação é o maior ganho de umidade pela telha padrão 1 (P1), que teve uma variação do conteúdo de umidade de  $\Delta w=0.0087$  contra  $\Delta w=0.0051$  de P2. As simulações numéricas desenvolvidas no próximo capítulo indicam que uma telha de argamassa com porosidade e densidade semelhantes as da telha de cerâmica pode ter uma variação do conteúdo de  $\Delta w=0.09$  somente com as trocas de umidade. O ganho de umidade representado pela elevação do conteúdo de umidade de  $w=0.0005$  às 18h para  $w=0.0118$  às 24h corresponde a uma variação de 17g para P1 e a variação do conteúdo de  $\Delta w=0.0051$  corresponde a uma variação da massa em 10g para P2. Estes valores são pequenos e se devem a alta nebulosidade neste dia de medição, e a atípica elevação da radiação de onda longa, e temperatura do ar entre 20h e 23h. A diferença entre P1 e P2 se deve provavelmente as diferenças na sua estrutura porosa.



Amostra	Variação de w
---------	---------------

ARGNP	0.0027
-------	--------

*Figura 3.5: Evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 1*

A *Figura 3.6* apresenta a evolução das temperaturas para todas as telhas. Esta figura é apresentada para que se possa comparar o desempenho térmico das diferentes telhas ensaiadas. A primeira observação é a existência de três patamares de temperatura, bem definidos, as temperaturas mais altas são atingidas pelas telhas pretas, o segundo patamar para as telhas de cor natural (vermelha), e o terceiro patamar para telhas brancas. Ou seja a cor é fator essencial para o desempenho térmico das telhas, sendo aconselhável as cores claras para climas quentes.

A telha de maior interesse é a padrão 1 (P1). Para que se possa obter maiores informações deste ensaio, apresenta-se a seguir a temperatura das telhas em grupos e compara-se a temperatura das mesmas com a padrão 1.

Observe na *Figura 3.6*, que entre 20h e 23h, devido o aumento da radiação de onda longa do céu para a telha, e do aumento da temperatura do ar, ocorre uma elevação da temperatura de todas as telhas, reduzindo as trocas de umidade nas telhas permeáveis.

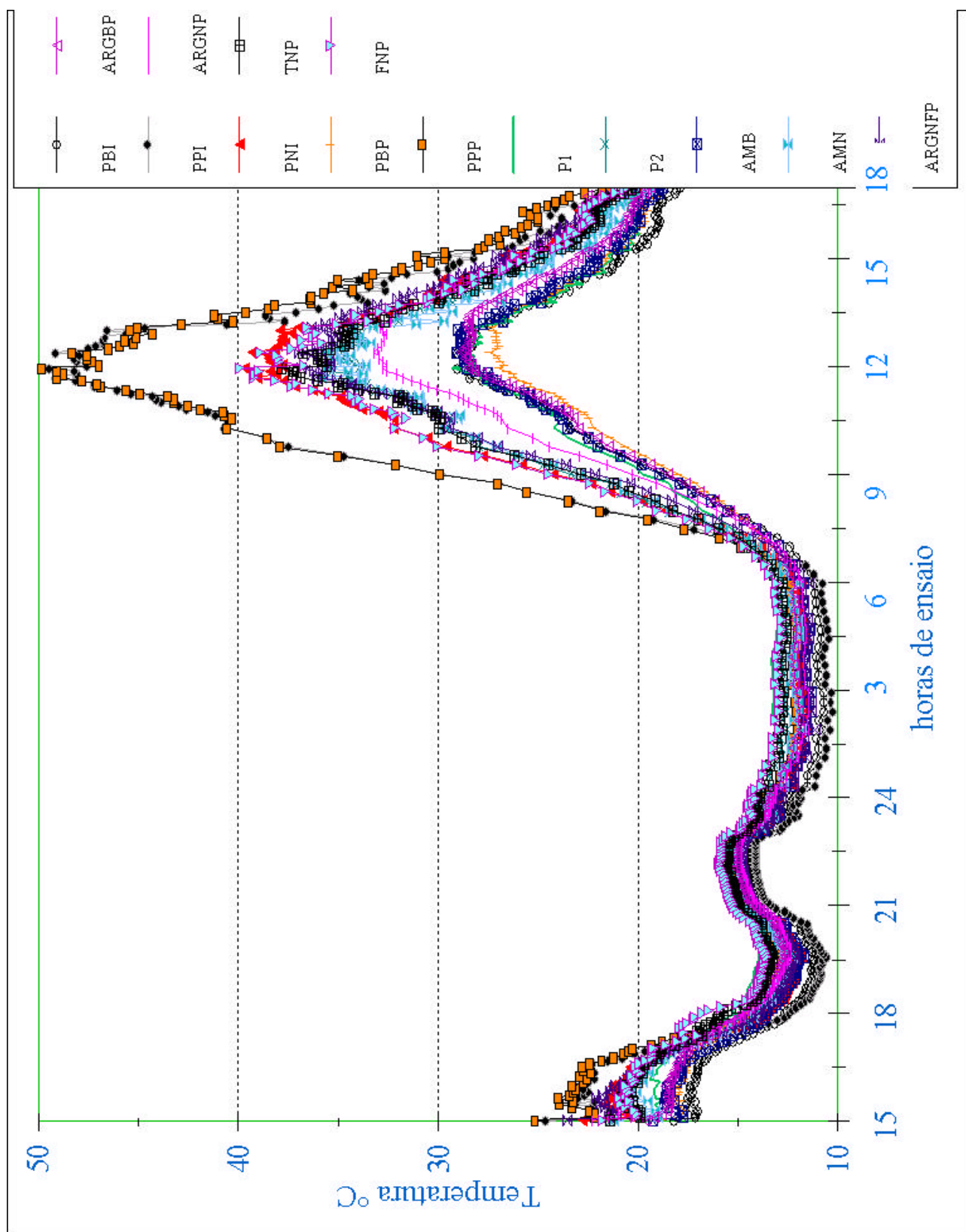


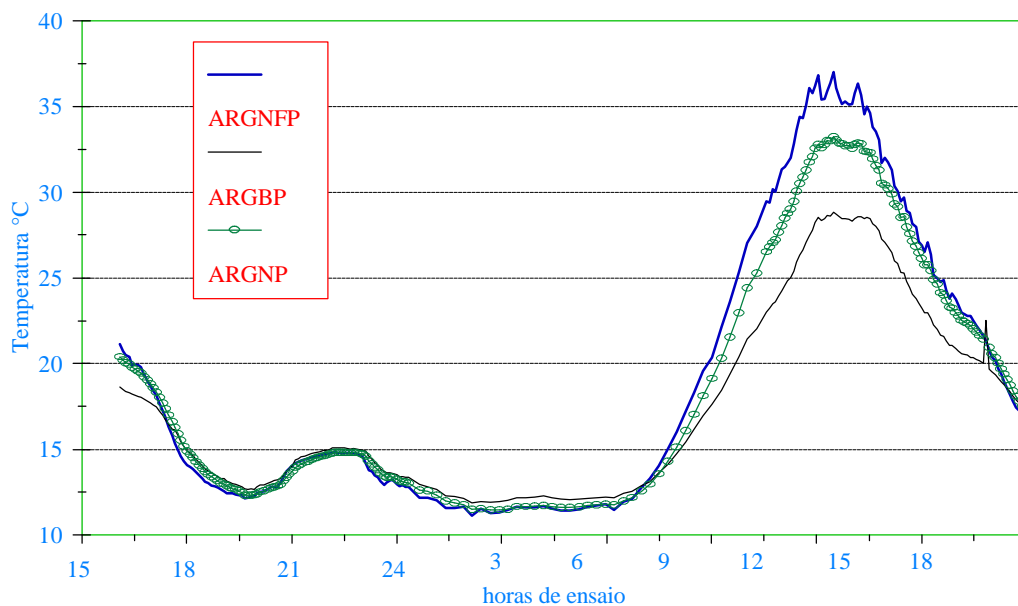
Figura 3.6: Evolução da temperatura para a medição 1, todas as telhas.

### **3.2. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DA TELHA CERÂMICA PERMEÁVEL EM RELAÇÃO AS TELHAS DE ARGAMASSA, CIMENTO AMIANTO, FRANCESA E TERMOPLAN**

#### **3.2.1. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação as de argamassa**

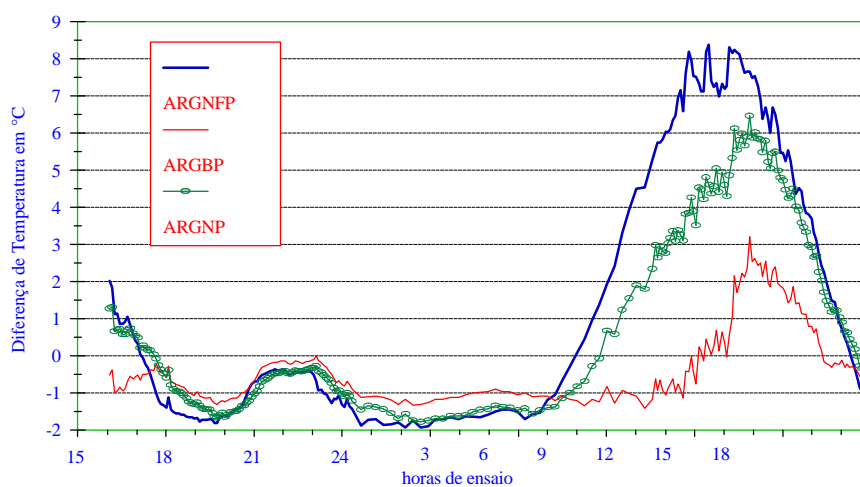
Foram confeccionadas no Laboratório de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Civil três amostras de argamassa. As mesmas tem dimensões 10X10cm, duas com 3cm e uma com 1.5cm de espessura. Para a realização do ensaio, as laterais das amostras foram isoladas com isopor, e impermeabilizadas com tinta impermeabilizante marca Hidronorte para reduzir as trocas de calor e umidade pelas laterais. Uma das amostras de 3 cm foi pintada de branco com cal. Nas figuras abaixo as legendas tem o significado ARGNFP (argamassa na cor natural fina permeável, 1.5cm), ARGBP (argamassa branca permeável, 3cm) e ARGNP (argamassa na cor natural permeável, com 3cm).

A *Figura 3.7* apresenta a evolução da temperatura para as três amostras. Pode-se observar que a amostra fina apresenta temperaturas maiores, atingindo os 37°C. Isto se deve à mesma ter menor capacidade térmica e menor volume para retenção de umidade, sofrendo maior impacto da radiação solar.



*Figura 3.7: Evolução da temperatura para telhas de argamassa.*

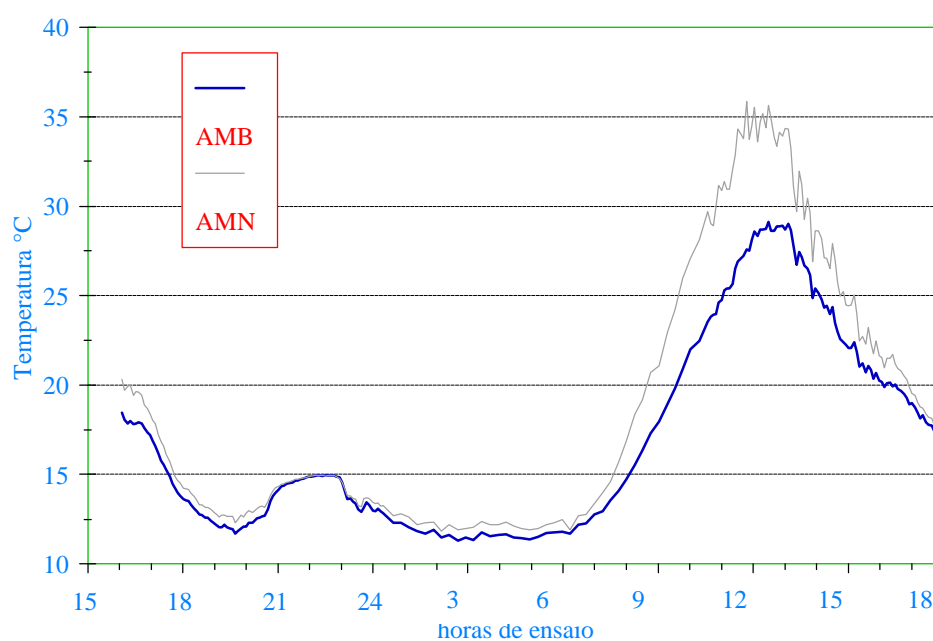
A Figura 3.8, apresenta as diferenças de temperatura das telhas de argamassa em relação à telha padrão 1. Observa-se que todas apresentam temperaturas noturnas menores que P1 e diurnas maiores. A telha de argamassa branca apresenta temperatura acima da telha P1, 2°C às 14h do segundo dia. A amostra fina chega a atingir 8°C acima de P1 às 12h e 2°C abaixo de P1 às 3h.



*Figura 3.8: Diferença de temperatura para telhas de argamassa em relação a P1.*

### 3.2.2. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação as de cimento amianto

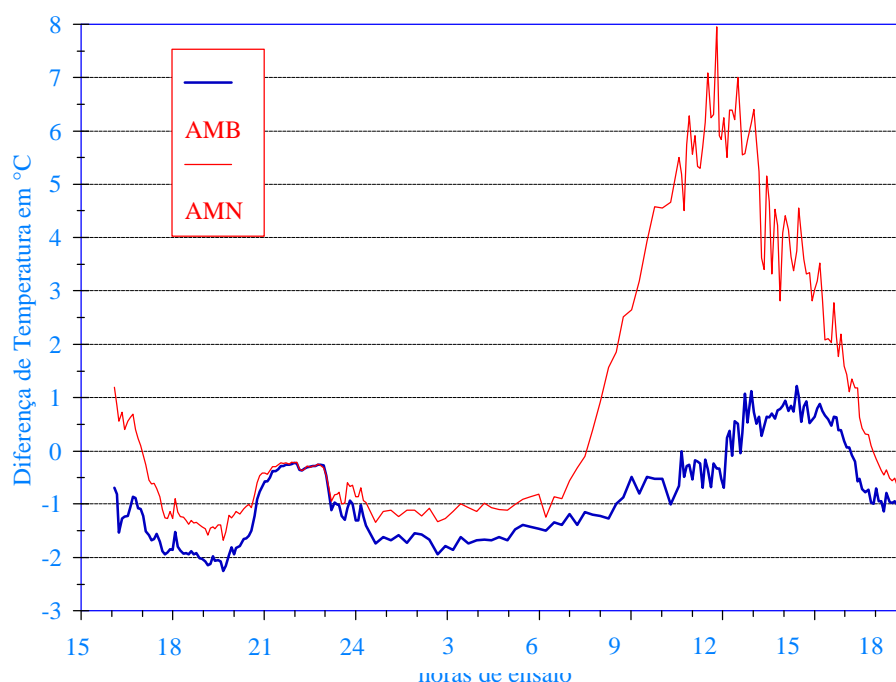
A *Figura 3.9* apresenta as temperaturas atingidas pelas telhas de cimento amianto, sendo uma normal e outra pintada de branco com cal. As amostras são novas não apresentando problemas de mudança de cor devido a presença de fungos ou sujeiras. As telhas atingiram 11°C (a normal) e 5°C (a branca).



*Figura 3.9: Evolução da temperatura para telhas de cimento amianto*



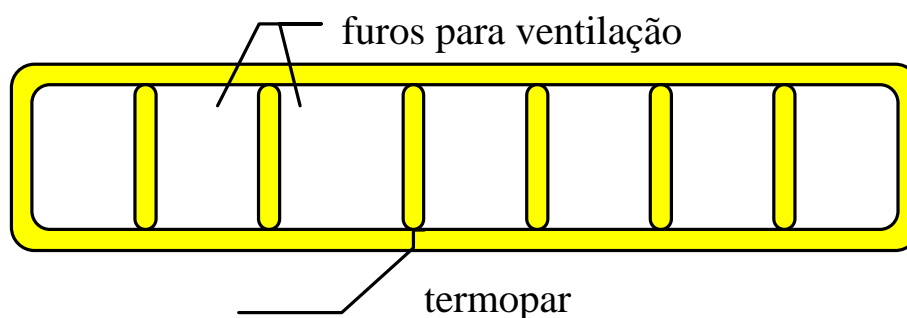
A *Figura 3.10* apresenta as diferenças de temperatura das telhas de cimento amianto em relação a telha padrão 1. Observa-se que as mesmas tem temperaturas noturnas menores e diurnas maiores. A telha de cimento amianto branca apresentou temperaturas diurnas maiores que P1 entre 12h e 16h do segundo dia. Deve-se salientar que as trocas de umidade nas telhas de cimento amianto são muito pequenas se comparada às ocorridas nas telhas de cerâmica.



*Figura 3.10: Diferença de temperatura para telhas de cimento amianto em relação a P1.*

### 3.2.3. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável em relação a francesa e a termoplan

A telha termoplan tem um processo de fabricação diferente: é extrudada enquanto as demais são prensadas. A telha termoplan apresenta duas camadas e no meio, uma câmara de ar. Veja a Figura 3.11, que mostra onde foi colocado o termopar.



*Figura 3.11: A telha termoplan é extrudada enquanto as demais são prensadas, o que permite a presença de furos para ventilação. Observe onde foi colocado o termopar.*

A telha termoplan tem uma variação do conteúdo de umidade menor, sofre uma influência muito grande da temperatura do ar e dos efeitos convectivos. Outro ponto importante a ser observado é que a face superior da termoplan está perdendo calor por radiação de onda longa para o céu, baixa sua temperatura e ganha umidade; como sua espessura é pequena, a quantidade de umidade ganha é pequena sendo facilmente removida por convecção.

Para que ocorra a saturação da telha termoplan, a umidade tem de percolar pelos apoios que unem as faces da telha, tendo assim menor área de avanço da frente de molhamento. Estando a telha termoplan saturada a mesma perde umidade muito rapidamente, pois a superfície em contato com o ar externo é de 2 a 3 vezes maior que as outras telhas.

As diferenças de desempenho, observadas entre a telha termoplan e as do tipo plan se devem a diferença no processo de fabricação das mesmas, a composição do material utilizado na sua fabricação, ao processo de queima, e a forma das mesmas.

Em função do processo de fabricação por exemplo, a telha extrudada terá uma porosidade superficial, bem como uma permeabilidade superficial diferente da telha prensada. Para compreensão destas diferenças é necessário entretanto o desenvolvimento de ensaios de laboratório com o objetivo de determinar propriedades como densidade, conteúdo de umidade na saturação e permeabilidade da telha termoplan.

A Figura 3.12 apresenta as temperaturas das telhas termoplan e francesa.

A Figura 3.13 apresenta as diferenças de temperatura das telhas termoplan e francesa em relação a P1. A telha francesa apresenta temperaturas próximas às da telha plan natural impermeável (PNI).

A telha termoplan apresenta valores de temperatura abaixo da telha francesa cerca de  $0.3^{\circ}\text{C}$  no período noturno e  $1.2^{\circ}\text{C}$  no período diurno entre 10h e 12h. As diferenças em relação a P1 são maiores atingindo o pico de  $11.3^{\circ}\text{C}$  às 12h. Na medição 1 os resultados apresentados para a telha termoplan estão muito próximos a telha francesa, e acima da padrão 1. Isto indica que esta telha não apresenta melhor desempenho térmico, nas condições em que os ensaios foram realizados.

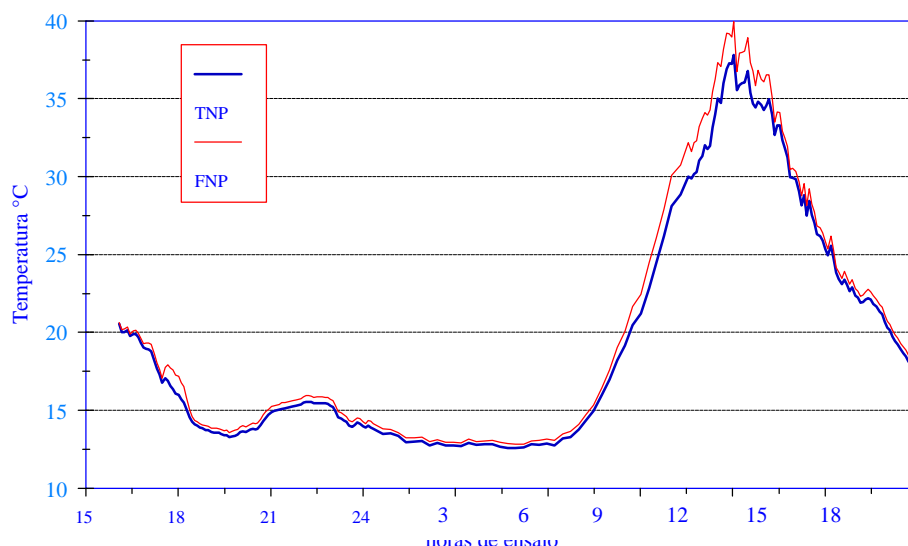


Figura 3.12: Evolução da temperatura para telhas francesa e termoplan

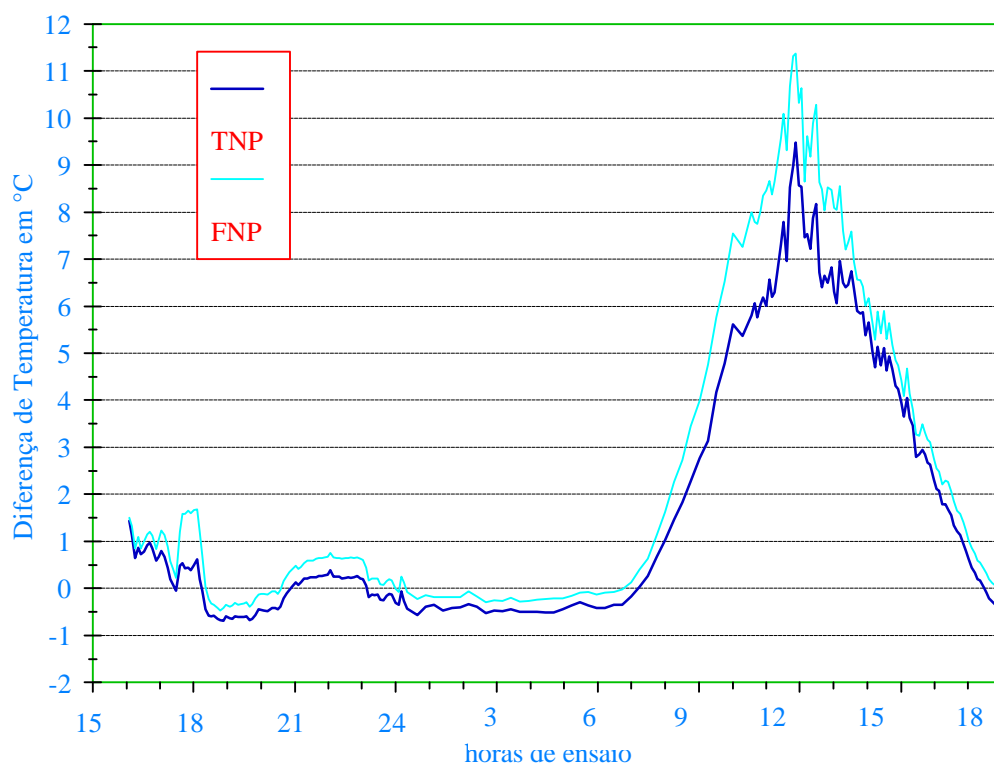


Figura 3.13: Diferença de temperatura para telhas francesa e termoplan em relação a PI.

### **3.3. COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DA TELHA CERÂMICA PERMEÁVEL EM RELAÇÃO ÀS IMPERMEÁVEIS NAS CORES NATURAL, VERMELHA E PRETA**

Apresenta-se abaixo a comparação dos perfis de temperatura para as telhas cerâmicas permeáveis e impermeáveis nas diferentes cores.

#### **3.3.1. Comparação dos perfis de temperatura de todas as telhas cerâmicas permeáveis**

A *Figura 3.5* mostra a evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 1, para todas as telhas permeáveis, onde pode-se observar que a telha padrão 1 absorveu mais umidade que as demais.

A *Figura 3.14* apresenta os valores de temperatura para as telhas plan, permeáveis e impermeáveis nas diferentes cores.

Com o início da manhã e da radiação solar, as telhas permeáveis começam a secar, e neste processo parte da energia solar é gasta na evaporação da umidade incorporada à noite.

Destaca-se ainda o comportamento atípico da evolução da temperatura noturna, que tem uma elevação entre às 21-23 horas. Este comportamento atípico somado a nebulosidade noturna, ocasionou a redução das trocas de umidade nas telhas permeáveis, a massa ganha pelas telhas neste dia foi de 10-17g quando o esperado seria de 60-100g para uma noite de céu claro (baseado nas simulações numéricas).

Como as telhas permeáveis nas cores preta e branca foram pintadas com cal+pó xadres e cal respectivamente, a sua permeabilidade foi alterada, desconsidera-se entretanto nas comparações que serão apresentadas estas diferenças.

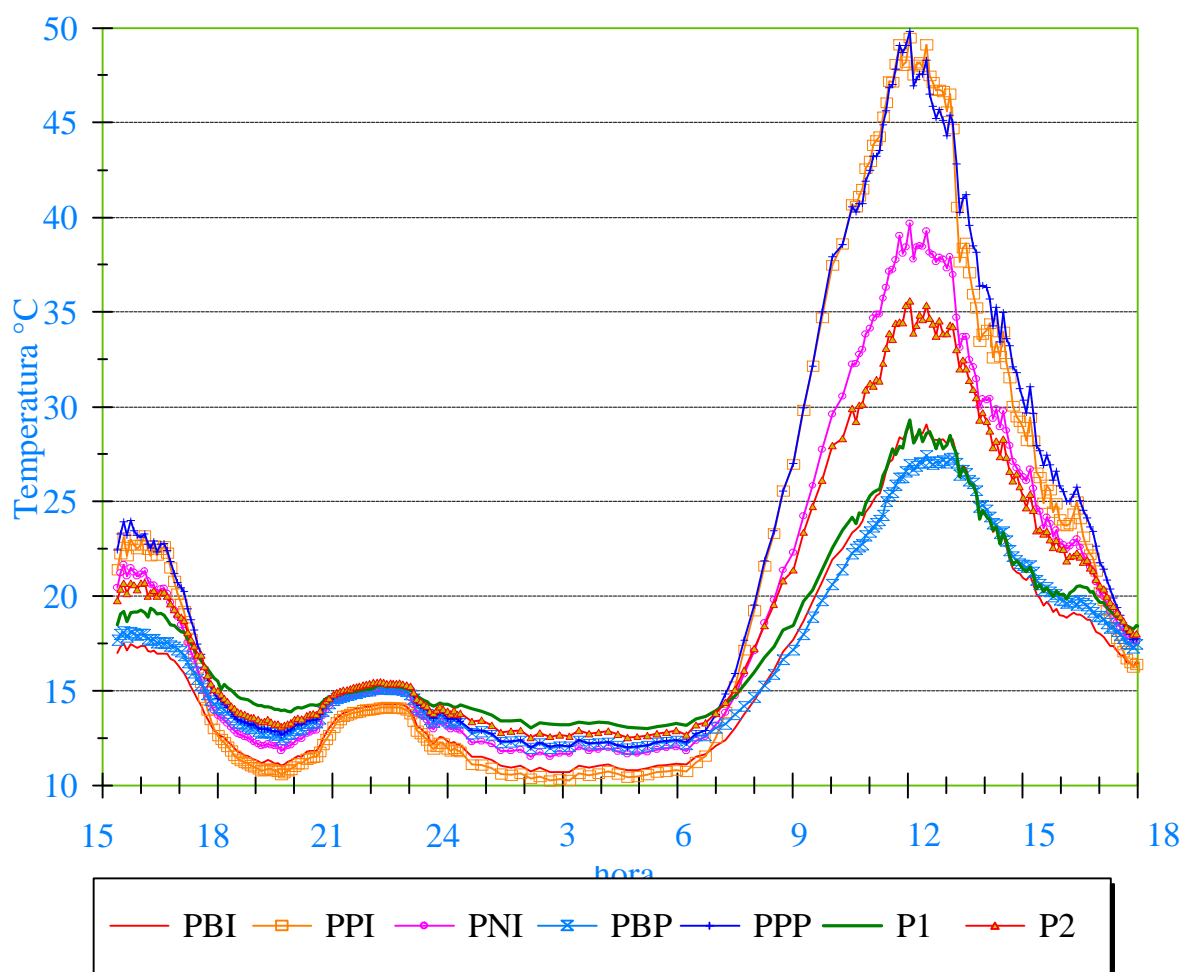
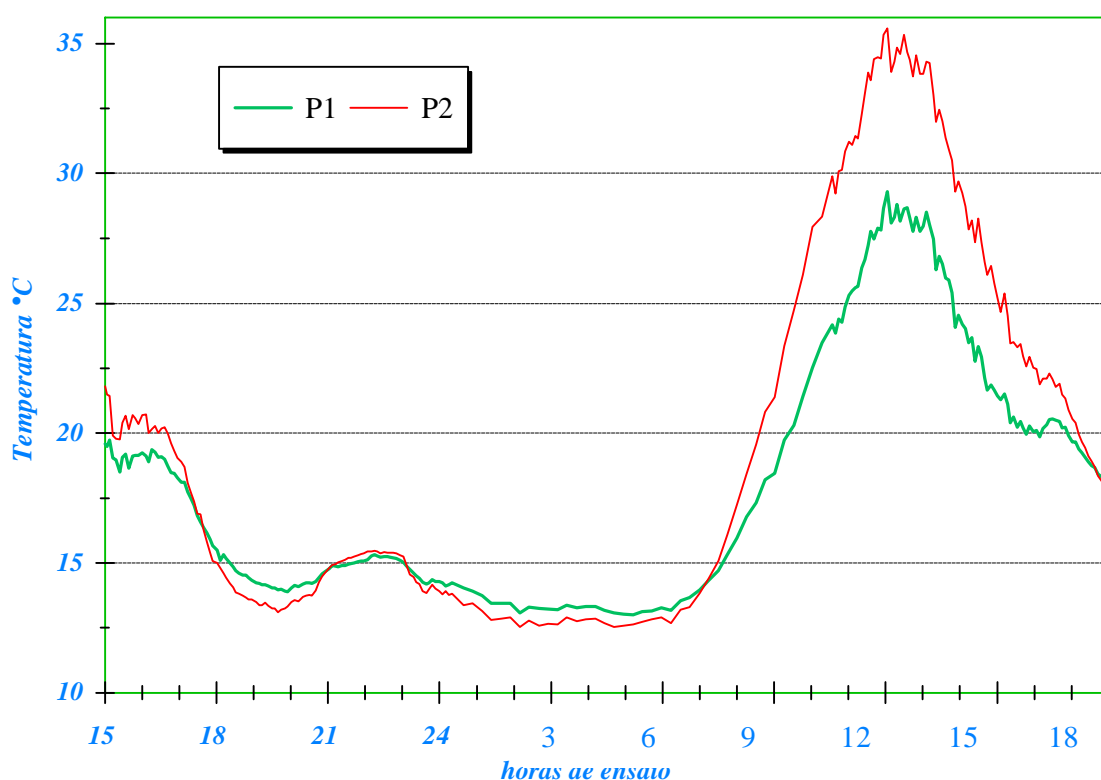


Figura 3.14: Evolução da temperatura para todas as telhas tipo plan, permeáveis e impermeáveis, nas cores branca, vermelha e preta.

### 3.3.2. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável Padrão 1 versus Padrão 2

A *Figura 3.15* apresenta a comparação das temperaturas entre P1 e P2. As temperaturas das duas telhas PNP (padrão 1 e 2) são ligeiramente diferentes no período noturno, isto ocorre porque a telha padrão 1 absorveu 17g de água contra 10g da padrão 2, ficando com temperatura ligeiramente superior no período noturno.

Estas diferenças de temperatura ocorrem pelo fato de as duas telhas terem possivelmente uma estrutura porosa diferente. As duas estavam localizadas uma ao lado da outra.



*Figura 3.15: Evolução da temperatura para telha padrão 1 e padrão 2.*

### 3.3.3. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável e impermeável preta

A Figura 3.16 apresenta as temperaturas atingidas pelas telhas tipo plan na cor preta. A telha preta permeável (PPP) apresenta temperatura noturna maior que a telha plan preta impermeável (PPI), mas as temperaturas diurnas são praticamente as mesmas. Isto evidencia, primeiro, que o efeito da radiação é o elemento que exerce maior influência nestas telhas. Segundo, que as diferenças de temperatura entre as telhas permeáveis e impermeáveis se reduzem de dia. Desta forma o efeito de ganho de desempenho térmico (menor temperatura diurna) devido ao fato de a telha ser permeável praticamente não ocorre nas telhas pretas, em face da radiação exercer uma influência muito maior sobre o comportamento destas telhas.

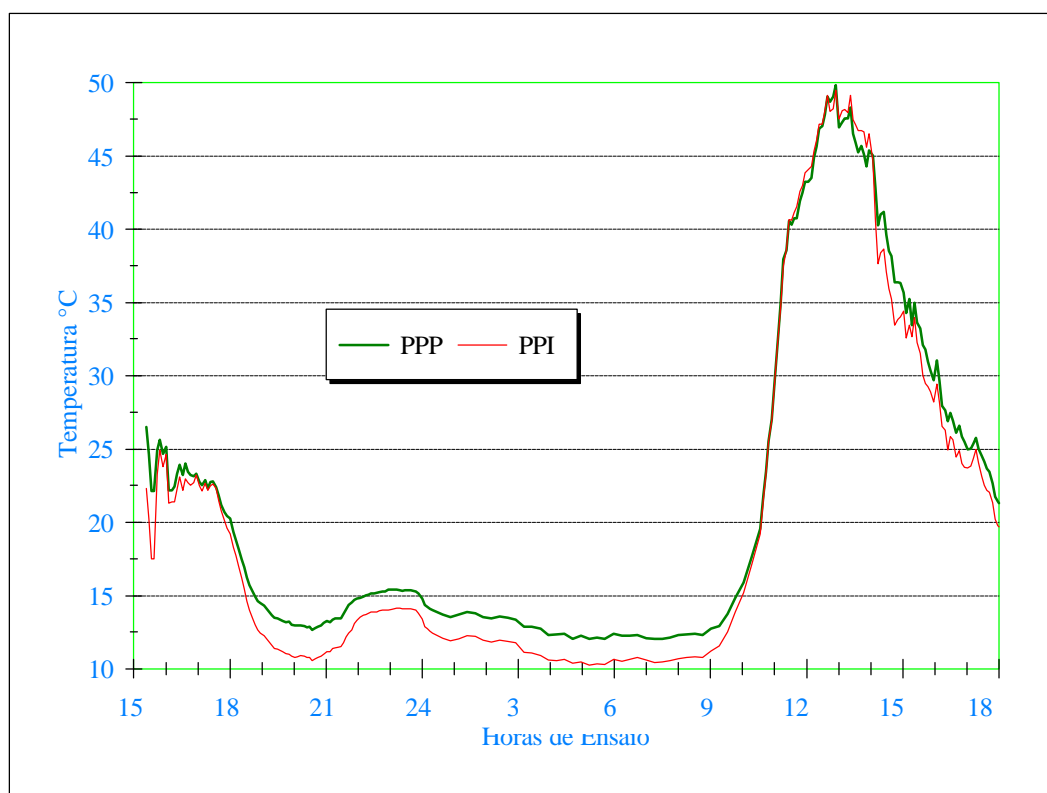


Figura 3.16: Evolução da temperatura para telha plan preta permeável e impermeável.



A Figura 3.17 apresenta as diferenças de temperatura para as telhas plan pretas em relação a telha P1.

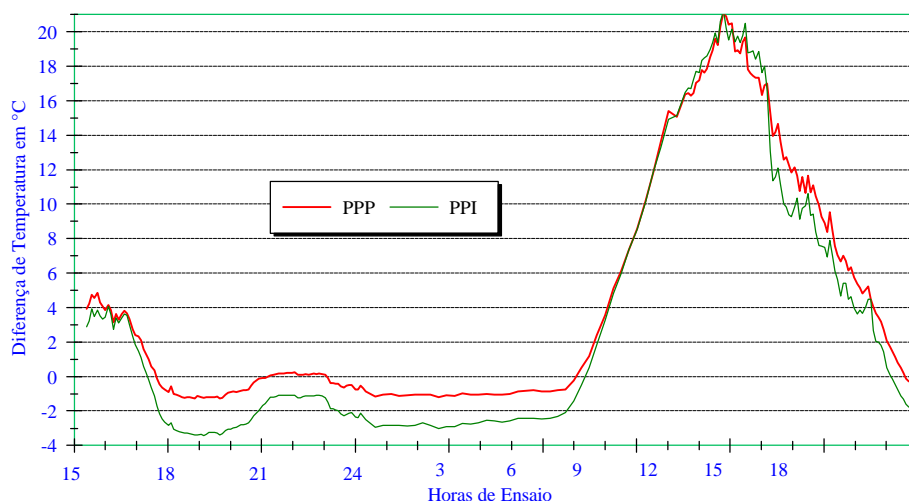


Figura 3.17: Diferença de temperatura para telha plan preta em relação a P1.

### 3.3.4. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável e impermeável branca

A Figura 3.18 apresenta os valores de temperatura para as duas telhas plan na cor branca, sendo uma permeável e outra impermeável. Observa-se novamente que a telha permeável apresenta temperaturas noturnas maiores e diurnas menores. As temperaturas atingidas pelas telhas brancas são muito menores que todas as demais o que demonstra a importância da cor do material.

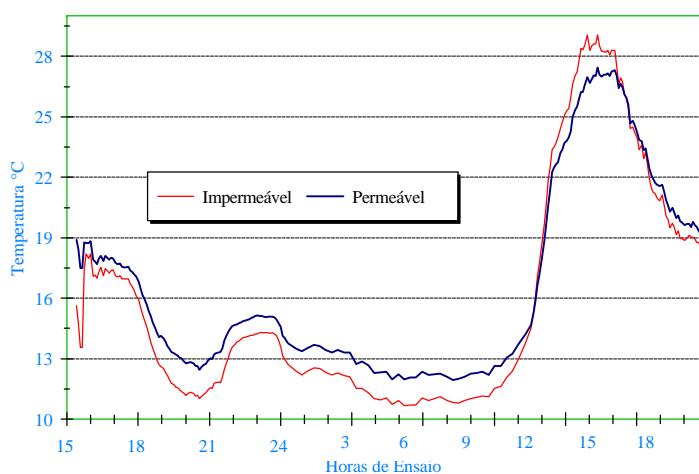


Figura 3.18: Evolução da temperatura para telha plan branca permeável e impermeável.

A Figura 3.19 apresenta as diferenças de temperatura em relação a P1, as duas telhas brancas tem temperaturas menores que P1 ao longo de todo o dia, com exceção do trecho entre 15h e 16h do segundo dia.

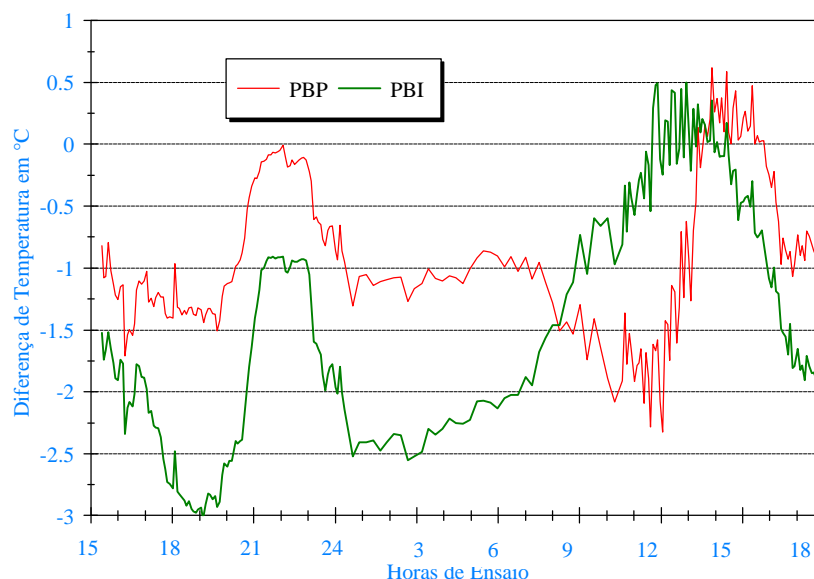
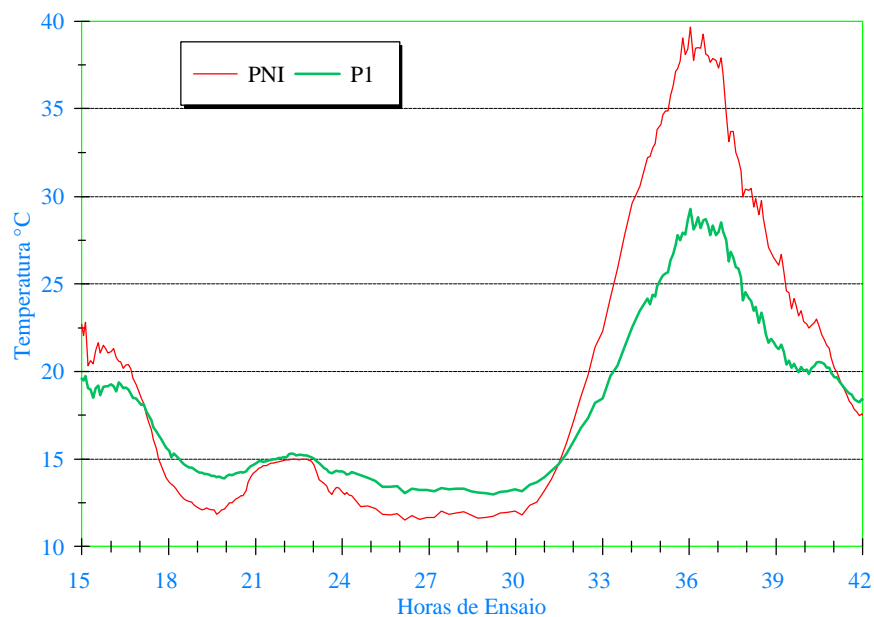


Figura 3.19: Diferença de temperatura para telha plan branca em relação a P1.

### 3.3.5. Comparação dos perfis de temperatura da telha cerâmica permeável e impermeável vermelha

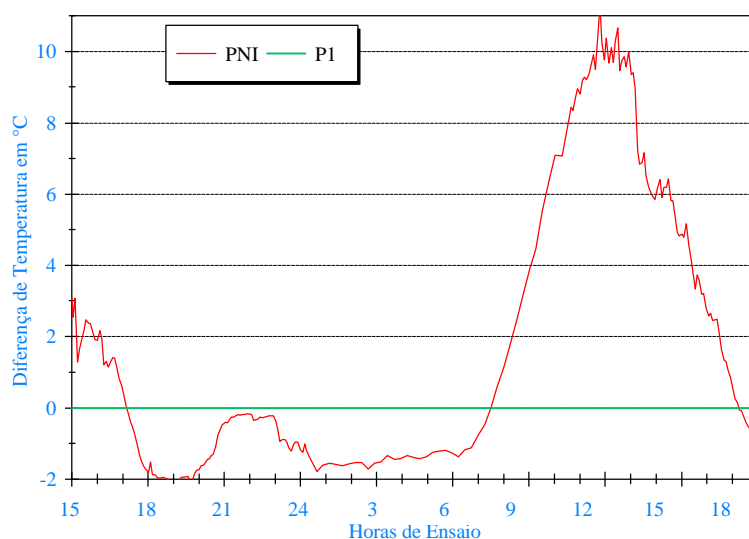
Analisando as temperaturas no início do ensaio às 15 horas (Figura 3.20), verifica-se que a telha plan natural impermeável (PNI) apresenta valores de temperatura ligeiramente superior que a telha plan permeável (P1). No período noturno a telha PNI não absorve umidade, ficando com a temperatura menor, já a telha PNP absorve umidade do ar e tem um aumento de sua temperatura noturna (entre 18-7h).

Na Figura 3.20 verifica-se ainda que a temperatura da telha PNI (impermeabilizada) é maior ao longo de todo o período diurno, atingindo os 38 °C, já a telha PNP atinge 28 °C.



*Figura 3.20: Evolução da temperatura para telha plan vermelha permeável e impermeável.*

A *Figura 3.21* mostra a diferença de temperatura entre a telha plan vermelha permeável (P1) e impermeável (PNI).



*Figura 3.21: Diferença de temperatura para telha plan vermelha permeável e impermeável.*

### 3.4. MEDIÇÃO 2: EFEITOS DA CHUVA

A medição 2 iniciou dia 07/09/93 às 17 horas e terminou dia 08/09/93 às 15 horas.

Apresenta-se a *Figura 3.22*, que mostra a evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 2 e a *Figura 3.23*, que mostra a evolução da temperatura para a medição 2. Entre 17h e 23h a variação do conteúdo é desprezível. Isto se deve ao fato de ter-se uma noite nublada em que as trocas de radiação de onda longa são muito pequenas.

Às 23 horas e 45 minutos ocorreu a primeira chuva, que ocasionou um aumento do conteúdo mássico de umidade de  $w=0$  para  $w=0.06$  (em média). Esta chuva teve uma duração de 5 minutos. A temperatura das telhas com esta chuva caiu cerca de  $1^{\circ}\text{C}$ . Entre 23 horas e 45 minutos do primeiro dia e 3 horas do segundo dia, não voltou a chover e o conteúdo mássico de umidade nas telhas caiu para  $w\approx 0.05$ .

Às 5 horas (da manhã) voltou a chover, agora com mais intensidade, a redução na temperatura das telhas foi de  $2^{\circ}\text{C}$ , e o conteúdo de massa passou para  $w=0.1$  (em média). Após às 5 horas continuou a garoar até às 31 horas, o que representou novo patamar na evolução do conteúdo. Às 9 horas da manhã voltou a chover, uma chuva fraca mas que durou o resto do dia. Às 13 horas do segundo dia as telhas saturaram, o que pode ser verificado por inspeção.

As principais conclusões que se tira desta segunda medição é que com a chuva as telhas podem se saturar, e que a temperatura de todas as telhas ficam mais próximas da temperatura da chuva.

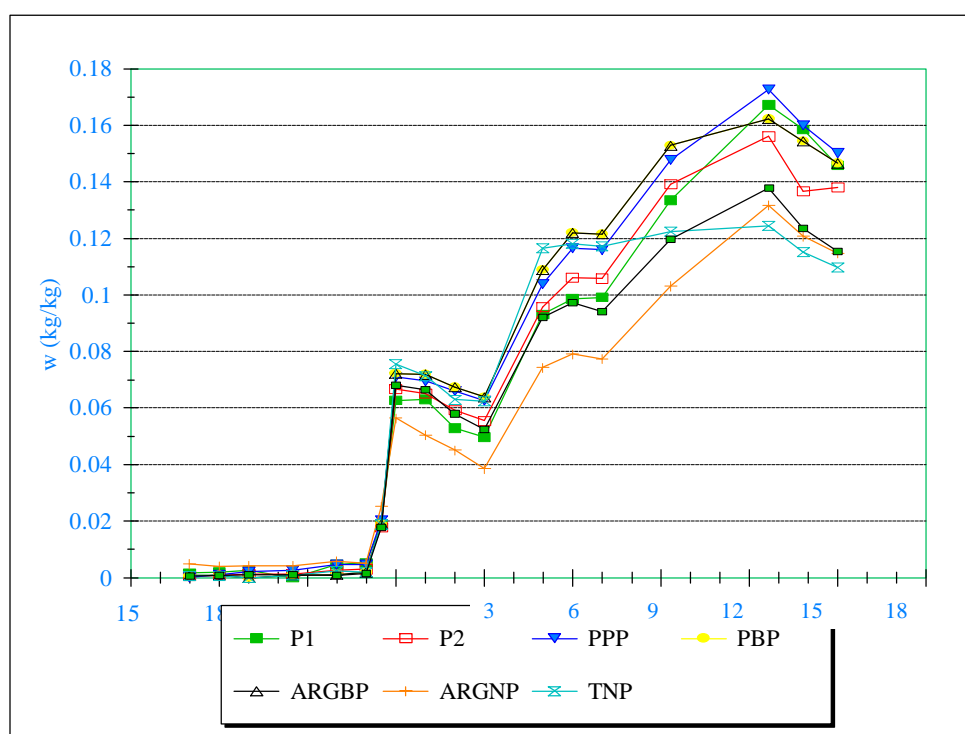


Figura 3.22: Evolução do conteúdo mássico de umidade para a medição 2.

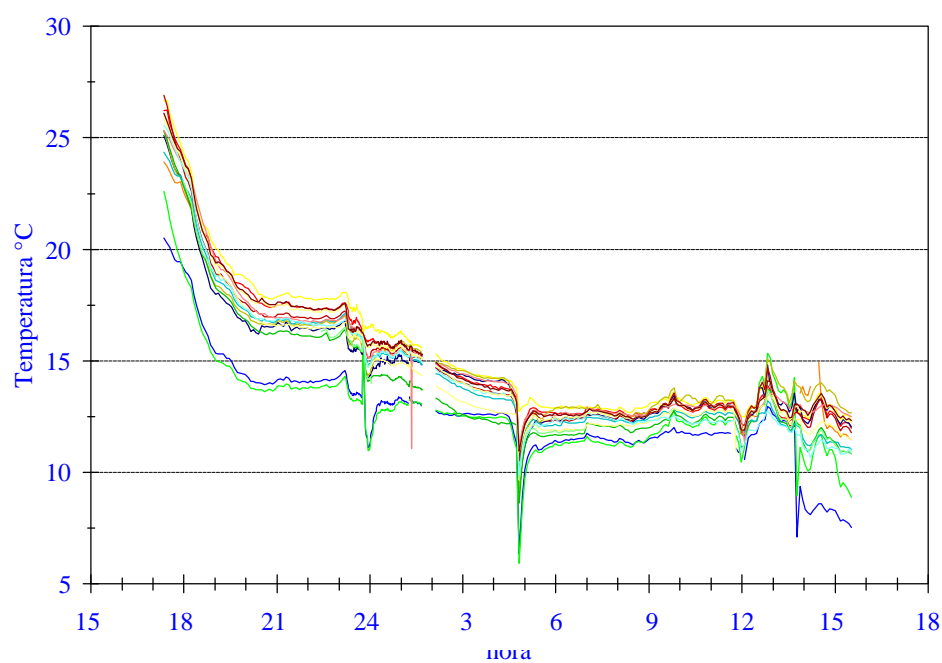


Figura 3.23: Evolução da temperatura para a medição 2.

### 3.5. CONCLUSÕES DO ENSAIO DE CAMPO

Através deste ensaio pode-se concluir que as telhas permeáveis absorvem umidade no período noturno devido a dois processos principais:

- Primeiro, à perda de calor por radiação em onda longa através da janela atmosférica, que faz com que a temperatura superficial da telha fique abaixo da temperatura de orvalho, e neste processo a telha ganhe umidade do ar.
- Segundo, no período diurno, a incidência da radiação solar eleva a temperatura da telha para valores acima da temperatura do ar, elevando a densidade de vapor na telha para valores acima da densidade de vapor no ar, de forma que a telha perde umidade. Esta perda de umidade devido a radiação solar, vai ser recuperada, quando o sol se por. Pois, quando o sol se põe a temperatura da telha volta a ficar igual a temperatura do ar. Ou seja ocorre absorção da umidade que foi perdida devido a radiação solar.

Observa-se então que mesmo em dias nublados (em que não ocorrem perdas de calor por radiação em ondas longas) ocorre variação do conteúdo de umidade da telha em função unicamente da radiação solar.

Pode-se ainda fazer uma comparação das trocas de umidade para as telhas nas diferentes cores, para o período diurno. Para as telhas pretas as diferenças de temperatura entre a telha permeável e impermeável é muito pequena  $\approx 0^{\circ}\text{C}$  isto se deve ao fato da radiação exercer uma influência maior sobre o processo de transferência de calor nas telhas pretas. As diferenças de temperatura aumentam para as telhas vermelhas chegando a  $9^{\circ}\text{C}$ , existe uma combinação dos efeitos de radiação e de absorção de umidade pela telha. Para as telhas brancas as diferenças de temperatura diurna chegam a  $2^{\circ}\text{C}$ , como a telha é branca os efeitos radiativos são menores, sendo menores as trocas de umidade.

Para a medição 1, os ganhos de umidade teriam sido maiores se não tivesse ocorrido a atípica elevação da temperatura do ar e a atípica elevação da emissão de calor por radiação em ondas longas do céu para a telha.

O fenômeno observado para as telhas permeáveis, de terem maior temperatura noturna e menor temperatura diurna em relação as telhas impermeáveis, ou seja menor amplitude térmica, foi observado para todos os tipos de telhas nas diferentes cores.

As diferenças entre as telhas P1 e P2 ocorrem possivelmente devido a diferenças na estrutura porosa das mesmas, como porosidade, e densidade. Estas diferenças ocorrem devido a falta de controle de qualidade no processo de fabricação das telhas.

Extrapolando estes resultados para um período de verão, em que a radiação solar é maior, e as noites são menos nubladas [47]. As trocas de umidade serão maiores tanto pela maior radiação solar, como em função das maiores perdas de energia por radiação em ondas longas. Ou seja em um dia de verão as telhas permeáveis apresentarão um desempenho térmico ainda melhor que as impermeáveis.

Para a segunda medição, destaca-se a importância das chuvas. Ficou demonstrado que as telhas têm um ganho de massa muito maior com as chuvas do que o observado com as trocas de umidade (A telha pode se saturar, sem que ocorra elevação da temperatura, pois não ocorre mudança de fase) e durante todo o intervalo de tempo necessário para que a massa de líquido incorporada pela chuva seja evaporada, a temperatura da telha permeável é menor que a temperatura da telha impermeável.

Os resultados do ensaio de campo, abrem a possibilidade do desenvolvimento de uma telha cerâmica com melhores propriedades térmicas, isto seria possível alterando-se propriedades físicas das telhas como a densidade, porosidade, geometria e cor, além da constituição granulométrica (constituição granulométrica é a distribuição do tamanho das partículas usadas na fabricação do material).

## Capítulo 4

# Balanço de Massa e Energia Para a Telha Exposta ao Meio Ambiente



## 4. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA PARA A TELHA EXPOSTA AO MEIO AMBIENTE

Discute-se neste capítulo o balanço de massa e energia para a transferência de umidade e calor em telhas expostas ao ambiente externo.

Apresenta-se as equações diferenciais que regem os fenômenos físicos envolvidos e o algoritmo numérico escolhido para a solução do sistema de equações (TDMA). Apresenta-se ainda as condições de contorno (balanço de massa e energia) para os volumes de controle 1, e n, e a discretização das equações para os pontos 1, i e n.

### 4.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Descreve-se abaixo as equações diferenciais que regem a transferência de massa e de energia. A equação da transferência de massa tem como variável o conteúdo volumétrico de umidade e a energia, a temperatura.

As equações da transferência de calor e umidade em meios porosos desenvolvidas por Philip e De Vries [28], sem os termos gravitacionais, são dadas por:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \nabla(D_q \cdot \nabla q) + \nabla(D_T \cdot \nabla T) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{r}_{t,sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (I \cdot \nabla T) - l_v \cdot \nabla(D_{q,v} \nabla q) \quad (4.2)$$

Onde:

$I$	Condutividade térmica aparente do material	[W/m.°C]
$\mathbf{r}_{t,sec}$	Densidade volumétrica do material seco	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_t$	Calor específico do material	[J/kg.°C]

$c_l$	Calor específico da água	[J/kg.°C ]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura do material	[°C ].
$q$	Conteúdo volumétrico de umidade	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$w$	Conteúdo mássico de umidade	[kg/kg]
$D_q$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade	[m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de temperatura	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{q,v}$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade na fase vapor	[m <sup>2</sup> /s]
$l_v$	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]

## 4.2. HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

Em função da complexidade das equações, quando aplicadas a processos reais e transientes, faz-se necessário a adoção de algumas hipóteses simplificadoras. Apresenta-se abaixo as hipóteses simplificadoras adotadas.

### *A telha é plana*

Considerar o formato real da telha seria muito complexo, pois a mesma tem formas arredondadas difíceis de serem simuladas; a consideração da forma da telha nos impõe ainda um fluxo tridimensional de calor e umidade. Em face destas dificuldades adota-se a hipótese de que a telha é idealmente plana.

*Desconsidera-se a gravidade*

Os efeitos da gravidade são desconsiderados, as forças internas de interação da estrutura porosa com a umidade são muito maiores que as forças gravitacionais, podendo-se desconsiderar o efeito da gravidade sem perda de precisão.

*O meio é homogêneo e isotrópico*

Admite-se que o meio é homogêneo (formado de material uniforme) e isotrópico (mantém as mesmas propriedades em todas as direções).

*O processo de transferência de calor e umidade na telha é unidimensional*

O processo de cálculo adotado considera fluxo de calor e de umidade unidimensional. Considerar fluxo de calor e umidade em todas as direções seria muito complexo em função da dificuldade de se determinar a geometria da telha, pela impossibilidade de se compreender perfeitamente as trocas de calor e umidade nas interfaces de apoio da telha, e pelo fato de o ensaio de permeabilidade ter sido idealizado para fluxo unidimensional de umidade.

*É desconsiderado o transporte de umidade devido a presença de gradientes de temperatura*

Foi apresentada na equação 4.1 a definição do coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de temperatura. Para o presente trabalho, desconsidera-se este termo.

O erro associado a esta hipótese é pequeno, pois o fluxo de umidade devido a presença de gradientes de temperatura é importante quando o conteúdo de umidade é baixo; e o gradiente de temperatura é alto. Como as telhas a serem simuladas tem pequena espessura e condutividade térmica da ordem de 1 a 3 W/m°C os gradientes de temperatura serão baixos. Podendo-se desconsiderar os fluxos de umidade devido os gradientes de temperatura.

*A condutividade térmica engloba a troca de calor devido à mudança de fase*

O ensaio de determinação da condutividade térmica aparente ( $\lambda$ ) já engloba as trocas de energia pela mudança de fase e pela transferência de umidade.

*As trocas de calor por radiação com o forro são desprezadas*

Embora ocorram trocas de calor por radiação entre o forro e as telhas, desconsidera-se estas trocas, admitindo-se que a quantidade de calor emitida por radiação da telha para o forro é igual a quantidade de calor recebida pela telha. Esta hipótese é necessária, pois sem a mesma teria-se de considerar toda uma edificação, as trocas de calor dentro da edificação e desta para o forro, de forma que de posse dos dados de temperatura do forro se possa determinar as trocas de energia com a telha.

Este procedimento dificultaria o processo, principalmente no que tange ao tempo de processamento.

*Para cálculo do conteúdo de umidade das telhas utiliza-se a curva obtida no ensaio de adsorção. Não se considera a histerese do material*

Foi descrito no capítulo dos ensaios de laboratório o ensaio de adsorção, e falou-se que o ensaio de dessorção difere do ensaio de adsorção por iniciar com os corpos de prova saturados. A princípio poder-se-ia esperar que os resultados dos ensaios de adsorção e dessorção fossem os mesmos, mas isto não ocorre, quando se realiza os dois ensaios verifica-se que as curvas são diferentes, apresentando um fenômeno denominado histerese. Esta histerese está associada a fatores como poros do tipo garganta [10], a conectividade da estrutura porosa [48] e a histerese a nível de poro [47].

O conteúdo de umidade do material poroso pode ser determinado então tanto pela curva de adsorção como pela de dessorção, se o material estava inicialmente seco usa-se a curva de adsorção, se o material estava inicialmente saturado usa-se a de dessorção.

Um material poroso real, como uma telha porosa exposta ao meio ambiente, vai ter um conteúdo de umidade que pode ser determinado pela região entre as curvas de adsorção e dessorção; Como não tem-se a curva de dessorção, usa-se somente a curva de adsorção.

### **4.3. OS MECANISMOS ENVOLVIDOS NA TRANSFERÊNCIA DE MASSA E ENERGIA EM TELHAS EXPOSTAS AO MEIO AMBIENTE**

Descreve-se abaixo os mecanismos que interferem no processo da transferência de massa e energia nas telhas expostas ao meio ambiente:

#### **4.3.1. Transferência de Massa**

- Trocas de umidade entre o meio externo e a telha.
- Trocas de umidade entre o meio interno e a telha.
- Transferência de massa no interior da telha em função dos gradientes de umidade.
- Acúmulo de massa no interior da telha.

#### **4.3.2. Transferência de Energia**

- Radiação solar incidente sobre a telha.
- Radiação em onda longa emitida pelo céu, e pela telha.
- Trocas de energia entre o ar externo em movimento e a telha. (convecção).
- Trocas de energia entre o ar interno em movimento e a telha. (convecção).
- Trocas de energia por condução no interior da telha.
- Acúmulo de energia na telha e no filme de líquido.
- Trocas de calor latente, em função da condensação e evaporação de umidade.

A figura 4.1 apresenta os mecanismos envolvidos, e a telha é discretizada em volumes finitos.

*Figura 4.1: Discretização da telha em volumes finitos e os mecanismos de troca de massa e energia.*

#### **4.4. ALGORITMO NUMÉRICO**

Para o desenvolvimento das equações discretizadas partiu-se de uma formulação implícita. Nos algoritmos implícitos as variáveis são calculadas no mesmo instante de tempo.

Posteriormente apresenta-se as condições de contorno, tanto para o balanço de massa como para o balanço de energia; como o processo de cálculo utilizado usa o algoritmo de Thomas (TDMA), incluímos aqui um resumo das equações do algoritmo.

O algoritmo do TDMA é escrito a partir da seguinte formulação:

$$a_i \cdot X_i = b_i \cdot X_{i+1} + c_i \cdot X_{i-1} + d \quad (4.3)$$

Sendo  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ , constantes do método a serem calculadas, válidas para todos os pontos, e  $X_i$  a variável de interesse. Os valores  $a, b, c$  relacionam as variáveis de interesse com os nodos vizinhos, a variável  $d$  indica outros elementos do balanço não diretamente relacionados a  $X_i$  (normalmente valores de contorno). Considera-se conhecida a variável  $X_i$  no ponto anterior, usando-se as variáveis auxiliares  $P$  e  $Q$ , pode-se escrever:

$$X_i = P_i \cdot X_{i+1} + Q_i \quad (4.4)$$

$$X_{i-1} = P_{i-1} \cdot X_i + Q_{i-1} \quad (4.5)$$

Substituindo 4.5 em 4.3

$$a_i \cdot X_i = b_i \cdot X_{i+1} + c_i \cdot [P_{i-1} \cdot X_i + Q_{i-1}] + d_i \quad (4.6)$$

$$X_i \cdot (a_i - c_i \cdot P_{i-1}) = b_i \cdot X_{i+1} + c_i \cdot Q_{i-1} + d_i \quad (4.7)$$

Comparando 4.7 e 4.5 chega-se a:

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i \cdot P_{i-1}} \quad (4.8)$$

$$Q_i = \frac{c_i \cdot Q_{i-1} + d_i}{a_i - c_i \cdot P_{i-1}} \quad (4.9)$$

$P_i$  e  $Q_i$  são variáveis de cálculo do algoritmo.

Primeiro, aplica-se as condições de contorno para o volume de controle em contato com o meio externo (balanços de massa e energia), depois discretiza-se as equações para os pontos internos e finalmente aplica-se as condições de contorno para o volume de controle em contato com o ambiente interno. Em todos os casos compara-se as equações discretizadas com a equação 4.3, obtendo-se os valores de  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$ . Podendo-se determinar os valores de  $P_i$  e  $Q_i$  pelas equações 4.8 e 4.9, depois de determinados todos os  $P_i$  e  $Q_i$  determina-se  $X_i$  pela equação 4.4.

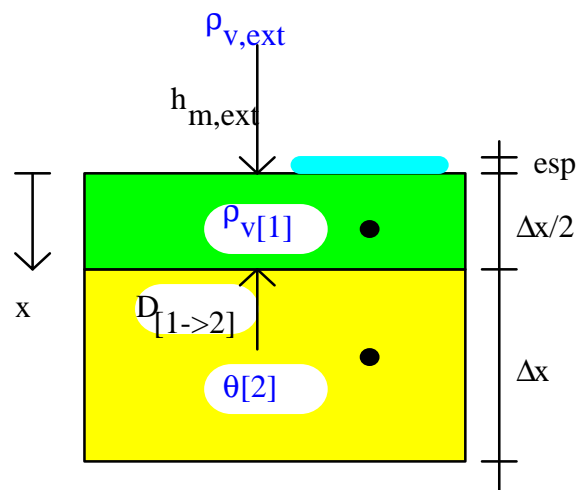
## 4.5. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Apresenta-se a seguir as condições de contorno para os pontos 1, i e n, tanto para o balanço de massa quanto para o balanço de energia.

### 4.5.1. Condições de contorno para o volume de controle em contato com o ambiente externo

A figura 4.2 apresenta as condições de contorno para o volume de controle 1. A troca de umidade com o ambiente externo, esta associada à diferença da concentração de vapor do volume 1, com a concentração de vapor do ambiente externo e ao coeficiente de transferência de massa. A troca de umidade entre os volumes 1 e 2, é associada as diferenças de conteúdo volumétrico de umidade entre tais volumes.

Quando o volume de controle 1 satura, pode ocorrer a formação de um filme de líquido sobre a superfície da telha, cuja espessura em metros é dada por  $esp$ , figura 4.2.



*Figura 4.2: Balanço de massa para o volume de controle 1*

Partindo-se da equação 4.1, usando diferenças centrais na aproximação das derivadas, e as condições de contorno da figura 4.2, a equação discretizada fica:



$$h_{m,ext} \cdot (r_{v,ext} - r_{v,1}^0) + \frac{r_l \cdot D_{1 \rightarrow 2}^0 \cdot (q_2 - q_1)}{\Delta x} = r_l \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{(q_1 - q_1^0)}{\Delta t} \quad \text{para } q_1 < q_{sat}$$

$$h_{m,ext} \cdot (r_{v,ext} - r_{v,sat}^0) + \frac{r_l \cdot D_{1 \rightarrow 2}^0 \cdot (q_2 - q_{sat})}{\Delta x} = (esp - esp^0) \cdot \frac{r_l}{\Delta t} \quad \text{para } q_1 \geq q_{sat}$$

$$Eq. Auxiliar: \quad esp - esp^0 = (q_1 - q_{sat}) \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (4.10)$$

Observe que só passa a existir um filme de líquido se o volume de controle 1 estiver saturado.

O procedimento é o seguinte: Se no instante de tempo anterior  $q_1 < q_{sat}$  determina-se o novo valor de  $q_1$ , e verifica-se se  $q_1 > q_{sat}$ , caso afirmativo, ocorre a formação do filme de líquido, que é calculado pela equação auxiliar. No próximo passo de tempo usa-se a equação em que  $q_1 > q_{sat}$ .

Se no instante de tempo anterior existia o filme de líquido usa-se a equação em que  $q_1 > q_{sat}$ . A variável  $esp$  substitue  $q_1$  (agora  $q_1 = q_{sat}$ ). Calculado o novo valor de  $esp$  verifica-se se o mesmo não é menor que zero, caso afirmativo, usa-se a equação auxiliar para determinar  $q_1$ .

Os termos da equação 4.10 são:

$h_{m,ext}$  = Coeficiente troca de massa externa [m/s].

$r_{v,ext}$  = Concentração do vapor no ambiente externo [kg/m<sup>3</sup>].

$r_{v,1}$  = Concentração do vapor no volume de controle 1 [kg/m<sup>3</sup>].

$r_l$  = Concentração do líquido [kg/m<sup>3</sup>].

$D_{1 \rightarrow 2}^0$  = Difusividade isotérmica de umidade, média simples entre os volumes 1 e 2 [m<sup>2</sup>/s].

$q_1$  = Conteúdo volumétrico de umidade para o volume de controle 1 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

$\Delta x/2$  = Espessura do volume de controle 1 [m].

$\Delta t$  = Intervalo de tempo [s].

$esp$  = Espessura do filme de líquido no instante atual [m].

$esp^0 =$  Espessura do filme de líquido no instante anterior [m].

Pode-se determinar a concentração em massa do vapor no ambiente externo, partindo-se da equação dos gases perfeitos:

$$P_v \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.11)$$

Onde:

$P_v =$  Pressão de vapor do gás [N/m<sup>2</sup>].

$V =$  Volume ocupado pelo gás [m<sup>3</sup>].

$n =$  Número de moles do gás [Mol].

$R =$  8314, Constante dos gases perfeitos [J/Mol K].

$T =$  Temperatura do gás [K].

Define-se a umidade relativa  $h$ , como a razão da pressão de vapor do gás pela pressão parcial de saturação do vapor:

$$h = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (4.12)$$

Onde:

$P_{v,sat} =$  Pressão parcial de saturação do vapor [N/m<sup>2</sup>]

A concentração do vapor, pode ser dada por:

$$r_v = \frac{n \cdot M}{V} \quad (4.13)$$

Onde

$M =$  Massa molecular do gás [g/Mol], para o ar  $M=18$ [g/Mol].

Admitindo-se a hipótese do ar se comportar como gás perfeito, pode-se reorganizar 4.12 e 4.13 e substituir em 4.11, obtendo-se a concentração em massa do vapor para o ar externo:

$$r_{v,ext} = \frac{h_{ext} \cdot P_{v,sat} \cdot M}{R \cdot T_{ext}} \quad (4.14)$$

A equação utilizada para cálculo da pressão parcial de saturação do vapor, é obtida a partir da solução empírica da equação de Clapeyron-Clausius, que relaciona a temperatura com a pressão.

$$\frac{dp_{v,sat}}{dT} = \frac{H_v - H_l}{T(V_v - V_l)} \quad \text{Eq. de Clapeyron-Clausius}$$

Onde  $H_v$  e  $H_l$  são as entalpias molares das fases vapor e líquido, e  $V_v$  e  $V_l$  o volume molar das fases vapor e líquido.

A solução empírica da equação de Clapeyron-Clausius é dada pelo CIBSE [39] por:

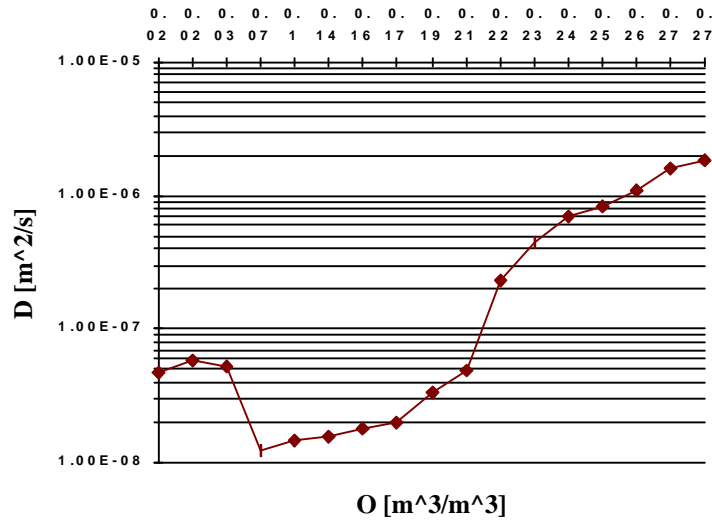
$$\log_{10} P_{v,sat} = 30.59051 - 8.2 \log_{10} T + 2.4804 \cdot 10^3 \cdot T - \frac{3142.32}{T} \quad (4.15)$$

Descreve-se agora cada termo da equação 4.10.

O ganho de umidade do meio externo é representado pelo termo  $h_{m,ext} \cdot (r_{v,ext} - r_{v,1})$ . O coeficiente  $h_{m,ext}$  é o equivalente para trocas de massa do coeficiente de convecção. Para o ponto interno este termo será  $h_{m,int}$ .

O termo  $\frac{r_l \cdot D_{1 \rightarrow 2}^0 \cdot (q_2 - q_1)}{\Delta x}$ , representa as trocas de umidade do volume de controle 2 para o volume de controle 1, é proporcional à difusividade (difusividade média entre os volumes de controle 1 e 2) e a diferença de conteúdo volumétrico de umidade entre os volumes de controle 1 e 2.

Um dado necessário para a realização das simulações, é a difusividade isotérmica global de umidade  $D$  (difusividade na fase vapor + difusividade na fase líquida) que foi obtido por Fernandes [10] para a argamassa de cal e cimento nas proporções 8:2:1, utilizando ensaios de embebição e ensaios de permeabilidade ao vapor. Para a simulação do processo de transferência de calor e umidade nas telhas utiliza-se os valores de difusividade da argamassa, isto porque ainda não se obteve a curva de difusividade completa para a telha de cerâmica. A figura 4.3 apresenta os valores de difusividade obtidos por Fernandes.



*Figura 4.3: Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de umidade em função do conteúdo volumétrico de umidade, para argamassa [10]*

Em um intervalo de tempo  $\Delta t$  a umidade no volume de controle 1 pode variar, ocorrendo redução ou acréscimo do conteúdo de umidade. Esta variação é expressa pelo

termo  $r_l \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{(q_l - q_l^0)}{\Delta t}$  para  $q_l < q_{sat}$ .

Se a taxa com que a telha ganha umidade do ar, for maior que a taxa com que a umidade está percolando (passagem lenta da umidade pela telha), vai ocorrer a saturação dos poros superficiais e a formação de um filme de líquido sobre a superfície da telha. O termo  $(esp - esp^0) \cdot \frac{r_l}{\Delta t}$  (para  $q_l \geq q_{sat}$ ), representa o acúmulo de massa no filme de líquido no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Definidos os termos do balanço de massa para o volume de controle 1, segue-se isolando-se os valores de  $q$  da equação do balanço de massa, assim a equação 4.10 se escreve:

$$q_1 \left[ \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \right] = q_2 \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} + \frac{h_{m,ext} \cdot (r_{v,ext} - r_{v,1}^0)}{r_l} + q_1^0 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \quad \text{para } \theta_1 < \theta_{sat}$$

$$\text{esp}\left[\frac{1}{\Delta t}\right] = \theta_2 \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} + \frac{h_{m,\text{ext}} \cdot (\rho_{v,\text{ext}} - \rho_{v,1}^0)}{\rho_1} + \frac{\text{esp}^0}{\Delta t} - \theta_{\text{sat}} \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} \quad \text{para } \theta_1 \geq \theta_{\text{sat}} \quad (4.16)$$

Por equivalência da equação 4.16, com a equação genérica 4.3, aplicada para variável  $X_i = q_i$ , obtém-se  $a_1 \cdot q_1 = b_1 \cdot q_2 + c_1 \cdot q_0 + d_1$ , os valores de  $a_1, b_1, c_1$  e  $d_1$  serão:

Para  $\theta_1 < \theta_{\text{sat}}$

$$a_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t}$$

$$b_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x}$$

$$c_1 = 0$$

$$d_1 = \frac{h_{m,\text{ext}} \cdot (r_{v,\text{ext}} - r_{v,1}^0)}{r_1} + q_1^0 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t}$$

Para  $\theta_1 \geq \theta_{\text{sat}}$

$$a_1 = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.17)$$

$$b_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} \quad (4.18)$$

$$c_1 = 0 \quad (4.19)$$

$$d_1 = \frac{h_{m,\text{ext}} \cdot (\rho_{v,\text{ext}} - \rho_{v,1}^0)}{\rho_1} + \frac{\text{esp}^0}{\Delta t} - \theta_{\text{sat}} \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} \quad (4.20)$$

A figura 4.4 mostra os mecanismos de troca de energia para o volume de controle 1.

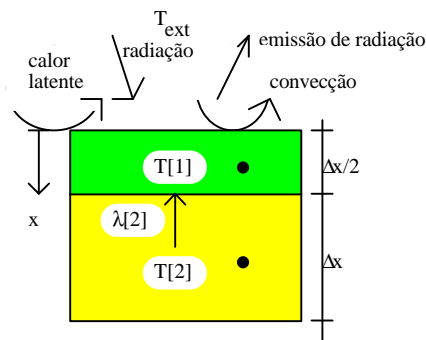


Figura 4.4: Balanço de energia no volume de controle 1

Discretizando-se a equação da energia 4.2, usando aproximação das derivadas por diferenças centrais, e as condições de contorno da figura 4.4, chega-se a equação discretizada da forma:

$$h_{c,ext} \cdot (T_{ext} - T_1) + \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + \mathbf{I}_{1 \rightarrow 2}^{*0} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} + l_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\mathbf{r}_{v,ext} - \mathbf{r}_{v,1}) = \left[ \mathbf{r}_{t,sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} \right] \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$$

para  $\mathbf{q}_l < \mathbf{q}_{sat}$

$$h_{c,ext} \cdot (T_{ext} - T_1) + \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + \mathbf{I}_{1 \rightarrow 2}^{*0} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} + l_v \cdot \frac{\mathbf{r}_l}{\Delta t} (esp - esp^0) = \left[ \mathbf{r}_{t,sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \mathbf{r}_l \right] \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$$

para  $\mathbf{q}_l > \mathbf{q}_{sat}$  ( 4.21 )

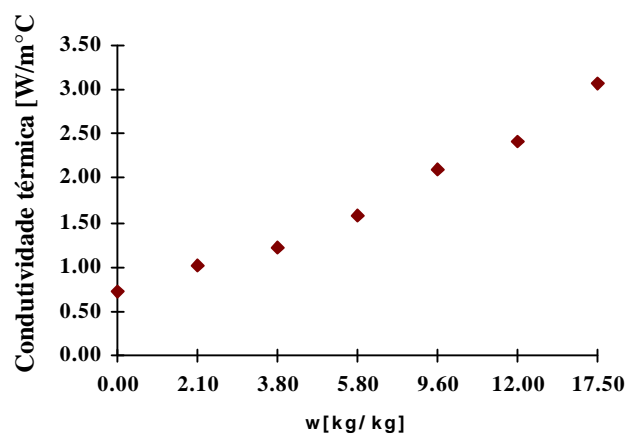
Sendo:

$\mathbf{I}_{02}^0$	Condutividade térmica no instante de tempo anterior	[W/m.°C ]
$T_1$	Temperatura do material no volume de controle 1	[°C ]
$T_1^0$	Temperatura do material no volume de controle 1	[°C ]
$T_2$	Temperatura do material no volume de controle 2	[°C ]
$\mathbf{D}x$	Intervalo de espaço	[m]
$h_{c,ext}$	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície externa	[W/m <sup>2</sup> .°C ]
$T_{ext}$	Temperatura do ar externo	[°C ]
$\mathbf{a}$	Absortividade do material	[]
$R_{oc}$	Fluco de calor por radiação em onda curta	[W/m <sup>2</sup> ]
$\mathbf{e}$	Emissividade do material	[]
$R_{ol}$	Balanço das trocas de calor por radiação em onda longa	[W/m <sup>2</sup> ]
$\mathbf{r}_{v,ext}$	Concentração do vapor no meio externo	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mathbf{r}_{v,l}$	Concentração do vapor no volume de controle 1	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mathbf{r}_l$	Densidade da água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$l_v$	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]

$c_t$	Calor específico do material	[J/kg.°C ]
$c_l$	Calor específico da água	[J/kg.°C ]
$w^0$	Conteúdo mássico de umidade no volume de controle 1, no instante de tempo anterior	[kg/kg]
$h_{m,ext}$	Coeficiente de troca de massa com o ambiente externo	[m/s]
$t$	Tempo	[s]
$\Delta t$	Intervalo de tempo	[s]
$x$	Espaço	[m]

Explica-se a seguir os diferentes termos da equação 4.21.

O termo  $I_2^0 \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x}$ , representa a troca de energia por condução entre os volumes de controle 1 e 2. Como ocorre variação da condutividade térmica com o conteúdo mássico de umidade, apresenta-se a figura 4.5, que mostra a relação entre a condutividade térmica aparente  $\lambda$  e o conteúdo mássico de umidade de uma argamassa de cal e cimento (meio poroso). Esta curva foi obtida por Fernandes [10], e foi utilizada nas simulações realizadas para a argamassa.



*Figura 4.5 : Condutividade térmica aparente em função do conteúdo mássico de umidade para a argamassa, a temperatura de 25°C. [10]*

A condutividade térmica aparente aumenta com o aumento do conteúdo mássico de umidade (w). Isto ocorre porque a umidade preenche os vazios dos poros aumentando a

transferência de calor por condução. Para calcular a condutividade térmica entre o volume  $i$  e o volume  $i+1$  adota-se a condutividade térmica média entre os dois pontos.

O termo que rege as trocas de calor por convecção é dado na equação do balanço por  $h_{c,ext} \cdot (T_{ext} - T_i)$ . A determinação do coeficiente de convecção é complexa, experimentos com este objetivo foram desenvolvidos por Ito et al [16] que estabeleceram as primeiras relações entre a velocidade do vento e o coeficiente de convecção. Sharples [34] desenvolveu trabalho semelhante; finalmente em Gandrille et al [12] temos uma metodologia mais completa para se analisar o comportamento do coeficiente de convecção. Em face das dificuldades apresentadas por estes autores, e da incerteza nos resultados, adota-se para efeito das simulações os coeficientes fixos fornecidos pelo CIBSE [38].

O CIBSE [38] apresenta valores simplificados para o coeficiente de convecção externa e interna para em edificações.

$$\begin{aligned} h_{c, ext} &= 16.7 & [W/m^2 \cdot ^\circ C] & \text{ para convecção externa.} \\ h_{c, int} &= 9.1 & [W/m^2 \cdot ^\circ C] & \text{ para convecção interna.} \end{aligned}$$

A emissão de radiação de onda longa da telha para o céu e do céu para a telha é representada pelo termo  $\epsilon \cdot R_{ol}$ . O céu funciona como um corpo, que emite radiação de onda longa para a telha e absorve a radiação emitida pela telha. Ocorre entretanto que para um determinado espectro do comprimento de onda o céu não absorve parte da radiação emitida pela telha, o que ocasiona um desbalanço nas trocas de radiação entre a telha e o céu. Esta radiação atravessa o céu e vai para o espaço, a este fenômeno dá-se o nome de janela atmosférica, em que, para um determinado espectro do comprimento de onda, o céu funciona como uma janela aberta à radiação. Este fenômeno é importante, pois é responsável pelo resfriamento dos corpos horizontais durante a noite. O CIBSE [38] recomenda usar o valor de  $\epsilon \cdot R_{ol} = -100 \text{ W/m}^2$  para a perda de radiação de onda longa da telha para o céu.

Quando ocorre a condensação de vapor de água sobre a telha exposta ao meio ambiente, ocorre transferência de energia do vapor de água para a telha pelo processo de mudança de fase. Esta transferência de energia é considerada multiplicando-se a quantidade de líquido condensada pelo calor latente. Este termo está representado na equação 4.21 por



$l_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\mathbf{r}_{v,ext} - \mathbf{r}_{v,1}^0)$  para a troca de umidade com o volume de controle 1 e por  $l_v (esp - esp^0) \cdot \frac{\mathbf{r}_l}{\Delta t}$  para a troca de umidade com o filme de líquido.

Para que se possa avaliar a variação da energia do filme de líquido utiliza-se a expressão  $(esp^0) \cdot c_l \cdot \mathbf{r}_l \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$ , que representa a variação da quantidade de energia do filme de líquido por unidade de tempo. O termo  $\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$  representa na equação do balanço a retenção de energia no material, esta retenção de energia está associada a parte sólida do meio poroso e ao seu conteúdo mássico de umidade.

Isolando-se as temperaturas na equação 4.21, tem-se

$$\begin{aligned}
 & T_1 \cdot \left[ h_{c,ext} + \frac{I_2^0}{\Delta x} + \frac{[\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}]}{\Delta t} \right] = \\
 & T_2 \cdot \frac{I_2^0}{\Delta x} + \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + l_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\mathbf{r}_{v,ext} - \mathbf{r}_{v,1}^0) \quad \text{para } \mathbf{q}_1 < \mathbf{q}_{sat} \\
 & T_1 \cdot \left[ h_{c,ext} + \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \frac{[\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + (esp^0) \cdot c_l \cdot \rho_l]}{\Delta t} \right] = \\
 & T_2 \cdot \frac{I_2^0}{\Delta x} + \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \mathbf{r}_l}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + l_v (esp - esp^0) \cdot \frac{\mathbf{r}_l}{\Delta t} \\
 & \text{para } \mathbf{q}_1 \geq \mathbf{q}_{sat} \quad (4.22)
 \end{aligned}$$

E por equivalência da equação 4.22 com a equação 4.3 rescrita para a temperatura como  $a_1 \cdot T_1 = b_1 \cdot T_2 + c_1 \cdot T_0 + d_1$ , obtém-se os valores de  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  e  $d_1$ .

Para  $\mathbf{q}_l < \mathbf{q}_{sat}$

Para  $\mathbf{q}_l \geq \mathbf{q}_{sat}$

$$a_1 = h_{c,ext} + \frac{\mathbf{I}_2^0}{\Delta x} + \frac{[\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}]}{\Delta t} \quad a_1 = h_{c,ext} + \frac{\mathbf{I}_2^0}{\Delta x} + \frac{[\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + (esp^0) \cdot c_l \cdot \mathbf{r}_l]}{\Delta t} \quad (4.23)$$

$$b_1 = \frac{\mathbf{I}_2^0}{\Delta x} \quad b_1 = \frac{\mathbf{I}_2^0}{\Delta x} \quad (4.24)$$

$$c_1 = 0 \quad c_1 = 0 \quad (4.25)$$

$$d_1 = \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + l_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\mathbf{r}_{v,ext} - \mathbf{r}_{v,int}^0)$$

$$d_1 = \mathbf{a} \cdot R_{oc} + \mathbf{e} \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \mathbf{r}_l}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + l_v (esp - esp^0) \frac{\mathbf{r}_l}{\Delta t} \quad (4.26)$$

### 4.5.2. Equações discretizadas para os volumes internos

Para o volume de controle 1 desenvolveu-se as equações do balanço de massa e de energia seguido de explicações sobre os termos envolvidos. Para os volumes de controle  $i$  e  $n$  apresenta-se diretamente as equações de balanço e a determinação dos coeficientes  $a_i, b_i, c_i$  e  $d_i$ .

A figura 4.6 apresenta o balanço da transferência de umidade para o volume de controle  $i$ .

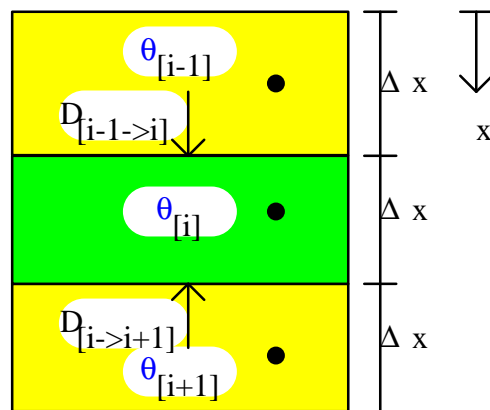


Figura 4.6: Balanço de massa no volume de controle  $i$

Discretizando-se a equação 4.1, e aproximando-se as derivadas por diferenças centrais, tem-se:

$$\frac{r_l \cdot D_{i \rightarrow i-1}^0 \cdot (q_{i-1} - q_i)}{\Delta x} + \frac{r_l \cdot D_{i \rightarrow i+1}^0 \cdot (q_{i+1} - q_i)}{\Delta x} = r_l \cdot \Delta x \cdot \frac{(q_i - q_i^0)}{\Delta t} \quad (4.27)$$

Isolando-se os valores de  $q$

$$q_i \cdot \left[ \frac{D_{i \rightarrow i-1}^0}{\Delta x} + \frac{D_{i \rightarrow i+1}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta t} \right] = q_{i-1} \left[ \frac{D_{i \rightarrow i-1}^0}{\Delta x} \right] + q_{i+1} \left[ \frac{D_{i \rightarrow i+1}^0}{\Delta x} \right] + q_i^0 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.28)$$

Por equivalência com a equação  $a_i \cdot q_i = b_i \cdot q_{i+1} + c_i \cdot q_{i-1} + d_i$ , obtém-se os valores de  $a_i, b_i, c_i$  e  $d_i$ .

$$a_i = \frac{D_{i \rightarrow i-1}^0}{\Delta x} + \frac{D_{i \rightarrow i+1}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.29)$$

$$b_i = \frac{D_{i \rightarrow i+1}^0}{\Delta x} \quad (4.30)$$

$$c_i = \frac{D_{i \rightarrow i-1}^0}{\Delta x} \quad (4.31)$$

$$d_i = q_i^0 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.32)$$

A figura 4.7 apresenta o balanço da transferência de energia para o volume de controle i.

*Figura 4.7: Balanço de energia no volume de controle i*

Discretizando-se a equação 4.2, usando diferenças centrais na aproximação das derivadas, tem-se:

$$I_i^0 \cdot \frac{(T_{i-1} - T_i)}{\Delta x} + I_{i+1}^0 \cdot \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} = [r_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_i^0) \Delta x] \cdot \frac{T_i - T_i^0}{\Delta t} \quad (4.33)$$

Colocando-se em evidência as temperaturas

$$T_i \left[ \frac{I_1^0}{\Delta x} + \frac{I_{i+1}^0}{\Delta x} + (c_t + c_l \cdot w_i^0) \cdot \frac{\mathbf{r}_t \cdot \Delta x}{\Delta t} \right] = T_{i+1} \cdot \frac{I_{i+1}^0}{\Delta x} + T_{i-1} \cdot \frac{I_i^0}{\Delta x} + (c_t + c_l \cdot w_i^0) \frac{\mathbf{r}_t \cdot \Delta x \cdot T_i^0}{\Delta t} \quad (4.34)$$

Por equivalência com a equação  $a_i \cdot T_i = b_i \cdot T_{i+1} + c_i \cdot T_{i-1} + d_i$ , obtém-se os valores de  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$ .

$$a_i = \frac{I_1^0}{\Delta x} + \frac{I_{i+1}^0}{\Delta x} + (c_t + c_l \cdot w_i^0) \cdot \frac{\mathbf{r}_t \cdot \Delta x}{\Delta t} \quad (4.35)$$

$$b_i = \frac{I_{i+1}^0}{\Delta x} \quad (4.36)$$

$$c_i = \frac{I_i^0}{\Delta x} \quad (4.37)$$

$$d_i = (c_t + c_l \cdot w_i^0) \frac{\mathbf{r}_t \cdot \Delta x \cdot T_i^0}{\Delta t} \quad (4.38)$$

### 4.5.3. Condições de contorno para o volume de controle em contato com o ambiente interno

A figura 4.8 apresenta o balanço de massa para o volume de controle n.

*Figura 4.8: Balanço de massa no volume de controle n*

Discretizando-se a equação 4.2, usando diferenças centrais na aproximação das derivadas, e considerando as condições de contorno (figura 4.8), tem-se:

$$\frac{\mathbf{r}_l \cdot D_{n \rightarrow n-1}^0 \cdot (\mathbf{q}_{n-1} - \mathbf{q}_n)}{\Delta x} + h_{m,int} \cdot (\mathbf{r}_{v,int} - \mathbf{r}_{v,n}^0) = \mathbf{r}_l \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{(\mathbf{q}_n - \mathbf{q}_n^0)}{\Delta t} \quad (4.39)$$

Separando os valores de  $\mathbf{q}$ ,

$$\mathbf{q}_n \cdot \left[ \frac{D_{n \rightarrow n-1}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \right] = \mathbf{q}_{n-1} \left[ \frac{D_{n \rightarrow n-1}^0}{\Delta x} \right] + \frac{h_{m,int} \cdot (\mathbf{r}_{v,int} - \mathbf{r}_{v,n}^0)}{\mathbf{r}_l} + \mathbf{q}_n^0 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \quad (4.40)$$

Por equivalência com a equação  $a_n \cdot \mathbf{q}_n = b_n \cdot \mathbf{q}_{n+1} + c_n \cdot \mathbf{q}_{n-1} + d_n$ , obtém-se os valores de  $a_n, b_n, c_n$  e  $d_n$ .

$$a_n = \frac{D_{n \rightarrow n-1}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \quad (4.41)$$

$$b_n = 0 \quad (4.42)$$

$$c_n = \frac{D_{n \rightarrow n-1}^0}{\Delta x} \quad (4.43)$$

$$d_n = \frac{h_{m,int} \cdot (\mathbf{r}_{v,int} - \mathbf{r}_{v,n}^0)}{\mathbf{r}_l} + \mathbf{q}_n^0 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \quad (4.44)$$

A figura 4.9 apresenta o balanço de energia para o volume de controle n.

*Figura 4.9: Balanço de energia no volume de controle n*

Discretizando-se a equação 4.1, usando diferenças centrais na aproximação das derivadas, e considerando as condições de contorno (figura 4.9), tem-se:

$$I_n^0 \cdot \frac{(T_{n-1} - T_n)}{\Delta x} + h_{c,\text{int}} \cdot (T_{\text{int}} - T_n) + l_v \cdot h_{m,\text{int}} \cdot (\mathbf{r}_{v,\text{int}} - \mathbf{r}_{v,n}) = [\mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_n^0) \frac{\Delta x}{2}] \cdot \frac{T_n - T_n^0}{\Delta t} \quad (4.45)$$

Colocando em evidência as temperaturas

$$T_n \cdot \left[ h_{c,\text{int}} + \frac{I_n^0}{\Delta x} + \mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_n^0) \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \right] =$$

$$T_{n-1} \cdot \frac{I_n^0}{\Delta x} + l_v \cdot h_{m,\text{int}} \cdot (\mathbf{r}_{v,\text{int}} - \mathbf{r}_{v,n}) + h_{c,\text{int}} \cdot T_{\text{int}} + \left[ \mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_n^0) \frac{\Delta x \cdot T_n^0}{2 \cdot \Delta t} \right] \quad (4.46)$$

Por equivalência com a equação  $a_n \cdot T_n = b_n \cdot T_{n+1} + c_n \cdot T_{n-1} + d_n$ , obtém-se os valores de  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$  e  $d_n$ .

$$a_n = h_{c,\text{int}} + \frac{I_n^0}{\Delta x} + \mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_n^0) \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t} \quad (4.47)$$

$$b_n = 0 \quad (4.48)$$

$$c_n = \frac{I_n^0}{\Delta x} \quad (4.49)$$

$$d_n = l_v \cdot h_{m,\text{int}} \cdot (\mathbf{r}_{v,\text{int}} - \mathbf{r}_{v,n}) + h_{c,\text{int}} \cdot T_{\text{int}} + \left[ \mathbf{r}_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_n^0) \frac{\Delta x \cdot T_n^0}{2 \cdot \Delta t} \right] \quad (4.50)$$

#### 4.6. SEQUÊNCIA DE CÁLCULO.

A sequência de cálculo é dada por:

- Definição dos valores iniciais:  $t$  e  $q$ .
- Cálculo das variáveis climáticas (contorno):  $T_{ext}, T_{int}, r_{v,ext}, r_{v,int}, R_{oc}, R_{ol}$ .
- Cálculo do balanço de massa: *Cálculo dos coeficientes do TDMA, cálculo de  $q_n, q_{n-1}, \dots, q_{i+1}, q_i, q_{i-1}, \dots, q_1$ .*
- Cálculo do balanço de energia: *Cálculo dos coeficientes do TDMA, cálculo de  $T_n, T_{n-1}, \dots, T_{i+1}, T_i, T_{i-1}, \dots, T_1$ .*

O processo se inicia com a definição dos valores iniciais de temperatura e conteúdo volumétrico de umidade para todos os pontos da telha e, então entra-se num laço que envolve o cálculo das variáveis climáticas (contorno), o balanço de massa e depois o balanço de energia.

Pelo algoritmo adotado todos os valores de conteúdo ( $q$ ) e depois de temperatura ( $T$ ) são calculados no mesmo instante de tempo. Porém, como existe dependência entre os dois balanços (o de massa e o de energia), os valores de condutividade térmica (função de  $q$ ) de difusividade (função de  $q$ ) e de densidade do vapor dos pontos superficiais (função de  $q$ ) são adotados no instante de tempo anterior. Este erro é reduzido através do processo de recorrência, em que os balanços de massa e energia são calculados 2 vezes. A cada recorrência, a condutividade, a difusividade e a densidade do vapor dos volumes de controle 1 e n são atualizados.

Para que o programa fique mais rápido, adotou-se um sistema de variação do passo de tempo; em função da evolução de  $t$  e  $\theta$ ; O próximo passo de tempo é maior que o anterior, no caso da ocorrência de oscilações, volta-se no tempo e reduz-se o passo de tempo, obedecidos  $\Delta t_{m\acute{a}x}$ , e  $\Delta t_{m\acute{i}n}$ .



# Capítulo 5

## Simulações

## 5. SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta as simulações que foram realizadas para a argamassa. As simulações iniciais servem para analisar o comportamento geral do sistema físico e do programa de simulação. Realizou-se ainda três simulações com diferentes números de volumes de controle para verificar a influência do número de volumes de controle nos resultados. O mesmo procedimento é adotado para o número de recorrência. Analisa-se também as curvas de trocas de energia nas interfaces do material.

Também é realizada uma simulação com umidade externa variando em função da temperatura do ar externo (com conteúdo de umidade do ar constante) e feita uma simulação para argamassa inicialmente saturada.

No final do capítulo é apresentado o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa.

### 5.1. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA TELHA DE ARGAMASSA

#### 5.1.1. Dados padrões para telha de argamassa

O programa de simulação, solicita ao usuário a entrada das variáveis do problema que são as variáveis climáticas, e os dados de propriedades do material poroso, a *Tabela 5.1* lista alguns destes valores, utilizados nas simulações para a argamassa.

Observe na *Tabela 5.1* que considerou-se umidade relativa do ar constante igual a 75% para ambiente interno e 95% para ambiente externo. A temperatura do ar interno também é considerada constante e igual a 25°C. O programa de simulação permite entretanto que estes valores sejam definidos como constante ou variáveis. Considerou-se que a amostra tem a espessura de 3cm, os dados de porosidade e densidade para a argamassa foram tirados de [10],  $h=0.31$  e  $r_t=1730 \text{ kg/m}^3$ . Considera-se ainda que nas trocas de calor por onda longa entre a telha e o céu ocorre uma perda de energia constante de  $100\text{W/m}^2$ . O coeficiente de absorção para a telha é de  $a=0.63$  [14].

*Tabela 5.1: Valores de entrada do programa de simulação, para a simulação padrão.*

<b>Nome</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
$DT$	0.01 a 1	[s]
$l$	0,03	[m]
$r_t$	1730	[kg/m <sup>3</sup> ]
$r_l$	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
$r_{v,int}$	0,017	[kg/m <sup>3</sup> ]
$h_{m,ext}$	0,01386	[m/s]
$h_{m,int}$	0,0076	[m/s]
$h_{ext}$	0.95	[]
$h$	0.31	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$R_{ol}$	-100	[W/m <sup>2</sup> ]
$a$	0,63	[]
$h_{c,ext}$	16,7	[W/m <sup>2</sup> °C]
$h_{c,int}$	9,1	[W/m <sup>2</sup> °C]
$c_t$	1000	[J/kg °C]
$c_l$	4187	[J/kg °C]
$lv$	2256685,2	[J/kg]
$T_{int}$	25	[°C]
$h_{int}$	0.75	[]
$w_{sat}$	0.1812	[kg/kg]

Apresenta-se a seguir as curvas de radiação global, temperatura externa (uma senóide), e emissão de radiação pela telha ( $= -100\text{W/m}^2$ )[38], os mesmos dados utilizados por Bueno et al. [2].

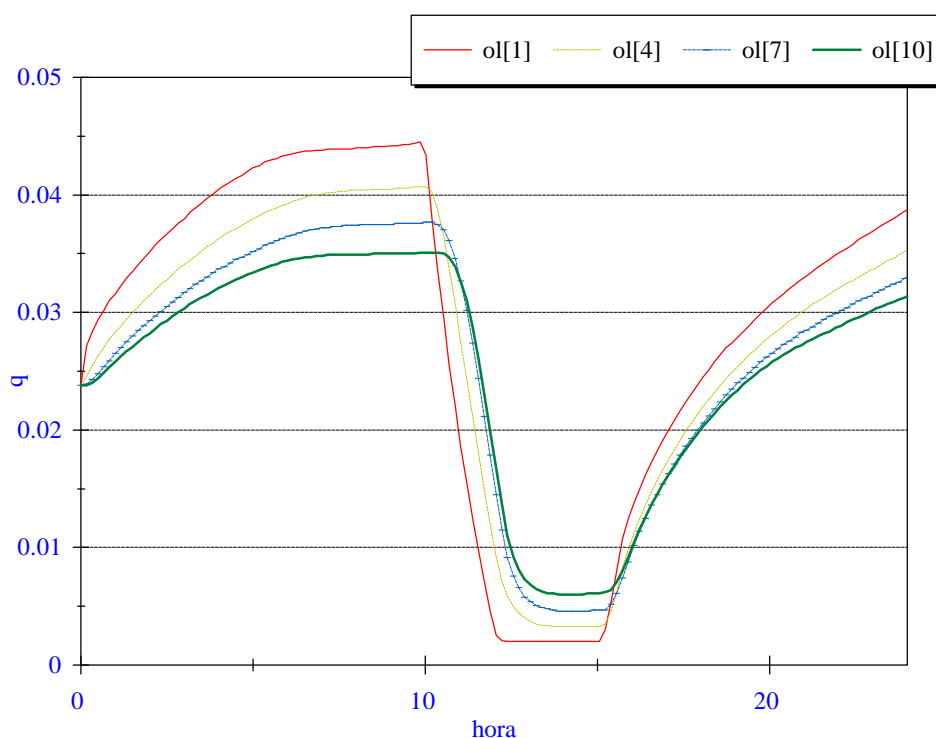
### **5.1.2. Resultados da simulação para telha de argamassa com umidade externa e interna constante.**

A *Figura 5.1* apresenta os dados climáticos utilizados para as simulações. Os dados de radiação solar são do dia 14/1/91 para a cidade de Florianópolis, obtidos junto ao LABSOLAR. As temperaturas são representadas por uma senóide.

*Figura 5.1: Dados climáticos utilizados nas simulações para a argamassa.*

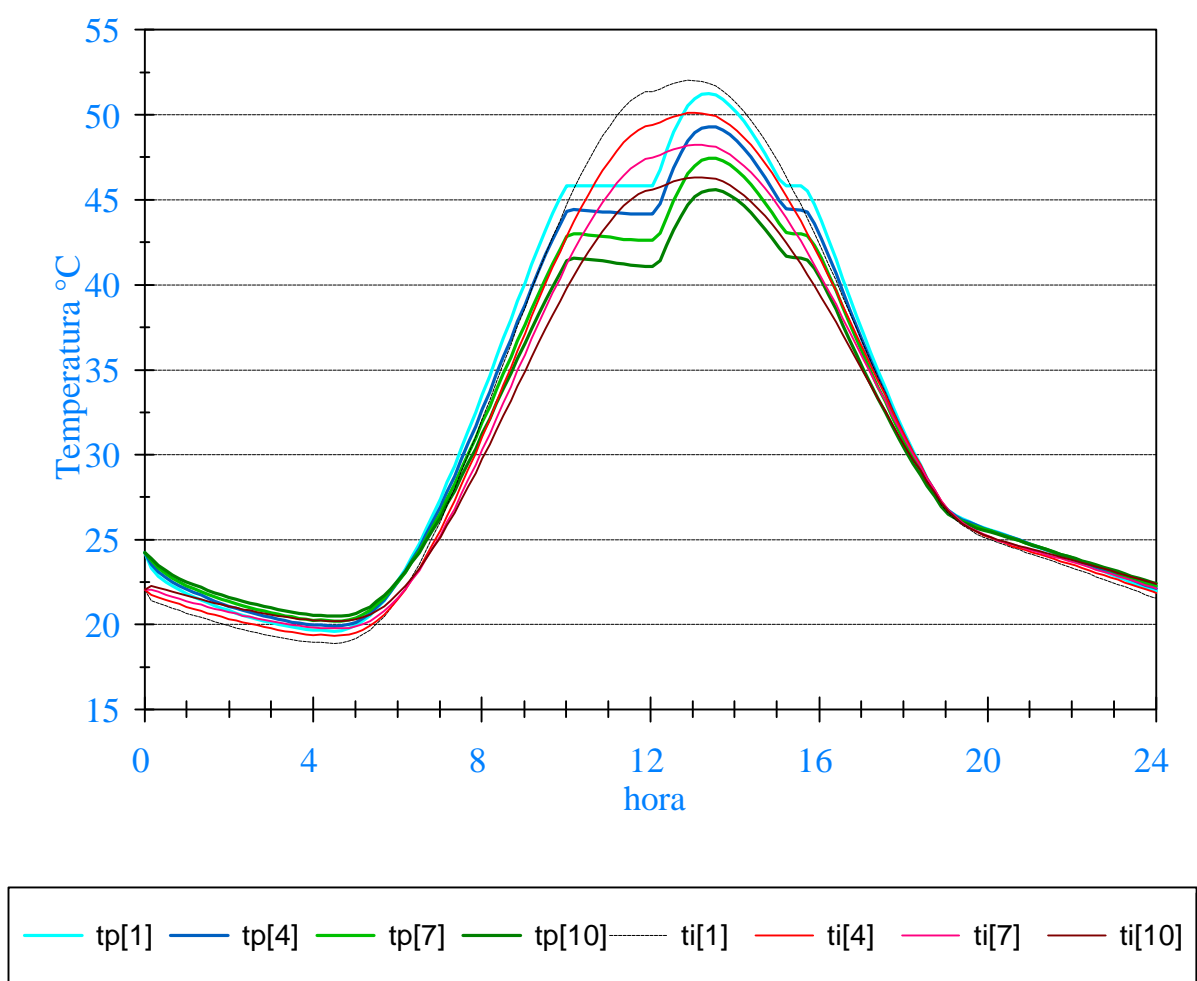
Nas figuras para conteúdo volumétrico de umidade e temperatura apresentadas abaixo, apresenta-se 4 curvas, que representam os volumes de controle 1, 4, 7 e 10 da telha. Lembre-se que a telha foi dividida em 10 volumes de controle. O volume de controle 1 corresponde a uma distância da superfície superior da telha de 1.66mm, o volume 4 a uma distância de 11.66mm, o volume 7 a uma distância de 21.66mm e o volume 10 a uma distância de 28.33mm. Nas figuras para trocas de energia apresenta-se somente os balanços de energia dos elementos externos, volumes de controle 1 e 10.

A Figura 5.2 apresenta a evolução do conteúdo volumétrico de umidade na telha, observa-se o seguinte comportamento: durante a noite (18h até 6h) a telha tem aumento do conteúdo volumétrico de umidade porque sofreu resfriamento pela emissão de radiação de onda longa para o céu. No período diurno, entre 6h e 10h tem redução do conteúdo volumétrico de umidade com o início da radiação solar. No período entre 10h e 12h a telha sofre redução acentuada de seu conteúdo volumétrico de umidade, atingindo valores próximos a zero as 12h, e ficando com estes valores até as 15h. Após as 15h a telha volta a ganhar umidade.



*Figura 5.2: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade (umidade externa constante a 95% e interna constante a 75%)*

A *Figura 5.3* apresenta a evolução da temperatura para a telha de argamassa permeável e para a telha impermeável. Observe que a temperatura da telha permeável é menor no período diurno, apresentando um patamar na evolução da temperatura para  $t_{\text{telha,permeável}} \approx 45^\circ\text{C}$ . O patamar na evolução da temperatura permanece até que ocorra estabilização do conteúdo volumétrico de umidade  $\theta$ , às 12h. Após as 12h, a temperatura da telha permeável volta a subir, se aproximando da temperatura da telha impermeável. Este patamar representa um equilíbrio nas trocas térmicas, a energia ganha principalmente por radiação solar é igual a energia perdida pela evaporação da umidade.



*Figura 5.3: Valores de temperatura para telha permeável e impermeável*

A *Figura 5.4* apresenta a evolução das trocas de energia entre o meio ambiente e a telha de argamassa. Os valores de energia estão dados em  $\text{W/m}^2$ .

As trocas de radiação, a telha ganha radiação do sol a partir das 6h da manhã até as 18h, atingindo um pico de  $660\text{W/m}^2$ .

Como a temperatura da telha no período noturno é próxima à temperatura do ar as trocas por convecção neste período são menores que as observadas no período diurno. Às 12.5h a telha de argamassa perde por convecção  $\approx 200\text{W/m}^2$  para o ambiente interno e  $\approx 370\text{W/m}^2$  para o ambiente externo.

As curvas de troca de calor latente indicam o ganho de energia no período noturno e a perda de energia no período diurno. Os resultados das curvas de troca de calor latente apresentam picos que devem ter origem no sistema numérico adotado.

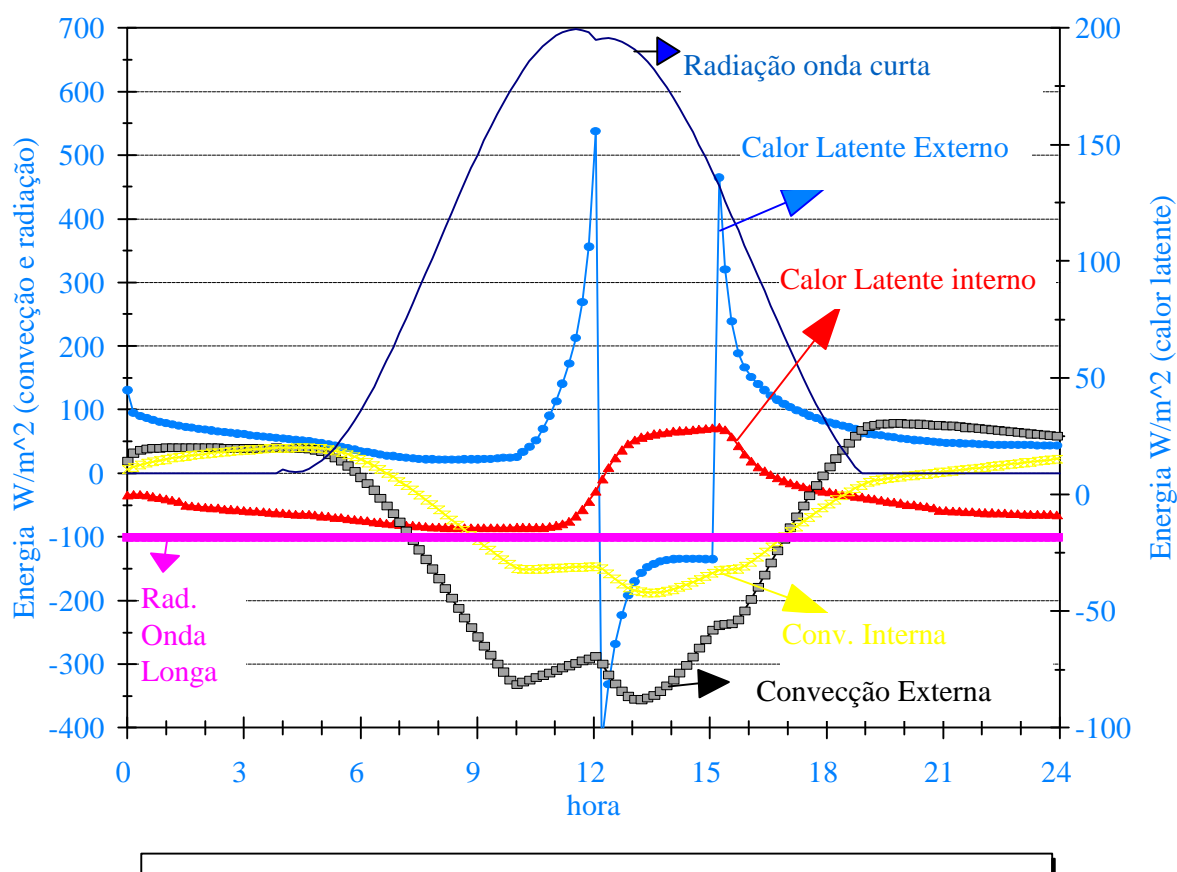
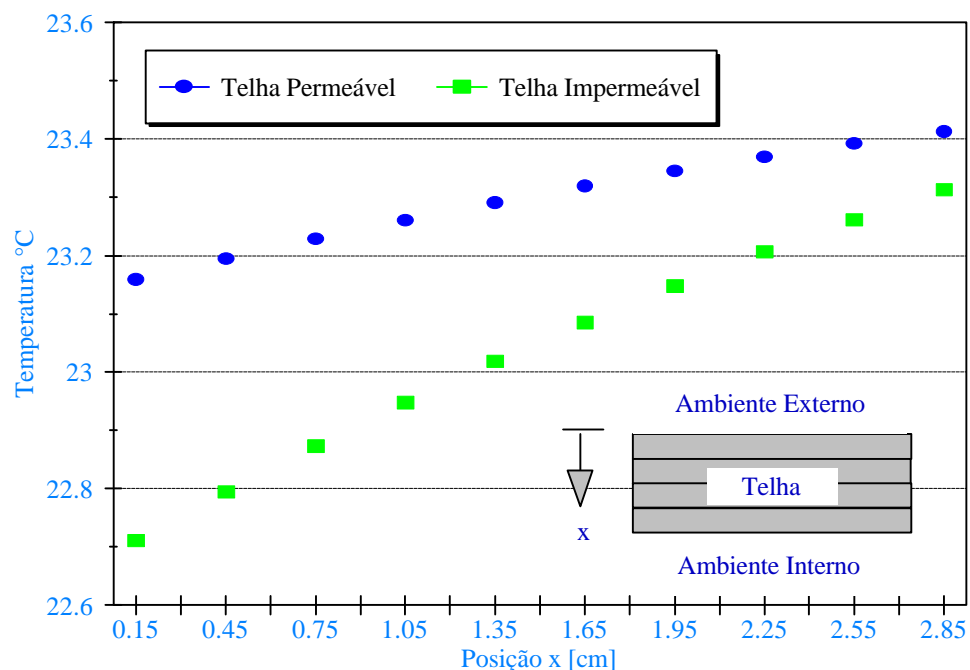


Figura 5.4: Evolução das trocas de energia nas interfaces externa e interna da telha de argamassa, dada em  $\text{W/m}^2$ .

Observe que como os dados climáticos são cíclicos, o resultado as 24h é igual ao resultado as 0h. De fato este resultado é encontrado após dois ou três dias de simulação.

O programa de simulação solicita inicialmente as propriedades físicas do material e os valores de temperatura e conteúdo volumétrico de umidade inicial, além de definições como intervalo de tempo. O programa inicia então a simulação avançando no tempo. Como os valores iniciais definidos pelo usuário no início da simulação não são os valores de equilíbrio, os valores de conteúdo e temperatura no final do primeiro dia de simulação são diferentes. Após um ou dois dias de simulação o sistema entra em regime periódico, o que é representado por  $\theta(t) = \theta(t+24h)$ .

A *Figura 5.5* apresenta o perfil de temperatura da telha permeável e impermeável para a simulação padrão com recorrência=2, às 24hs. No eixo horizontal, esta a posição em centímetros, e no eixo vertical a temperatura. Observa-se que a temperatura da telha permeável é maior, mas a variação de temperatura é menor. Já a telha impermeável tem temperatura menor mas maiores variações de temperatura.



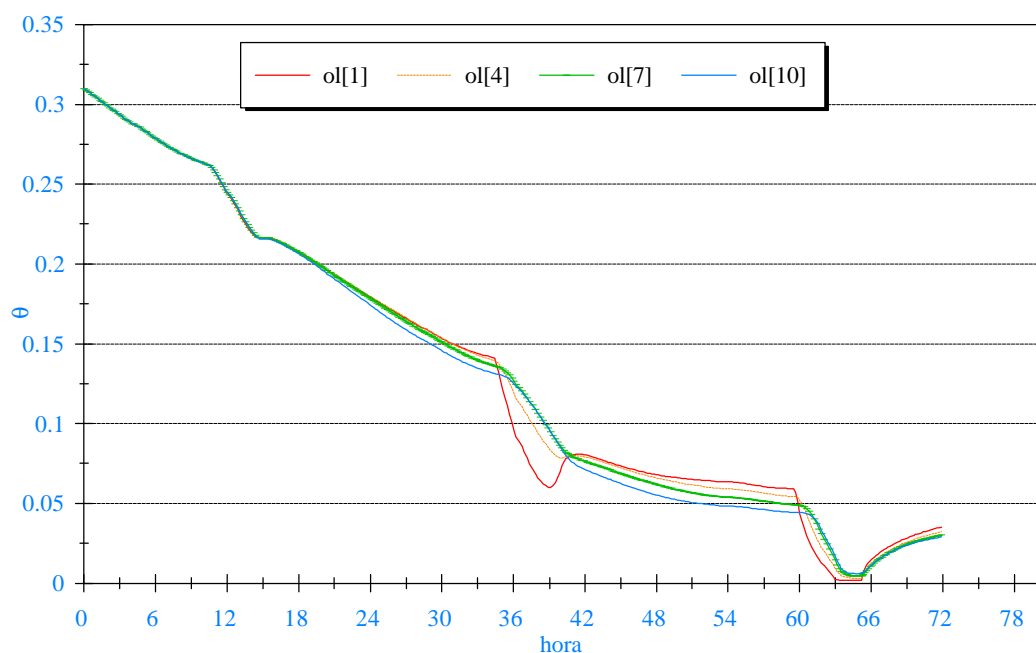
*Figura 5.5: Perfil de temperatura para telha permeável e impermeável , às 24hs, usando recorrência=2.*



### 5.1.3. Resultados simulação da telha de argamassa com amostras inicialmente saturadas

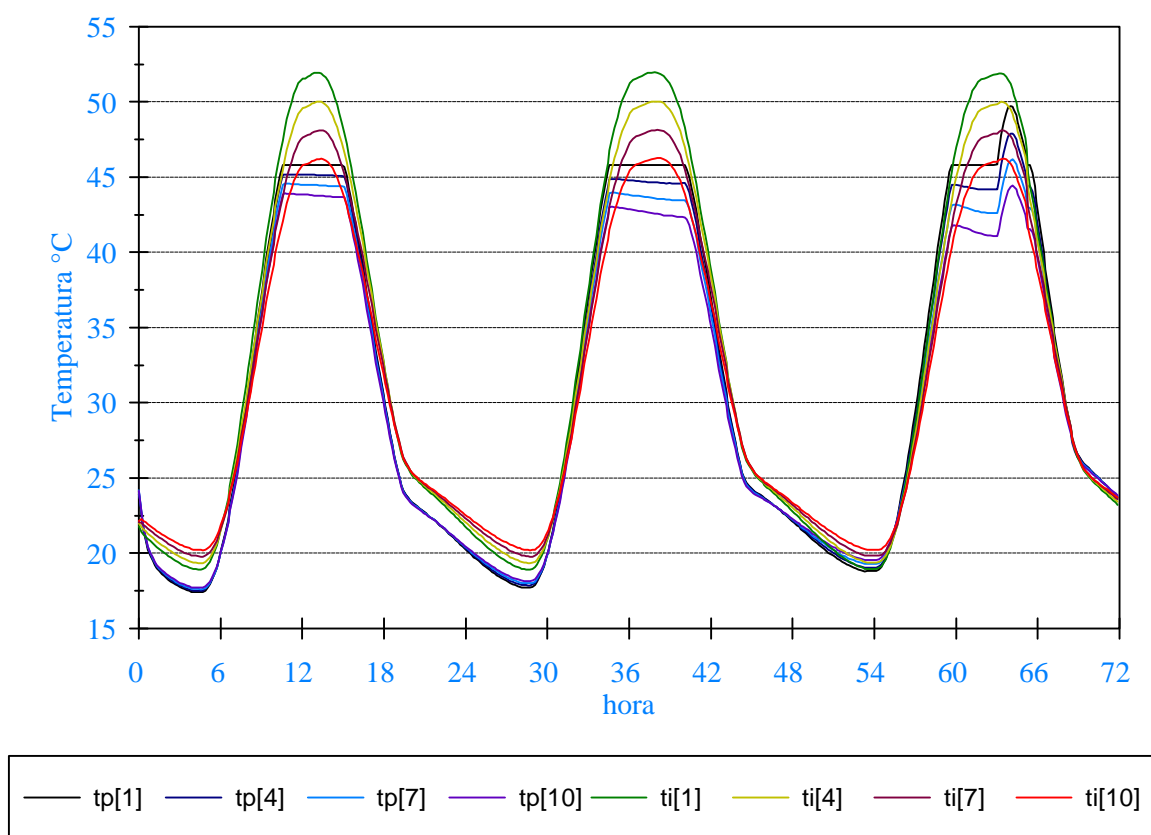
Esta simulação visa analisar o comportamento da telha, após uma chuva suficiente para que ocorra a saturação. A *Figura 5.6* apresenta a evolução do conteúdo volumétrico de umidade na telha, em que a telha se apresenta inicialmente saturada e com a formação de um filme de líquido de 1mm. A evaporação do filme de líquido ocorre nos primeiros 30 minutos da simulação, não aparecendo na figura.

Observe que a redução do conteúdo volumétrico de umidade é rápida no primeiro dia, atingindo  $w \approx 0.065$  as 24h. Observe que a telha perde umidade mesmo no período noturno. Já no segundo dia de simulação, as 36h, o conteúdo volumétrico de umidade apresenta os valores da simulação padrão. Depois de 36h de simulação (12h do segundo dia) a telha atinge valores de conteúdo volumétrico de umidade e temperatura da simulação padrão.



*Figura 5.6: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade  $q$ , para simulação com início saturado (depois de uma chuva)*

A *Figura 5.7* apresenta a evolução da temperatura para simulação da argamassa inicialmente saturada. Observe que no primeiro dia de simulação a temperatura da telha permeável não ultrapassa o patamar de  $\approx 45$  °C. Enquanto que para a telha impermeável a temperatura atinge picos de  $\approx 50$  °C. Observe também que a temperatura noturna da telha permeável é agora menor que a da telha impermeável, pois não ocorre condensação de umidade sobre a superfície da telha, não ocorrendo ganho de energia por calor latente.

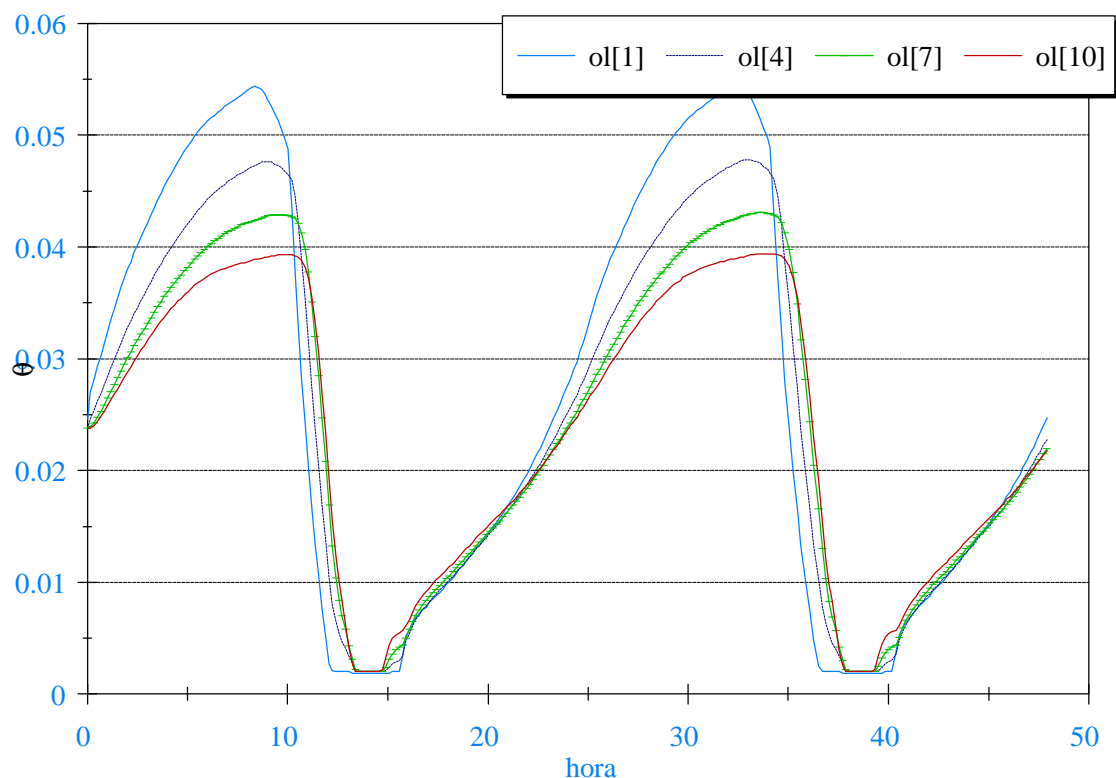


*Figura 5.7: Temperatura , para simulação com início saturado.*

#### 5.1.4. Simulação para a telha de argamassa com umidade externa e interna variando

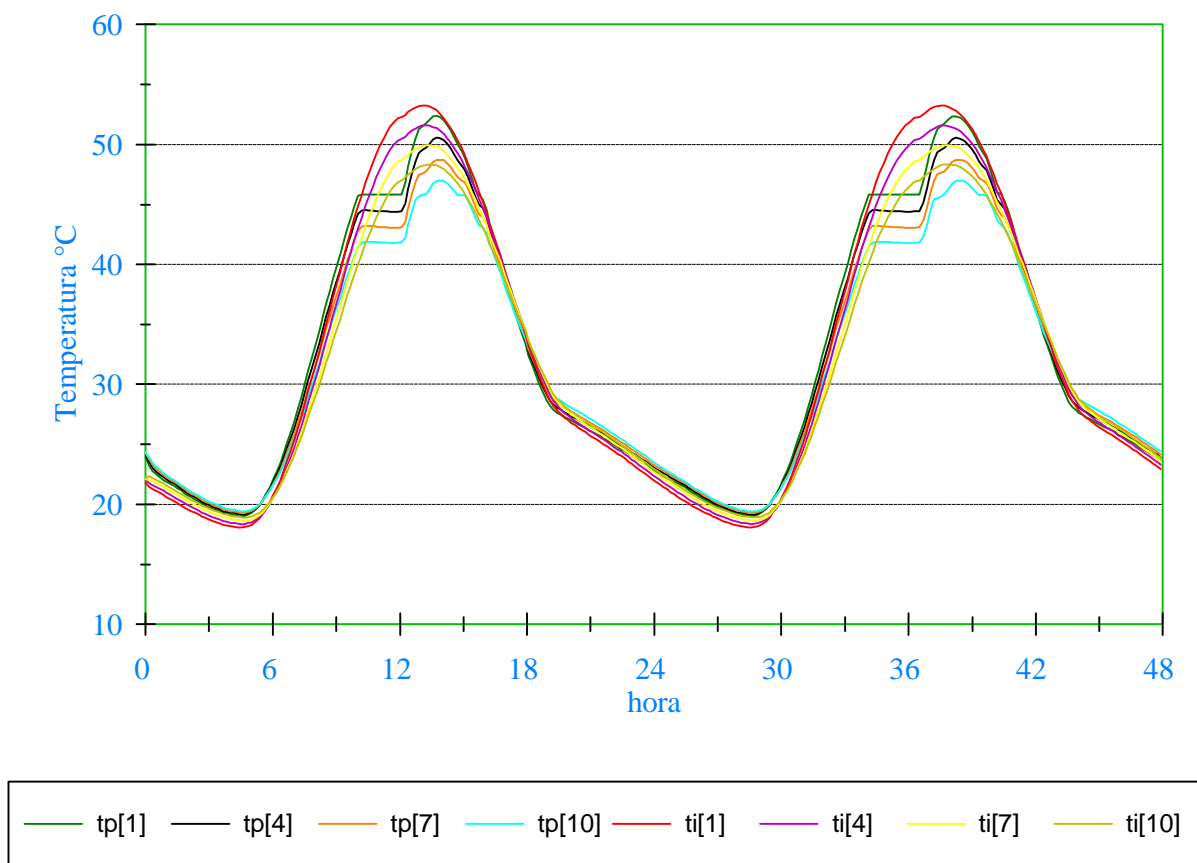
Esta simulação foi desenvolvida para a argamassa, considerando o conteúdo volumétrico de umidade do ar constante ao longo do dia, e com a umidade externa e interna variando de acordo com a temperatura do ar.

A *Figura 5.8* apresenta a evolução do conteúdo volumétrico de umidade, observe que os valores de conteúdo volumétrico de umidade atingidos no período noturno são maiores ( $q \gg 0.095$ ) que a simulação padrão ( $q \gg 0.05$ ). Isto ocorre porque com a umidade relativa variando a concentração de vapor do ar ficou maior. A umidade varia entre  $h=99\%$  a noite e  $h=50\%$  de dia.



*Figura 5.8: Evolução do conteúdo volumétrico de umidade  $\theta$ , considerando umidade variando entre  $h=50\%$  de dia e  $h=99\%$  a noite.*

A *Figura 5.9* mostra a evolução da temperatura para simulação com umidade externa variando. Como o conteúdo absorvido foi maior, o patamar de temperatura se manteve por mais tempo.



*Figura 5.9: Evolução da temperatura, para simulação com umidade variável.*

**Deve-se fazer uma consideração a respeito da utilização do conteúdo de umidade constante. Na realidade a variação da umidade do ar não é exatamente representada com a consideração do conteúdo de umidade do ar constante, a umidade do ar varia de uma forma um pouco diferente, mas os erros associados ao se considerar o conteúdo de umidade constante são pequenos, e normalmente se utiliza esta consideração nas simulações.**

### **5.1.5. Discussão da alteração do número de volumes de controles e do número de recorrência nas simulações**

Como o sistema de cálculo envolve a solução de dois sistemas de equações, um para solução do balanço de massa (conteúdo volumétrico de umidade) e outro para o balanço de energia (temperaturas), e como existe dependência entre ambas, foi usado um sistema de recorrência. Para um mesmo tempo  $t$ ; resolve-se repetidamente o balanço de massa com os novos valores de temperatura, e o balanço de energia, com os novos valores de conteúdo.

O programa de simulação desenvolvido permite que o usuário entre com o número de recorrências. Os resultados acima foram calculados considerando-se uma recorrência=2. Os resultados apresentados são diferentes para diferentes valores de recorrência.

Para recorrência=1, as curvas são mais suaves, a telha ganha menos umidade, mas também perde esta umidade mais lentamente, as resposta do sistema são mais lentas, pode-se observar que embora a radiação de onda curta inicie às 6h da manhã, a telha continua a ganhar umidade, o mesmo não ocorre para recorrência=4, neste caso, com o início da radiação solar, a telha passa a perder umidade. Em termos numéricos o ideal são duas recorrências, a primeira para levar em conta as variáveis não lineares e a segunda para levar em conta o acoplamento das equações.

A alteração do número de volumes de controle (10,50 e 100) não modifica os resultados.

Como foi observado um patamar na evolução da temperatura nas simulações acima apresentadas, resolveu-se realizar um ensaio de laboratório para verificar a presença deste patamar. Apresenta-se abaixo o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa.

## **5.2. SECAGEM DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA EM ESTUFA**

Com os primeiros resultados das simulações numéricas, observou-se a presença de um patamar, na evolução da temperatura da telha permeável, que mantinha a temperatura da mesma a  $\approx 45^{\circ}\text{C}$ . Inicialmente a presença deste patamar foi interpretada como um erro no programa de simulação. Foram feitas diversas verificações em todo o programa e não encontrou-se nenhum erro que pudesse estar ocasionando a presença deste patamar.

Admitiu-se então que se tratava de uma ocorrência física, que em determinado instante ocorre o equilíbrio das trocas térmicas entre a telha permeável e o meio, o que é representado pela manutenção da temperatura constante em  $45^{\circ}\text{C}$ .

O ensaio de campo não detectou a presença deste patamar, porque os ganhos de umidade foram pequenos em função da alta nebulosidade, baixa temperatura do ar, e pelas telhas não terem atingido temperaturas acima de  $45^{\circ}\text{C}$ .

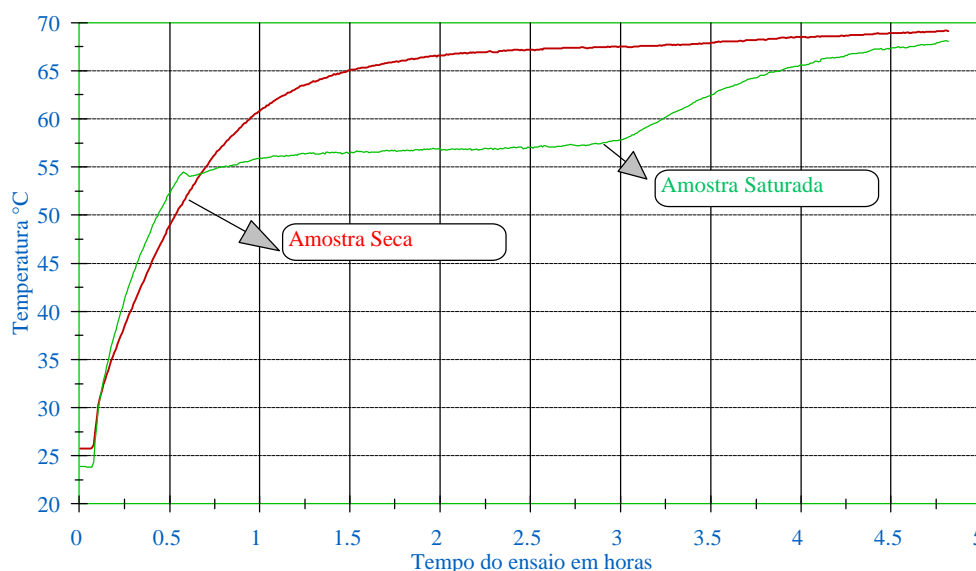
O ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa, foi realizado com duas amostras de argamassa uma seca e outra saturada (as mesmas amostras utilizadas no ensaio de campo). Os termopares foram fixados no centro das amostras de argamassa a uma profundidade de 1,5cm. Deixou-se uma das amostras seca ao ar, e a outra saturando em água destilada pelo período de 2 dias.

A estufa foi mantida a  $64^{\circ}\text{C}$  para o primeiro ensaio e a  $75^{\circ}\text{C}$  para o segundo ensaio, e foi monitorada com um termômetro de mercúrio. Foi preparada uma junta de referência, e adaptado um programa de aquisição para a realização da aquisição de dados diretamente do HP Data Acquisition 3852S.

O ensaio iniciou rodando-se o programa de aquisição, e depois colocando-se as duas amostras de argamassa, a seca e a saturada dentro da estufa (apoiadas sobre o chão da estufa). Como a amostra saturada estava dentro de um recipiente com água destilada, a temperatura da mesma estava cerca de  $2^{\circ}\text{C}$  abaixo da temperatura da amostra seca, veja na Figura 5.16 no início do ensaio, que a amostra saturada está inicialmente a  $24^{\circ}\text{C}$ , contra  $26^{\circ}\text{C}$  da amostra seca.

O *Figura 5.12* apresenta o perfil de temperatura das duas amostras para o primeiro ensaio que foi realizado. Através deste ensaio pode-se verificar que a temperatura da amostra saturada fica acima da temperatura da amostra seca até as 0.6h. A partir das 0.6h a temperatura da amostra saturada fica menor. Observe a presença do patamar na evolução da temperatura das 0.6h até as 3h, para  $t=55^{\circ}\text{C}$  e  $t=57^{\circ}\text{C}$ , uma pequena variação de  $2^{\circ}\text{C}$ . Esta variação ocorreu porque a temperatura da junta de referência estava inicialmente a  $3^{\circ}\text{C}$  e no final do ensaio a  $1^{\circ}\text{C}$ . Se descontada a variação da junta de referência tem-se o patamar a  $55^{\circ}\text{C}$ . Deve-se considerar ainda a variação das condições de umidade dentro da estufa, pois com a secagem da amostra saturada ocorre variação da umidade dentro da estufa. O patamar no ensaio ficou em  $55^{\circ}\text{C}$  é diferente do apresentado pelas simulações numéricas, porque as condições são diferentes. A idéia é apenas verificar a presença ou não deste patamar na evolução da temperatura.

Embora a amostra saturada estivesse inicialmente a  $24^{\circ}\text{C}$  e a amostra seca a  $26^{\circ}\text{C}$ , a temperatura da amostra saturada ultrapassa a da amostra seca as  $\approx 0.2\text{hs}$ , isto ocorre porque como as amostras estão apoiadas sobre o chão da estufa, ocorrem trocas de calor por condução, e a amostra saturada tem uma condutividade maior que a seca, tendo sua temperatura elevada mais rapidamente.



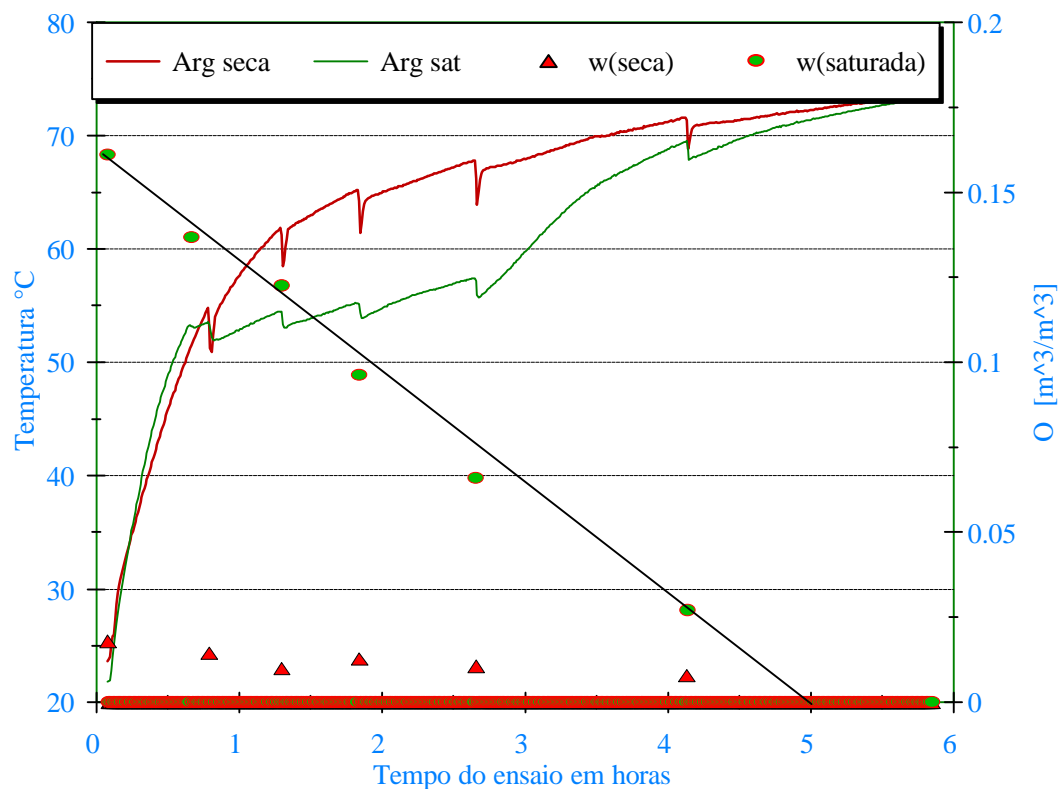
*Figura 5.10: Evolução da temperatura para o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa, amostra seca e amostra saturada. (1º ensaio)*



O primeiro ensaio foi realizado sem retirar as amostras da estufa, de forma que não se determinou-se a massa das amostras ao longo do ensaio.

Para que se pudesse verificar a evolução do conteúdo mássico de umidade repetiu-se o experimento, sendo agora, as amostras retiradas da estufa a determinados intervalos de tempo e obtida a massa das mesmas, com balança de resolução 0.05g. A *Figura 5.13* apresenta a evolução da temperatura das duas amostras para o 2º ensaio e os valores de massa.

Neste segundo ensaio a temperatura da estufa foi fixada em 75°C. Observa-se o mesmo resultado do 1º ensaio. As variações nas curvas de temperatura ocorreram, porque quando se retira as amostras da estufa a sua temperatura cai. Este ensaio teve uma duração maior, de forma que pode-se verificar, que depois de eliminado o conteúdo de umidade da amostra inicialmente saturada as temperaturas se igualam, de acordo com o apresentado pelas simulações numéricas.

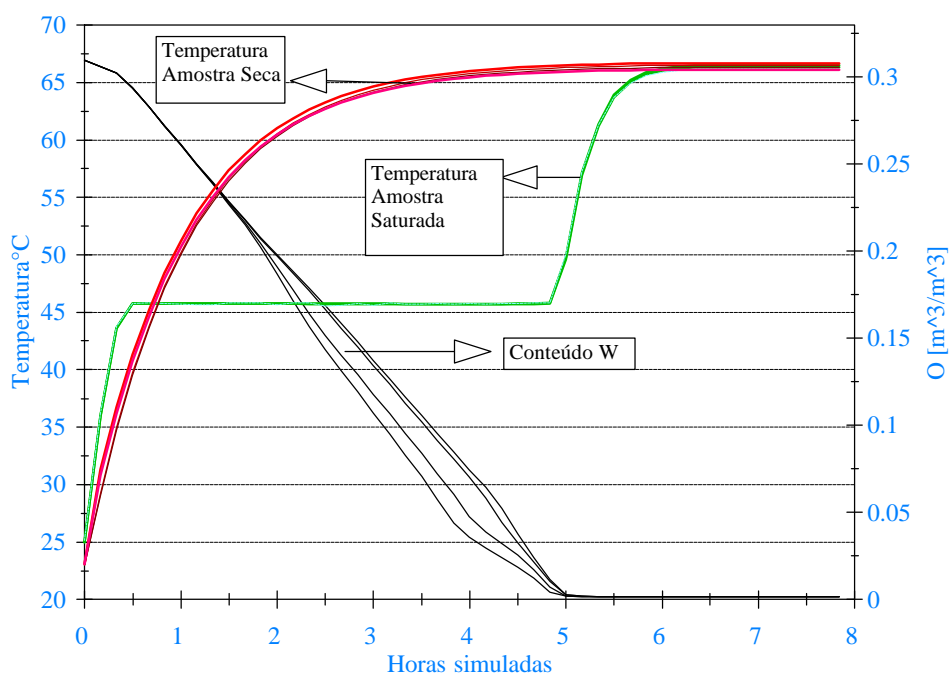


*Figura 5.11: Evolução da temperatura para amostra de argamassa inicialmente saturada versus amostra seca, e evolução do conteúdo volumétrico de umidade para a 2ª medição*

Em ambas as figuras observa-se que a evolução da temperatura da amostra saturada é inicialmente maior, existe aí uma relação entre a maior capacidade térmica da amostra saturada que faz com que sua inércia térmica seja maior, e a maior condutividade térmica, que faz com que a telha reaja mais rapidamente às condições do meio.

Para a amostra saturada as 0.6h de simulação, observa-se que ocorre um pequeno pico de temperatura atingindo  $\approx 54^{\circ}\text{C}$ , depois caindo para  $\approx 53.5^{\circ}\text{C}$  e então voltando a subir lentamente. Este comportamento é atribuído a uma menor velocidade das trocas de umidade em relação as trocas de calor por condução e por convecção.

Para efeito de comparação foi feita uma pequena alteração no programa de simulação numérica (alteração dos valores de radiação e temperatura do ar) e realizada uma simulação, para se comparar com o resultado do ensaio da estufa. A *Figura 5.14* apresenta os resultados da simulação. Os resultados são muito semelhantes, a temperatura da amostra saturada sobe mais rapidamente que a da amostra seca, da mesma forma que no ensaio real. Ocorre o patamar na evolução da temperatura (para temperatura a  $46^{\circ}\text{C}$ ) e depois de ocorrer a secagem da amostra saturada a mesma tem a sua temperatura elevada até ficar com a mesma temperatura da telha seca.



*Figura 5.12: Simulação da evolução da temperatura e conteúdo volumétrico de umidade de uma amostra de argamassa para comparação com o ensaio da estufa.*

O objetivo da realização deste ensaio foi alcançado, que é a comprovação da existência do patamar de temperatura em telhas permeáveis, quando ocorre o equilíbrio das trocas de energia. O ensaio é simples sem maiores pretensões, deve-se posteriormente desenvolver um processo mais detalhado e cuidadoso.

### **5.3. CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES E DO ENSAIO DE SECAGEM DE AMOSTRAS DE ARGAMASSA EM ESTUFA**

Depois de entrar em equilíbrio com o ambiente as temperaturas médias entre a telha permeável e impermeável são iguais. A diferença é que a telha permeável tem temperatura noturna maior e diurna menor, ou seja uma amplitude térmica menor. Este resultado é válido quando só ocorrem trocas de umidade, ou seja sem chuva. Esta conclusão também foi obtida em [2].

Com a chuva (simulação com início saturado) a performance térmica da telha permeável é ainda melhor, pois a mesma ganha grande quantidade de massa e em consequência disto tem sua temperatura menor que a temperatura da telha impermeável mesmo para períodos noturnos.

Estes resultados evidenciam a importância das chuvas, que fazem com que o conteúdo volumétrico de umidade fique próximo da saturação. Os ganhos de massa líquida durante a chuva ocorrem sem trocas de calor latente. As diferenças nas temperaturas das telhas serão ainda maiores se a chuva ocorrer no período diurno, pois a temperatura da água da chuva é menor que a temperatura da telha, resfriando a mesma (a tendência é a telha ficar com a temperatura próxima a da chuva, pois a água tem uma capacidade térmica 4 vezes maior que a da argamassa, isto pode ser verificado no ensaio de campo, medição 2). De fato a influência da chuva vai ser função de sua duração, intensidade, temperatura da chuva, e hora do dia em que ocorre. Se a duração e ou a intensidade da chuva for muito grande a temperatura da telha permeável e impermeável tende a ficar igual à da chuva. Se for porém uma chuva de pequena duração (chuva de verão) a redução da temperatura da telha permeável será maior que a da telha impermeável.

Com o ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa foi possível verificar a presença do patamar na evolução da temperatura de telhas permeáveis, e fazer uma pré-validação do programa de simulação.

# Capítulo 6

## Conclusões

## 6. CONCLUSÃO

O estudo da transferência de calor e umidade em telhas, se demonstrou extremamente interessante. A metodologia adotada, com a realização de ensaios de campo, de laboratório e simulações numéricas se mostrou eficiente na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos.

A primeira etapa do trabalho foi desenvolver a formulação matemática e o programa de simulação, de forma que as simulações que foram desenvolvidas esclareceram inicialmente os fenômenos envolvidos e a importância da transferência de umidade. Ficou evidenciado que as telhas porosas absorvem umidade do ar no período noturno ficando com maior temperatura, e perdem esta umidade no período diurno, ficando com a temperatura diurna menor; ou seja a telha porosa apresenta uma amplitude térmica menor. Através das simulações identificou-se ainda a ocorrência de um patamar na evolução da temperatura das telhas porosas, ou seja enquanto houver umidade na telha a temperatura da mesma não ultrapassa este patamar de equilíbrio das trocas térmicas, o que é um resultado novo, e que foi corroborado pelo ensaio de secagem de amostra de argamassa em estufa.

Outra etapa que foi desenvolvida foram os ensaios de laboratório, com o objetivo de caracterizar as propriedades físicas da telha de cerâmica. O ensaio de adsorção realizado caracteriza a telha de cerâmica como material higroscópico. A densidade ( $1\,880 \pm 80 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ) e a porosidade ( $0.331 \pm 0.014 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}$ ) estão de acordo com os valores encontrados na bibliografia, o conteúdo mássico de umidade na saturação foi de  $w_{\text{sat}} = 0.17647 \pm 0.00003 \text{ [kg/kg]}$ . Estes resultados foram confirmados pelo ensaio de porosimetria a mercúrio, através do qual encontrou-se uma densidade de  $1\,829.8 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ , uma porosidade de  $0.3114 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}$  e o conteúdo mássico de umidade de  $w_{\text{sat}} = 0.1702 \text{ kg/kg}$ .

A difusividade calculada a partir do ensaio de permeabilidade ao vapor e do ensaio de adsorção, apresenta valores de acordo com a bibliografia. Este ensaio e o ensaio de dessorção devem ser repetidos para se confirmar os valores encontrados.

Outro trabalho que foi desenvolvido e que apresentou resultados surpreendentes foi o ensaio de campo. Os resultados deste ensaio mostram que as telhas permeáveis têm temperatura noturna maior e diurna menor que as telhas impermeáveis, e apresentam uma amplitude térmica menor. Isto pode ser observado para os diferentes tipos de telhas, nas diferentes cores. Ou seja o mesmo resultado encontrado nas simulações. As telhas permeáveis apresentaram um desempenho térmico superior as não permeáveis em todas as cores (branca, preta e natural).

Verificou-se através do ensaio de campo, que as trocas de umidade vão ocorrer em função de dois processos: primeiro as perdas de radiação em ondas longas para a janela atmosférica, segundo devido a radiação solar.

Através da comparação da evolução da temperatura de telhas com diferentes cores, observou-se que para as telhas pretas as diferenças de temperatura entre a telha permeável e impermeável é muito pequena  $\approx 0^{\circ}\text{C}$ . Esta diferença aumenta para as telhas vermelhas chegando a  $9^{\circ}\text{C}$ , e diminui para as telhas brancas, ficando em  $2^{\circ}\text{C}$ .

Constatou-se ainda, em função do ensaio de campo, que podem ocorrer diferenças nas temperaturas de duas telhas permeáveis, devido a diferenças na estrutura porosa delas. Esta diferença na estrutura porosa é caracterizada por alterações na porosidade, e densidade.

Para a segunda medição do ensaio de campo, destacou-se a importância da chuva. Com a chuva a telha pode saturar, e durante todo o intervalo de tempo necessário para a evaporação da massa de líquido da chuva, a temperatura da telha permeável é menor que a temperatura da telha impermeável. Ou seja a telha permeável vai apresentar um desempenho térmico ainda maior quando da ocorrência de chuvas.

Finalmente o ensaio da estufa (secagem de duas amostras de argamassa em estufa, uma seca e outra saturada) comprovou a presença do patamar na evolução da temperatura da telha permeável. E pré-validou o programa de simulação, pois os resultados da simulação do ensaio de secagem de amostras de argamassa em estufa foram semelhantes aos encontrados no ensaio real.

### **6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- ◆ Aperfeiçoamento do programa de simulação e das frameworks desenvolvidas. Com o objetivo de criar uma biblioteca de classes relacionada às simulações térmicas. O desenvolvimento de uma biblioteca de classes (funções) relacionadas a simulação térmica permitirá o desenvolvimento de simulações mais complexas mais rapidamente. As bibliotecas permitem um maior reaproveitamento dos programas.
- ◆ Simplificação do processo; para que se possa desenvolver programas mais simples ( que levem em conta a resistência hidráulica, a fixação e transferência de umidade).
- ◆ A determinação de toda estrutura porosa das telhas de cerâmica através de ensaios de embebição e de micrografias.
- ◆ Desenvolvimento de telha de cerâmica com maior superfície de contato com o ar, para aumentar as trocas de massa. E estudos de alteração da porosidade e densidade da telha visando aumentar a eficiência do processo de adsorção.
- ◆ Repetir os ensaios com outros tipos de telhas e de outras regiões para verificar o comportamento destas.
- ◆ Realizar estudos sobre tintas que mantenham a permeabilidade, e que não sofram o envelhecimento e ataque de fungos. (que enegrecem as telhas)
- ◆ Realizar ensaios para determinar a influência da difusividade térmica.
- ◆ Desenvolver ensaio dinâmico para determinar a adsorção e permeabilidade conjuntamente.
- ◆ Realizar as simulações considerando geometria bi e tri-dimensional



# Capítulo 7

## Bibliografía

## 7. BIBLIOGRAFIA

- 1 A.D.IRVING. *Validation of Dynamic Thermal Models*. **Energy and Buildings**. v.10, p.213-220, 1988.
- 2 BUENO, A. D; PHILIPI, P.C; LAMBERTS, R; . *Influence of Water Vapour Sorption on the Thermal Behavior of Masonry Materials*. **3rd Internacional Masonry Conference**. London, 1992.
- 3 DE VRIES, D.A . *Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media*. **Transaction American Geophysical Union**. v. 39, No.8, p.909-916. october 1958.
- 4 DE VRIES, Daniel A. *The Theory Of Heat And Moisture Transfer In Porous Media Revisited*. **J. Heat Mass Tranfer**. p.1343-1350, 1987.
- 5 DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. *Solar Energy Thermal Processes*. New York, **John Wiley**. 1974.
- 6 DUNTEMANN, Jeff & KEITH, Weiskamp . *C/C++ Ferramentas Poderosas*. **Editora Berkeley**. Rio de Janiro, 1993.
- 7 EZZEL, Ben. *Programação em Turbo C++: Uma Abordagem Orientada a Objeto*. **Editora Ciência Moderna**. Rio de Janeiro, 1991.
- 8 EZZEL, Ben. *Programação Gráfica em Turbo C++: Uma Abordagem Orientada a Objeto*. **Editora Ciência Moderna**. Rio de Janeiro, 1991.
- 9 FERNANDES, C.P; PHILIPPI, P.C; BRINCAS, C.R; PEDRINI, A. *Estudo dos Processos de Condensação-Evaporação na Condição de Equilíbrio Higrotérmico em Meios Porosos Consolidados*. **Universidade Federal de Santa Catarina**.

- 10 FERNANDES, C. P. *Estudo dos Processos de Condensação e Migração de Umidade em Meios Porosos Consolidados. Análise Experimental de uma Argamassa de Cal e Cimento. Dissertação de Mestrado*, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1990.
- 11 FERNANDES C.P; PHILIPPI P.C; DA CUNHA Neto, J.A.B. *Determinação da Difusividade Isotérmica de Umidade Através dos Métodos da Sonda Térmica e Atenuação de Raios-Gama. XIX ENEMP*. p.163-174, 1992.
- 12 GANDRILLE, G.P; HAMMOND; MELO,C. *An Intermediate-level Model of external Convection for Building Energy Simulation. Energy and Buildings*. v12, p.53-66, 1988.
- 13 HOLZNER Steven & The Peter Norton Computing Group. *Programando em C++*. Editora Campus. Rio de Janeiro, 1993.
- 14 INCROPERA, Frank P. *Introduction to Heat Transfer. John Wiley & Sons*. 2.ed, Singapore, 1990.
- 15 IOSHIMOTO, Eduardo & THOMAZ, Ércio . *Apostila PCC-334- Técnicas e Materiais de Construção Civil. Materiais Cerâmicos Para a Construção Civil. IPT*.
- 16 ITO, N; KIMURA, K; OKA, J. *A Field Experiment Study on The Convective Heat transfer Coefficient on exterior Surface of a building. ASHRAE Semianual Meeting*. New Orleans, La., January, p.23-27, 1972.
- 17 JUDKOFF, R.D. *Validation of Building Energy Analysis Simulation Programs at the Solar Energy Research Institute. Energy and Building*. v.10, p.221-239. 1988.
- 18 KREITH, F . *Princípios da Transmissão de Calor. Edgard Blucher*. 3 ed, São Paulo, 1977.
- 19 LAMBERTS R. *Desempenho Térmico de Coberturas Leves com Ático: Bancada de Testes e Modelo Matemático. Dissertação de Mestrado*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1983.

- 20 MARTIN, James & MCCLURE, Carma. *Técnicas Estruturadas e CASE*. **Editora MacGraw-Hill**, São Paulo, 1991.
- 21 MATIKO, Neide & SATO, Nakata . *Modelo Para Cálculo de Temperaturas e Fluxos de Calor em Coberturas*. IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Tecnologia de Edificações**. 1ºed, p.477-480 PINI, São Paulo, 1988.
- 22 NORTON, Peter. *Programando em Borland C++ para Windows*. **Editora Berkeley**, Rio de Janeiro, 1993.
- 23 OZISIK, M Necati. *Transferência de Calor Um Texto Básico*. **Editora Guanabara**. Rio De Janeiro,1990.
- 24 PACHECO R. & MONTENEGRO ,F . *Introdução a Programação Orientada a Objeto em C++*, **Curso Ministrado FEESC**. Florianópolis, 1993.
- 25 PAPPAS,C. H. & MURRAY, W. H . *Turbo C++ Completo e Total*. **Editora Mac-Graw Hill**. São Paulo, 1991.
- 26 PERRIN ,B; FOURES J.C; JAVELAS, R. *Détermination du coefficient de diffusion isotherme de l'humidité dans des matériaux de construction*. **Laboratoire de Génie Civil de I' INSA et de I'UPS deToulouse**. p. 27-33, 1983.
- 27 PETRUCCI, E.G.R. *Materiais de Construção*. **Editora globo**. 8º ed, Rio de Janeiro, 1987.
- 28 PHILIP, J. R.; DE VRIES, D.R.. *Moisture movement in porous media under temperature gradients*. **Trans. Am. Geophysical Union**. v38, p.222-232, 1957.
- 29 PHILIPPI P.C; FERNANDES C.P; YUNES, P.R. *Higroscopicidade e Capilaridade nos Materiais de Construção*. **Anais 2º Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**. p.171-178. Florianópolis, 1993.

- 30 PHILIPPI P.C. *Estudo da Microestrutura dos Materiais Porosos Usados em Edificações. Influência Sobre os Processos de Fixação e Transferência de Umidade.* Monografia. **Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.** Florianópolis.
- 31 RAMOS L. ZARO M; DIAS R. *Termopares Teoria e Prática.* **Ed Mercado Aberto.**
- 32 Revista Arquitetura e Construção . **Editora Abril Cultural.** Ano 9, Edição número 4, abril de 93.
- 33 RICHARD S. Wiener & LEWIS J. Pinson. *Programação Orientada para Objeto e C++.* **Editora MacGraw-Hill.** São Paulo, 1991.
- 34 SHARPLES,S. *Full-scale Measurements of Convective Energy Losses from Exterior Building Surfaces.* **Building and Environment.** vol 19, No 1, p. 31-39, 1984.
- 35 WINBLAD Ann, et al. *Software Orientado ao Objeto.* **Makron Books.** São Paulo, 1993.
- 36 YUNES, Pablo . Determinação da Distribuição de Poros de uma Argamassa de Cimento e Cal Usando as Isotermas de Equilíbrio e Dados de Microscopia Eletrônica.. **Dissertação de Mestrado.** Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis,1993.
- 37 COAD & YOURDAN. *Análise Orientada a Objeto.* **Editora Campus.** Rio de Janeiro, 1992.
- 38 CIBS, Guide 3. *Thermal Properties Of Building Structures.* **The Chartered Intitution of Building Services.** 1980.
- 39 CIBS, Guide volume C. *Properties Of Humid Air.* **The Chartered Intituition of Building Services.** 1980.
- 40 CSTB, *Regles de Calcul des Caractéristiques Thermiques Utiles des Parois de Construction.* **Cahier du Centre Scientifique et Technique du Batiment,** n° 184, Novembre, 1977.

- 41 DIHLMAN. Comunicações pessoais. Pesquisador do SINMEC, UFSC.
- 42 GONZALES, Eduardo; HINZ, ELKE; OTEIZA, PILAR; QUIROS, Carlos. *La Envolverte Del Edificio*. Proyecto Clima y Arquitectura. **Ediciones G. Gili S.A de C.V.** v. 2, parte 2, p.75-114, 1986.
- 43 BELLINI, José A.C.N. *Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire. Thèse de Doctorat*. Université Joseph Fourier.Grenoble, 1992.
- 44 PATANKAR, S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. **McGraw-Hill Book Company**. Washington, 1980.
- 45 SIEGEL Robert & HOWELL John R, *Thermal Radiation Heat Transfer*. **Hemisphere Publishing Corporation**. Washington, 1992.
- 46 MALISKA C.R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. (Apostila de aula). Florianópolis, 1994.
- 47 NORMAIS CLIMATOLÓGICAS. Dados para Florianópolis, período de 1960-1990.
- 48 SOUZA, H.A; MAGNANI F.S; PHILIPPI P.C. *Estudo da Influência da Topologia de uma Rede de Percolação em Processos de Drenagem*. **Anais XIX ENEMP**. p.79-90, Campinas ,1991.
- 49 BRAKEL, Van J & MODRY, S & SVATA, M. *Mercury Porosimetry: State of the Art*.
- 50 EVERET, D.H. & HAYNES, J.M. *Model Studies of Capillary Condensation I. Cylindrical Pore Model with Zero Contact Angle*. **Journal Of Coloidal and Interface Science**. Vol 38, No 1, January 1972.
- 51 MEHOHANI, L . *Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade*. **These Docteur 3° Cycle**. Institut National Polytechnique de Grenoble. Novembro de 1987.

# Apêndices

## APÊNDICE A: SOLUÇÕES SALINAS

Umidade relativa mantida pelas soluções salinas saturadas para temperatura entre 20°C e 40°C.

SOLUÇÃO SALINA	FÓRMULA QUÍMICA	h%	h%	h%	h%	h%
		20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO	KOH	9	8	7	6	6
CLORETO DE LITHIUM	LiCl.X.H <sub>2</sub> O	12	12	12	11	11
ACETATO DE POTÁSSIO	K CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub>	22	22	22	21	20
CLORETO DE MAGNÉSIO	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	33	33	33	32	32
CARBONATO DE POTÁSSIO	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> . 2H <sub>2</sub> O	44	43	43	43	42
BICROMATO DE SÓDIO	Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> . 2H <sub>2</sub> O	55	54	52	51	50
NITRITO DE SÓDIO	NaNO <sub>2</sub>	66	65	63	62	62
CLORETO DE SÓDIO	NaCl	76	75	75	75	75
SULFATO DE AMÔNIO	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	81	80	80	80	79
CLORETO DE POTÁSSIO	KCl	86	85	85	84	82
NITRATO DE POTÁSSIO	HNO <sub>3</sub>	93	92	91	89	88
SULFATO DE POTÁSSIO	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97	97	96	96	96

NORMA FRANCESA NF \* 15 - 014

FONTE: MEROHANI, L . *Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade. These Docteur 3<sup>o</sup> Cycle*. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembro de 1987.



## ***APÊNDICE B: RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIMETRIA A MERCÚRIO***

### **Equipamento**

PORESIZER 9320 V2.05

### **Dados de Entrada**

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DADOS /15

OPERATOR: Bellini LP 09:54:42 12/07/94

SAMPLE ID: Telha-1 HP 15:07:26 12/07/94

SUBMITTER: Andre REP 15:07:27 12/07/94

PENETROMETER NUMBER: 920.617-07

PENETROMETER CONSTANT: 10.79  $\mu\text{L/pF}$

PENETROMETER WEIGHT: 69.8470 g

STEM VOLUME: 0.3920 mL

MAXIMUM HEAD PRESSURE: 0.0307 MPa

PENETROMETER VOLUME: 5.8962 mL

### **Dados do mercúrio**

ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg

RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg

MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm

MERCURY DENSITY: 13.5291 g/mL

**Dados da amostra**

SAMPLE WEIGHT: 1.1840 g

SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 142.0470 g

**Informações sobre as pressões aplicadas**

LOW PRESSURE:

MERCURY FILLING PRESSURE: 0.0019 MPa

LAST LOW PRESSURE POINT: 0.1303 MPa

HIGH PRESSURE:

RUN TYPE: AUTOMATIC

RUN METHOD: EQUILIBRATED

EQUILIBRATION TIME: 180 seconds

**Sumário dos dados de intrusão (diâmetros entre 0.0050  $\alpha$  1000.0000  $\mu\text{m}$ )**

TOTAL INTRUSION VOLUME = 0.1702 mL/g

TOTAL PORE AREA = 14.791 m<sup>2</sup>/g

MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) = 0.0579  $\mu\text{m}$

MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) = 0.0385  $\mu\text{m}$

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) = 0.0460  $\mu\text{m}$

BULK DENSITY = 1.8298 g/mL

APPARENT (SKELETAL) DENSITY = 2.6573 g/mL

POROSITY = 31.14 %

STEM VOLUME USED = 51 %

**Tabela 1: Resultados da porosimetria a mercúrio**

<b>Pressure</b>	<b>Pore Diameter</b>	<b>Cumulate Volume</b>	<b>Diferencial Volume dV/dD</b>	<b>Cumulate Pore Area</b>	<b>Incremental Pore Area</b>
MPa	µm	mL/g	mL/g-µm	m <sup>2</sup> /g	m <sup>2</sup> /g
0.0019	659.2825	0.0000	1.591E-06	0.000	0.000
0.0070	179.3981	0.0014	5.722E-06	0.000	0.000
0.0159	78.4429	0.0022	1.077E-05	0.000	0.000
0.0338	36.9410	0.0028	2.324E-05	0.000	0.000
0.0543	22.9629	0.0032	3.400E-05	0.000	0.000
0.0695	17.9452	0.0034	3.530E-05	0.000	0.000
0.0820	15.2058	0.0035	7.385E-05	0.000	0.000
0.1026	12.1576	0.0039	9.163E-05	0.000	0.000
0.1121	11.1229	0.0039	7.080E-05	0.000	0.000
0.1303	9.5716	0.0040	1.015E-04	0.000	0.000
0.2015	6.1890	0.0047	1.575E-04	0.001	0.000
0.3106	4.0144	0.0049	1.825E-04	0.001	0.000
0.5944	2.0979	0.0055	3.753E-04	0.002	0.001
1.0322	1.2081	0.0059	7.377E-04	0.003	0.001
1.7630	0.7073	0.0068	3.209E-03	0.006	0.004
3.1165	0.4001	0.0086	9.671E-03	0.019	0.013
5.4845	0.2274	0.0115	3.036E-02	0.057	0.038
7.5079	0.1661	0.0146	8.269E-02	0.119	0.062
11.6404	0.1071	0.0247	3.366E-01	0.415	0.295
14.0710	0.0886	0.0340	7.874E-01	0.797	0.382
17.0031	0.0733	0.0522	1.611E+00	1.694	0.898
20.5583	0.0607	0.0788	2.175E+00	3.282	1.587

24.8170	0.0502	0.1030	2.267E+00	5.029	1.747
26.9662	0.0462	0.1122	2.231E+00	5.791	0.762
30.1138	0.0414	0.1229	2.147E+00	6.768	0.977
32.9561	0.0378	0.1306	2.078E+00	7.544	0.777
36.4096	0.0342	0.1381	1.966E+00	8.379	0.835
9.9323	0.0312	0.1439	1.832E+00	9.088	0.709
44.0067	0.0283	0.1491	1.661E+00	9.779	0.691
46.7896	0.0267	0.1519	1.552E+00	10.187	0.408
49.7794	0.0251	0.1542	1.442E+00	10.549	0.362
52.7670	0.0236	0.1562	1.341E+00	10.875	0.326
55.8189	0.0223	0.1579	1.252E+00	11.164	0.289
59.7120	0.0209	0.1596	1.155E+00	11.490	0.326
63.7005	0.0196	0.1611	1.054E+00	11.786	0.296
67.7338	0.0184	0.1623	9.585E-01	12.036	0.249
71.7246	0.0174	0.1633	8.740E-01	12.248	0.213
74.7629	0.0167	0.1638	8.153E-01	12.384	0.136
77.7356	0.0160	0.1642	7.639E-01	12.480	0.097
81.6828	0.0153	0.1649	7.099E-01	12.643	0.163
85.6427	0.0146	0.1654	6.647E-01	12.776	0.133
89.6359	0.0139	0.1658	6.288E-01	12.896	0.119
93.8014	0.0133	0.1661	5.972E-01	13.000	0.104
97.6602	0.0128	0.1664	5.676E-01	13.090	0.090
101.6614	0.0123	0.1668	5.384E-01	13.194	0.104
105.5925	0.0118	0.1669	5.195E-01	13.258	0.064
109.6030	0.0114	0.1672	5.069E-01	13.335	0.077
113.5904	0.0110	0.1674	5.025E-01	13.414	0.080

121.4125	0.0103	0.1677	5.046E-01	13.536	0.122
129.3656	0.0096	0.1680	5.225E-01	13.658	0.122
137.3336	0.0091	0.1684	5.448E-01	13.801	0.143
147.2563	0.0085	0.1687	5.637E-01	13.963	0.162
157.2101	0.0079	0.1690	5.845E-01	14.116	0.153
167.2143	0.0075	0.1693	6.170E-01	14.274	0.158
179.1101	0.0070	0.1696	6.792E-01	14.403	0.129
189.1546	0.0066	0.1699	7.379E-01	14.588	0.185
201.0538	0.0062	0.1702	7.871E-01	14.791	0.203
175.5592	0.0071	0.1705	-5.679E-02	14.967	0.177
130.5709	0.0096	0.1700	3.624E-01	14.734	-0.233
80.3082	0.0155	0.1682	2.450E-01	14.143	-0.591
60.2548	0.0207	0.1671	1.882E-01	13.906	-0.237
40.0820	0.0311	0.1653	1.537E-01	13.630	-0.275
20.0854	0.0621	0.1603	1.459E-01	13.200	-0.430
10.0345	0.1243	0.1416	4.751E-01	12.396	-0.804
5.0146	0.2487	0.0975	2.779E-01	11.451	-0.945
2.9941	0.4165	0.0639	3.220E-02	11.047	-0.404
0.5001	2.4934	0.0558	1.844E-03	11.025	-0.022